Institut für Bauwirtschaft IBW

Schriftenreihe Bauwirtschaft

I Forschung

Entwicklung eines Konzepts zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation

Ralf Gnerlich

kassel university press

Schriftenreihe Bauwirtschaft
I Forschung 40

Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel



kassel
university
press

Entwicklung eines Konzepts zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation

Ralf Gnerlich

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz, Universität Kassel
Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt, Bauhaus-Universität Weimar
Prof. Dr.-Ing. Felix Möhring, Hochschule Ostwestfalen-Lippe

Weitere Mitglieder der Promotionskommission:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Racky, Universität Kassel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Antonius Busch, Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 19. März 2019



Das e-book ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2019
ISBN: 978-3-7376-0682-0 (print)
ISBN 978-3-7376-0683-7 (e-book)
DOI: http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737606837
URN: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0002-406834

© 2019, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Druck und Verarbeitung: docupoint GmbH, Barleben
Printed in Germany

Vorwort des Herausgebers

Die deutsche Rechtsprechung der vergangenen Jahre hat gezeigt, dass die Darstellung der Störungsauswirkungen bei Bauzeitverzögerungen durch vernetzte Balkenpläne nicht mehr ausreichend ist, um einen Sachvortrag erfolgreich schlüssig präsentieren zu können. Der Nachweis der haftungsbegründenden Kausalität mit allen möglichen Auswirkungen im Bauablauf, einschließlich der dem Auftragnehmer zumutbaren Steuerungsmaßnahmen infolge seiner Schadensminderungspflichten und Kapazitätsverschiebungen, erfordert heute vom Gutachter ein ganzheitliches Darstellungsverfahren, das neben der bauspezifischen Situation und dem Soll-Ablauf auch den Ist-Ablauf und alle Störungsereignisse unabhängig vom Verursacher umfasst. Dies ist, infolge oft lückenhafter Dokumentation, für den Gutachter eine fast aussichtslose Aufgabe.

Herr Gnerlich schlägt in seiner Arbeit zur Bewältigung dieser Aufgabe die Simulation vor und entwickelt ein sehr umfassendes Konzept, um alle Anforderungen der Rechtsprechung erfüllen zu können. Dabei verwendet er zur Modellierung des Produktmodells die Daten und Informationen aus dem digitalen Bauwerksmodell (BIM) und erweitert dieses Modell im Prozessmodell durch die im Zuge der Angebotsbearbeitung geplanten Produktionskapazitäten und kalkulierten Aufwandswerte sowie die während der Ausführung entstandenen Dokumente. Auf dieser Grundlage entwickelt er prototypisch ein Simulationstool auf Basis von Petri-Netzen zum Beleg der Machbarkeit des Soll-Ablaufs und zur Ermittlung von realitätsnahen Störungsfolgen aus Bauzeitverzögerungen. Diese Methode ist zwar sehr aufwändig, aber eine gute neuartige Möglichkeit, um den restriktiven Anforderungen der Rechtsprechung gerecht zu werden. Ziel der Arbeit ist dabei die Entwicklung einer geeigneten BIM-basierten Bauablaufsimulation und die Implementierung eines geeigneten Nachweisverfahrens zur Untersuchung von Bauzeitverzögerungen.

Da die Arbeit sowohl die Themengebiete Baubetrieb, Systemanalyse und Modellierung, die Simulation und das Building Information Modeling als auch das deutsche Baurecht bezüglich der Bauzeitverzögerungen und deren gerichtsfeste Darlegung im Streitfall umfasst, stellt Herr Gnerlich in seinem Grundlagenteil sehr ausführlich die relevanten Sachverhalte und Zusammenhänge vor, unter Berücksichtigung zahlreicher Literaturangaben. Darauf aufbauend beschreibt er in einem weiteren Teil seiner Arbeit die Architektur seiner sehr eigenständigen und umfangreichen Entwicklung zur Simulation und deren prototypische technische Umsetzung. Die von ihm vorgeschlagene Soll-zu-Ist-Modifikation wird in einem weiteren Kapitel ausführlich vorgestellt.

Diese Arbeit ist im Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel am Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren entstanden und wurde durch den Herausgeber betreut. Die weiteren Gutachter waren Herr Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt von der Bauhaus-Universität Weimar und Herr Prof. Dr.-Ing. Felix Möhring von der Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Dem Autor Herrn Dr.-Ing. R. Gnerlich sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt für die sehr gute Zusammenarbeit während seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an meinem Fachgebiet, für seine Loyalität und seinen unermüdlichen Einsatz in Forschung und Lehre. Mit neuen kreativen Ideen hat er unseren Bemühungen zum nachhaltigen Einsatz der Simulation in der Bauwirtschaft eine neue Perspektive gegeben.

Kassel, im September 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz
Leitender Direktor des IBW
Leiter des Fachgebiets Bauorganisation und Bauverfahren

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren des Instituts für Bauwirtschaft der Universität Kassel.

Das Thema der Arbeit basiert auf Erfahrungen, die ich vor und während meines Berufslebens gewonnen habe. So befasste ich mich etwa schon zu meiner Schulzeit mit Simulationsanwendungen für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen im Ingenieurbüro meines Vaters. Während meines Studiums habe ich mich intensiv mit Themen der Bauinformatik auseinandergesetzt, um Kenntnisse über digitale Techniken im Bauwesen zu erlangen. Bei meiner späteren Tätigkeit als Bauleiter beeindruckten mich die Schnelllebigkeit und Komplexität der Bauabläufe von Großbaustellen im Ausbau. Regelmäßig kommen hier hohe Mehrkosten wegen Bauzeitverzögerungen zustande. In einigen Fällen stellt sich gar die Frage der vertragsrechtlichen Haftung. Um derartige Schwierigkeiten zu klären, müssen die vorherrschenden und zumeist umfangreichen Sachverhaltsschilderungen inhaltlich durchdrungen werden. Diesbezüglich war ich erstaunt, dass „zu Zeiten" der Industrie 4.0 bzw. des Building Information Modeling so gut wie keine Simulationen für derartige Zeitbewertungsanalysen in der deutschen Fachliteratur diskutiert oder gar wissenschaftlich untersucht wurden; trotz des Wissens darüber, dass Simulationstechniken zum Verständnisgewinn komplexer Abläufe genutzt werden sollten. Diese Umstände veranlassten mich, das Thema aus einer baubetrieblichen Sichtweise näher zu betrachten, was sich als eine sehr spannende Aufgabe herausstellte, die ich durchweg mit Begeisterung bearbeitet habe. Umso mehr hoffe ich, dass meine Forschung in Zukunft neue und hilfreiche Sichtweisen für die Bauwirtschaft eröffnet.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz danke ich für die vielen interessanten Gespräche und das von ihm geschenkte Vertrauen, das für die Fertigstellung der Arbeit sehr wichtig war. Ebenfalls danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Felix Möhring für die Übernahme der Zweitbegutachtungen und die wertvollen Fachgespräche. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Racky und bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Antonius Busch für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Besonderer Dank richtet sich an Frau Dr.-Ing. Antje Tiesler LL.M., Herrn Dr.-Ing. Kais Samkari, Herrn Dr.-Ing. Sven Hintsche, Herrn Ass. jur. Felix Waschke, Herrn Dipl.-Ing. Ralf Orschulok sowie Herrn Dipl.-Ing. Ralph Meyer, mit denen ich mich regelmäßig über die Themen der Arbeit auf hohem fachlichen Niveau und gleichzeitig freundschaftlich auseinandergesetzt habe. Weiterer Dank gilt Frau Syndikus-RA Birgit Weber, Herrn Dr.-Ing. Jörg Fricke wegen des kompetenten fachlichen Austauschs. Ebenfalls bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Bauwirtschaft für die fantastische Zusammenarbeit und förderliche Atmosphäre während meiner Promotionszeit.

Nicht zuletzt danke ich meiner Lebensgefährtin Christina für ihre Geduld, Unterstützung und Loyalität. Dieser Dank richtet sich ebenso herzlich an meine Eltern Ingrid und Oskar sowie meinen beiden Brüder Jens und Lars. Meinem Sohn Loui möchte ich auf diesem Wege mitteilen, dass ich sehr viel an ihn denke, weil er was ganz Besonderes für mich ist.

Kassel, im September 2019

Ralf Gnerlich

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **VII**
Tabellenverzeichnis ..... **XV**
Pseudocodeverzeichnis ..... **XVII**
Abkürzungsverzeichnis ..... **XVIII**

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Motivation 5
1.3 Zielsetzung 6
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit 6
1.5 Abgrenzungen 9
1.5.1 Konzeptionelle Entwicklung 9
1.5.2 Digitale Lösungsansätze und Methoden 10
1.5.3 Baubetriebliches Nachweisverfahren 11
1.5.4 Baurechtliche Themen 11

2 Modellbasierte Grundlagen **12**
2.1 Systemtheoretische Analyse als Grundvoraussetzung der Modellierung 12
2.1.1 Grundbestandteile von Systemen 12
2.1.2 Informationen als Wirkungsgrößen in Systemen 14
2.1.3 Strukturen in Systemen 14
2.1.4 Ordnungsbegriff – Ausgangspunkt für objektive Bewertungen 16
2.1.5 Emergentes Systemverhalten 21
2.1.6 Kausale Wirkungen in Systemen 23
2.1.7 Produktivität und Produktion 25
2.1.8 Störung und (Gegen-)Lenkung 28
2.1.9 Komplexität 29
2.1.10 Modellbegriff 30
2.1.11 Das Bauprojekt als komplexes System 30
2.2 BIM und Simulation 34
2.2.1 Building Information Modeling 34
2.2.2 Simulation 37
2.2.3 Abgrenzung simulationsfähiger Modelle 38

2.2.4 Simulationsstudien, Simulationsexperimente und Simulationsläufe 40
2.2.5 Verifizierung und Validierung 41
2.3 Arten der Bauablaufsimulation 44
2.3.1 Zyklische Flussnetzwerke 45
2.3.2 Constraint-basierte Simulationsbausteine 45
2.3.3 System-Dynamics 46
2.3.4 Petri-Netze 47
2.3.5 Agentenbasierte Simulation 51
2.3.6 Differenzierung verschiedener Modellarten 52
2.4 Entwicklungsansätze aus der Praxis und der Forschung 53
2.4.1 Bauablaufsimulationen mit Flussnetzwerken 54
2.4.2 Constraint-basierte Bauablaufsimulationen 55
2.4.3 Bauablaufsimulationen mit System-Dynamics 56
2.4.4 Agentenbasierte Bauablaufsimulationen 57
2.4.5 Bauablaufsimulationen mit Petri-Netzen 59
2.4.6 Weitere modellbasierte Ansätze 61
2.4.7 Ansätze zur digitalen Baufortschrittskontrolle 62
2.4.8 Zwischenbemerkung 64
2.4.9 Digitale Ansätze zur baubetrieblichen Anspruchsbewertung 65
2.5 Forschungslücke 73

3 Baubetriebliche Grundlagen 74
3.1 Bau-Soll 74
3.2 Bauablauf- und Terminplanung 78
3.2.1 Baubetriebliche Aspekte 78
3.2.2 Netzplantechnik 82
3.2.3 Berechnung von Vorgangsdauern 85
3.3 Die Bauzeit als Vertragsbestandteil 86
3.3.1 Bauzeitenplan 86
3.3.2 Termine und Fristen mit dem Schwerpunkt der VOB 88
3.3.3 Detaillierungsgrade von Bauzeitenplänen 91
3.4 Bau-Ist 95
3.4.1 Aspekte der Dokumentation 95
3.4.2 Definition Bauablaufstörung 98
3.5 Hintergründe und Aufgaben baubetrieblicher Gutachten 100

4 Anforderungen an das digitale Nachweisverfahren 104
4.1 Baurechtliche Aspekte gestörter Bauabläufe nach dem BGB 104
4.1.1 Allgemeine Pflichten im Werkvertrag 104
4.1.2 Bauzeitverlängerung und Leistungsstörung 107
4.1.3 Leistungszeit nach § 271 BGB 108
4.1.4 Auslegung der Leistungszeit 109
4.1.5 Anspruch auf Schadensersatz nach §§ 280, 286 BGB 111
4.1.6 Anspruch auf Entschädigung § 642 BGB 114
4.1.7 Vertragsstrafen nach §§ 339 ff. BGB 119
4.1.8 Das neue Bauvertragsrecht 2018 119
4.2 Auftragnehmerseitige Ansprüche nach der VOB/B 122
4.2.1 Fristen-Regelungen der VOB/B 123
4.2.2 Bauablaufstörung, Leistungsverzögerung, Behinderung und Unterbrechung 124
4.2.3 Behinderungsanzeige nach § 6 Abs. 1 VOB/B 128
4.2.4 Fristverlängerungsanspruch nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B 130
4.2.5 Vergütungsansprüche nach § 2 Abs. 3, 5, 6, 8 VOB/B 133
4.2.6 Ansprüche wegen Bauzeitverlängerung nach § 6 Abs. 6 VOB/B 139
4.3 Zusammenfassung – zeitabhängige Ansprüche des Auftragnehmers 140
4.4 Nachweisführung im Bauprozess 142
4.4.1 Allgemeines zum Zivilprozess 142
4.4.2 Grundlagen des Kausalitätsnachweises 145
4.4.3 Kausalitätsnachweis für zeitabhängige Ansprüche 149
4.4.4 Darlegung von Anspruchsgrund und Anspruchshöhe 154
4.4.5 Pufferzeiten 157
4.4.6 Differenzierung komplexer Behinderungssachverhalte 159
4.4.7 Ermittlung maßgeblicher Verzögerungsdauern durch Soll-Ist-Vergleiche 162
4.4.8 Herausforderungen bei der Fortschreibung der Soll-Bauzeit 164
4.4.9 Zwischenfazit 167
4.5 Zusammenfassende Erkenntnisse und Arbeitshypothesen 169
4.5.1 Verständnis von einer „konkreten bauablaufbezogenen Darstellung“ 169
4.5.2 Schwachstellen der Netzplantechnik aus systemtheoretischer Sicht 177
4.5.3 Nachteile einer rein zeitbezogenen Darstellung 180
4.6 Vorüberlegungen zum simulationsbasierten Soll-Ist-Vergleich 188
4.6.1 Anhaltspunkte als Indikatorgrößen zur Fortschreibung 188
4.6.2 Zusammenfassung – Einsatz der Simulation 189

5 Entwurf und Architektur der Entwicklungen 191
5.1 Übersicht des Softwarekonzepts 191
5.1.1 Systemarchitektur 191
5.1.2 Interdisziplinäre Entwurfsansätze 193
5.1.3 Darstellungskonzept 195
5.1.4 Weiterführende Konzepte der Zeitdarstellung 198
5.2 Konzeptionelle Anforderungen eines geeigneten Simulators 201
5.2.1 Vorüberlegungen zu den Produktionsabläufen 201
5.2.2 Anforderungen an ein Geometriemodell für Ausbauarbeiten 203
5.2.3 Leistungsmengen-Normierungskonzept virtueller Bauteilmodelle 204
5.2.4 Erläuterung der digitalen Arbeitsweise mithilfe einer Userstory 211
5.2.5 Konfliktarten 222
5.2.6 Faktorielle Gewichtungen zur Produktivitätsmodifizierung und -bewertung 223
5.2.7 Geometrische Aufwandsverteilung 227
5.2.8 Theoretische Modellierungs- und Modifizierungskonzepte 232
5.2.9 Zusammengefasste Anforderungen an den Simulator 235

6 Technische Umsetzung 237
6.1 Ausgangssituation 237
6.1.1 Gründe zur Wahl eines Petri-Netz-Simulators 237
6.1.2 Technischer Aufbau des entwickelten Petri-Netz-Simulators 238
6.2 Entwicklung des Geometrie- und Prozessmodells 243
6.2.1 Ausgangssituation der prototypischen Umsetzung 243
6.2.2 Struktur des entwickelten Gesamtmodells 244
6.2.3 Geometrische Kollisionsprüfung mit 2D-Polygonen im 3D-Raum 245
6.2.4 Struktur des Gebäudemodells 251
6.2.5 Struktur des Prozessmodells 255
6.3 Erweiterte Ansätze der prototypischen Entwicklung 271
6.3.1 Unterscheidungen und Strukturierungen der Teilnetze 271
6.3.2 Kapazitive Verfügbarkeiten aufgrund des Agentenverhaltens 275
6.3.3 Übersicht spezialisierter Transitionen 280
6.3.4 NetTransition und DateTransition 282
6.3.5 Entwurfsansätze für Modifizier-Transitionen 283
6.3.6 TaskTransition zur linearen Vorgangsberechnung 286
6.3.7 Schneiden simulierter Vorgangsdauern 290

6.3.8 Nichtlineare Ansätze simulierter Vorgangsdauern 295
6.3.9 Fortschreibungsprinzip prozessabhängiger Modifikationen....297
6.3.10 Aufbau der Simulationsschleife (Simulator) 302

7 Studien mit dem prototypisch entwickelten Simulator....304
7.1 Testläufe für simulierte Soll(0)-Bauablaufmodelle 304
7.1.1 Datenaustausch und Vorstellung des Szenarios....304
7.1.2 Genauigkeit des Simulationsansatzes gegenüber einer Handrechnung 307
7.1.3 Evaluierung der geometrischen Gewichtung 309
7.1.4 Modellierung eines zusätzlichen Vorgangs 312
7.1.5 Simulation nebenläufiger Produktionsabläufe zur Plausibilisierung 315
7.1.6 Modellierung zulässiger Arbeitskräfte in den Produktionsstätten 319
7.1.7 Modellierung mehrerer Teilvorgänge und gesteuerte Arbeitsgruppen 325
7.1.8 Leistungsdiskrete und termindiskrete Modellierungen....328
7.1.9 Zwischenfazit simulierter Soll(0)-Bauablaufmodelle....331
7.2 Testläufe zur Modifizierung möglicher Ist-Bauablaufmodelle 332
7.2.1 Modifizierung termindiskreter Hemmungen und Beschleunigungen....332
7.2.2 Modifizierung infolge modellierter Störflächen 333
7.2.3 Systeminternes Störungsprotokoll 335
7.2.4 Modifizierung blockierter Raumflächen....335
7.2.5 Simulationsläufe parallel arbeitender Ausbaugewerke....337
7.2.6 Simulation von Trockenbauarbeiten 340
7.2.7 Zwischenfazit zur Simulation modifizierter Ist-Bauablaufmodelle....341
7.3 Verifizierung und Validierung des Simulationsansatzes 341
7.3.1 Softwaretests während der Entwicklungsarbeiten 341
7.3.2 Testläufe durch Testpersonen 343

8 Soll-zu-Ist-Modifikation (baubetriebliches Nachweisverfahren) 347
8.1 Aufgaben und Einordnung....347
8.1.1 Anwendungsgrundsätze 347
8.1.2 Abgrenzung der Einsatzgebiete 348
8.2 Durchführung der Soll-zu-Ist-Modifikation 349
8.2.1 Übersicht....349
8.2.2 Rekonstruktion und Prüfung des Soll(0)-Bauablaufs 350
8.2.3 Ausgangssituation zur Bauzeitanalyse....352

8.2.4 Fortschreibungsprinzip....357
8.2.5 Inhalt einer momentanen Einzelfallbetrachtung....363
8.2.6 Zeitmessungen durch Zeitvektoren....366
8.2.7 Prüfung von Fristverlängerungsansprüchen....371
8.2.8 Konstellationen zur Differenzierung der Zeitanteile inkl. der Ansprüche....375
8.3 Verifizierung und Validierung der Bauablaufmodelle....380
8.3.1 Ausgangssituation....380
8.3.2 Plausibilität und Nichtplausibilität....381
8.3.3 Machbarkeit und Nichtmachbarkeit....382
8.3.4 Konzeptioneller Entwurf zur Durchführung des Benchmarkings....382
8.3.5 Diskussion – Herausforderungen des Benchmarkings....384
8.4 Konzeptioneller Entwurf zur Zeitmessung monetärer Ansprüche....386
8.5 Vorläufige Untersuchungsergebnisse....389

9 Resümee....397
9.1 Fazit....397
9.2 Weiterer Forschungsbedarf....399

Literaturverzeichnis....402
Judikaturverzeichnis....417

Anhang....419
A.1 Fallbeispiel nach *Roquette et al*. (Fall 3)....420
A.2 Fallbeispiel nach *Roquette et al*. (Fall 4)....422
A.3 Fallbeispiel nach *Roquette et al*. (Fall 5)....423
A.4 Fallbeispiel nach *Roquette et al*. (Fall 6)....425
A.5 Fallbeispiel nach *Lang/Rasch*....427

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1:

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit 7

Kapitel 2:

Abbildung 2-1: Gliederung der Teile von Systemen (ohne Struktur) 13
Abbildung 2-2: Verteilter Informationsfluss im Inneren eines offenen Systems 15
Abbildung 2-3: Die Grenzen und die Umwelt von Systemen (mit Struktur) 16
Abbildung 2-4: Erwartungswert beim Würfeln (4 Versuchsreihen mit je 250 Würfen) 19
Abbildung 2-5: Modifizierte Ordnung (Verdoppelung der Augenzahl beim 1000. Wurf) 20
Abbildung 2-6: Annäherung an ein Ziel durch Modifizierungen der Faktoren 20
Abbildung 2-7: Systemstrukturen durch Interaktions- und Kombinationsbeziehungen 22
Abbildung 2-8: Systemtheoretische Beschreibung eines kausalen Zusammenhangs 23
Abbildung 2-9: Grafische Darstellung der Produktivität 25
Abbildung 2-10: Qualitative Entwicklung des Systemzustands infolge einer Störung 28
Abbildung 2-11: Qualitative Darstellung zur Entgegenwirkung einer Störung durch Lenkung 29
Abbildung 2-12: Klassische Dreiteilung von Bauprojekten 31
Abbildung 2-13: Ablaufabschnitte nach REFA – Modernisierung einer Wohneinheit 33
Abbildung 2-14: Beispiel eines BIM-Modells als vernetzter Datenspeicher 35
Abbildung 2-15: Modellarten für die Einsortierung der Simulationsmethoden 38
Abbildung 2-16: Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie nach *Rabe et al.* 41
Abbildung 2-17: Elemente des Petri-Netzes 47
Abbildung 2-18: Ausschnitt aus einem Petri-Netz bei einer Schaltsituation 48
Abbildung 2-19: Ablaufskizze eines Petri-Netzes bzw. Marked Graphen 50
Abbildung 2-20: Übersicht verschiedener Modellarten 53

Kapitel 3:

Abbildung 3-1: Mögliche Fertigungsrichtung für Ausbauarbeiten in Gebäudeansicht 80
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines vernetzten Balkenplans 81
Abbildung 3-3: Anordnungsbeziehungen dargestellt als Vorgangsbalken 83
Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung des kritischen Wegs....83
Abbildung 3-5: Unterscheidung der Pufferzeiten in verschiedenen Zeitlagen 84
Abbildung 3-6: Illustration der Auslegungsregeln für Fristen gem. §§ 187, 188 BGB 89
Abbildung 3-7: Potentielle Bauzeitenpläne (nach Anlage 10 HOAI) 94

Kapitel 4:

Abbildung 4-1: Grafische Darstellung eines Schuldverhältnisses 106
Abbildung 4-2: Gegenseitigkeitsverhältnis werkvertragstypischer Hauptleistungspflichten 107
Abbildung 4-3: Schadensersatzansprüche infolge eines Schuldnerverzugs....114
Abbildung 4-4: Prinzip des Entschädigungsanspruchs infolge eines Annahmeverzugs 118
Abbildung 4-5: Klassifizierung der Risikobereiche i. A. a. *Lang/Rasch.* 126
Abbildung 4-6: Bauablaufstörung, Leistungsverzögerung und Behinderung....128
Abbildung 4-7: Adäquate haftungsbegründende und haftungsausfüllende Kausalität ...147
Abbildung 4-8: Zeitliche Verteilung konkreter Informationen mit Anhaltspunkten....170
Abbildung 4-9: Abstrakte Skizze einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung....173
Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der Zeitzustände zwischen Netzplantechnik und Simulation....178
Abbildung 4-11: Fehlende Referenzzustände während einer Vorgangsdauer 181
Abbildung 4-12: Veranschaulichung der Sprungfolge....183
Abbildung 4-13: Überlappende Abhängigkeiten zwischen zwei Vorgängen 183
Abbildung 4-14: Überlappende Abhängigkeiten infolge einer Behinderung....186
Abbildung 4-15: „Unsichtbare“ Wirkungen in Vorgangsbalken und Folgewirkungen 187

Kapitel 5:

Abbildung 5-1: Übersicht der Systemarchitektur(en) 192
Abbildung 5-2: Screenshot einer kommerziellen DAW mit ihren Sequenzern 193
Abbildung 5-3: Zeitdarstellung durch produktionsbasierte Vorgangsintervalle 196
Abbildung 5-4: Differenzierung der Informationen mithilfe von Containern 197
Abbildung 5-5: Gegenüberstellung – Anordnungsbeziehungen mit einem farbigen Schema 198
Abbildung 5-6: Beispiel eines skalierten Grundrisses von einem BIM-Gebäudemodell 206
Abbildung 5-7: Beispiel für die topologische Verteilung externer Mengen 208
Abbildung 5-8: Beispiel für die topologische Verteilung der Teilleistungen mit normierten Mengen 209
Abbildung 5-9: 2D-Skizze zur Darstellung der Arbeitsbereiche im Wegenetz 211
Abbildung 5-10: Ausschnitt des Wegenetzes innerhalb eines 3D-Gebäudemodells 212
Abbildung 5-11: Perspektive zur Darstellung des Wegenetzes in einem 3D-Gebäudemodell 212
Abbildung 5-12: Versinnbildlichung der Mengen- und Prozesszuweisungen je Arbeitsbereich 213
Abbildung 5-13: Mengen- und Prozesszuweisungen im BIM-Gebäudemodell 213
Abbildung 5-14: Definition der Agenten als Arbeitskräfte von zwei Arbeiterkolonnen 214
Abbildung 5-15: Beispielhafte Fertigungsrichtung der Arbeiterkolonne A 215
Abbildung 5-16: Beispielhafte Fertigungsrichtung der Arbeiterkolonne B 215
Abbildung 5-17: Überlagerung zweier Fertigungsrichtungen von zwei Arbeiterkolonnen 215
Abbildung 5-18: Aufteilung der Arbeiterkolonnen 216
Abbildung 5-19: Nadelstichartige Einarbeitung von Bauablaufstörungen 217
Abbildung 5-20: Störfläche für nicht abgeschlossene Elektroarbeiten im BIM-Gebäudemodell 218
Abbildung 5-21: Nadelstichartige Einarbeitung von Bauablaufstörungen im BIM-Gebäudemodell 219
Abbildung 5-22: Schematische Darstellung einer Steh- und Arbeitsfläche 219

Abbildung 5-23: Ausschnitte aus dem BIM-Gebäudemodell der Steh- und Arbeitsflächen 220

Abbildung 5-24: Geometrischer Konflikt – belegte Steh- und Arbeitsflächen durch Kolonne A....220

Abbildung 5-25: Geometrischer Konflikt – Ausweichverhalten der Arbeitskräfte aus Kolonne B....221

Abbildung 5-26: Gezielte Entnahme einer bestimmten Arbeitskraft aus Kolonne A....221

Abbildung 5-27: Aufrücken der Arbeitskräfte aus Kolonne B nach Entnahme der Arbeitskraft 222

Abbildung 5-28: Illustration einer Situation während eines Simulationslaufs für Malerarbeiten 225

Abbildung 5-29: Ausschnitt für eine geometrische Aufwandsverteilung von Bodenbelagsarbeiten 228

Abbildung 5-30: Klasse Bauteil zum Pseudocode 5-1 230

Abbildung 5-31: Gegenüberstellung der Modifikationsarten mit einem Balkenplan 232

Abbildung 5-32: Veranschaulichung der sechs Modifikationsarten 233

Kapitel 6:

Abbildung 6-1: Klassendiagramm vom entwickelten Petri-Netz-Modell....238

Abbildung 6-2: Konstruktion der Wirkungsbeziehungen des entwickelten Petri-Netzes....239

Abbildung 6-3: Aufbaustruktur eines beispielhaften Petri-Netz-Modells....239

Abbildung 6-4: Schematische Darstellung nebenläufig schaltender Transitionen....240

Abbildung 6-5: Klassendiagramm A – Grobe Gliederung des simulationsfähigen Gesamtmodells....245

Abbildung 6-6: Klassendiagramm B – Klassen zur Durchführung der Kollisionsprüfungen....245

Abbildung 6-7: Skizze zur UV-Abbildung mit zwei Polygonflächen im 3D-Raum....246

Abbildung 6-8: Beispielhafte Darstellungen der Triangulation mithilfe der UV-Abbildung....250

Abbildung 6-9: Klassendiagramm C – Grundbestandteile des Gebäudemodells 251

Abbildung 6-10: Klassendiagramm D – Grundbestandteile des Wegenetzes....253

Abbildung 6-11: Kollisionsprüfungen des Wegenetzes 254

Abbildung 6-12: Schematische Darstellung des Wegenetzes mit einem WorkingField 254
Abbildung 6-13: Klassendiagramm E – Grundbestandteile des Prozessmodells 256
Abbildung 6-14: Skizze einer möglichen Aufbaustruktur des Prozessmodells 257
Abbildung 6-15: Entwickelte Klasse ProcessEvent zur zweiteiligen Terminorganisation 258
Abbildung 6-16: Beispielhafte Projektstruktur mit den Startbedingungen aus der Aufbaustruktur 259
Abbildung 6-17: Konzeptionelle Eingabemasken 260
Abbildung 6-18: Mögliche Abhängigkeiten der Aufbau- und Ablaufstruktur 262
Abbildung 6-19: Klassendiagramm F – Grundbestandteile einer Arbeitsaufgabe (Task) 263
Abbildung 6-20: Klassendiagramm G – Grundbestandteile einer Kolonne (Band) 265
Abbildung 6-21: Klassendiagramm H – Grundbestandteile für gestörte Objekte 267
Abbildung 6-22: Beispiel für Flächenzuweisungen geometrischer Konfliktprüfungen 268
Abbildung 6-23: Klassendiagramm der entwickelten Petri-Netz-Struktur 271
Abbildung 6-24: Zweiteilung in ein processBranchNet und in ein timerBranchNet 273
Abbildung 6-25: Mögliche Ausgangssituation der Aufbaustruktur in Teilnetze 274
Abbildung 6-26: Standardnormalverteilung für Arbeitsgruppeneinteilungen 277
Abbildung 6-27: Aktivitätsdiagramm für kapazitive Verfügbarkeitsprüfungen 280
Abbildung 6-28: Überblick verschiedener Transitionen 281
Abbildung 6-29: Schaltlogik zeitabhängiger Modifikationen im timerBranchNet 284
Abbildung 6-30: Prinzip des Schneidens von einer errechneten Vorgangsdauer 292
Abbildung 6-31: Fortschreibungsprinzip infolge des Schneidens 294
Abbildung 6-32: Leistungsfortschritt geschnittener Vorgangsintervalle 296
Abbildung 6-33: GermCell-Verschiebung aufgrund fortgeschriebener Berechnungsfunktionen 297
Abbildung 6-34: Prinzip prozentualer Abhängigkeitsbeziehungen (TaskTransition als GermCell) 299

Abbildung 6-35: Prinzip prozentualer Abhängigkeitsbeziehungen (Teilnetz als GermCell).....300

Abbildung 6-36: Fortschreibungsprinzip einer GermCell für prozessabhängige Modifikationen 301

Kapitel 7:

Abbildung 7-1: Entwurf und Datenaustausch des BIM-Gebäudemodells 304

Abbildung 7-2: Wegenetz des entworfenen BIM-Gebäudemodells 305

Abbildung 7-3: Darstellung des Gebäudes mit Fertigungsrichtung der Malerarbeiten 307

Abbildung 7-4: Gegenüberstellung manueller und simulierter Berechnungen je Arbeitsbereich.....308

Abbildung 7-5: Übersicht der geometrischen Gewichtung am Bauablaufmodell D 311

Abbildung 7-6: Detail der geometrischen Gewichtung am Bauablaufmodell D 311

Abbildung 7-7: Geometrische Gewichtung an den Bauablaufmodellen A-D.....312

Abbildung 7-8: Nachträgliche Modellierung des Gerüstaufbaus in den Bauablaufmodellen A-D 313

Abbildung 7-9: Beschleunigung wegen der nachträglichen Modellierung des Gerüstaufbaus 314

Abbildung 7-10: Zeitliche Abweichungen infolge des Gerüstaufbaus am Bauablaufmodell A 314

Abbildung 7-11: Berücksichtigung paralleler Ausführungen beim Bauablaufmodell A 316

Abbildung 7-12: Serielle und parallele Ausführungen des Bauablaufmodells A 317

Abbildung 7-13: Gegenüberstellung serieller und paralleler Ausführungen im Darstellungskonzept 318

Abbildung 7-14: 4D-Visualisierung während der Arbeiten in den kleinen Räumen.....320

Abbildung 7-15: 4D-Visualisierung nach Fertigstellung der Arbeiten in den kleinen Räumen.....321

Abbildung 7-16: Simulationslauf mit maximal einer Arbeitskraft in den kleinen Räumen.....322

Abbildung 7-17: Zugriff über das Darstellungskonzept auf die Simulationsergebnisdaten 323

Abbildung 7-18: Plausibilisiertes Bauablaufmodell A mit Leistungsfunktion 324
Abbildung 7-19: Simulierte Malerarbeiten ohne priorisierte Prozessabfolgen.....326
Abbildung 7-20: Simulierte Malerarbeiten mit priorisierten Prozessabfolgen 328
Abbildung 7-21: Simulierte Malerarbeiten mit Trocknungsvorgängen 329
Abbildung 7-22: Simulierte Malerarbeiten mit zeitversetzten Teilvorgängen.....330
Abbildung 7-23: Simulierte Malerarbeiten mit termindiskreten Aufwandsänderungen.....332
Abbildung 7-24: Screenshot zur Modellierung einer Störfläche in Raum R05 als Lagerplatz.....334
Abbildung 7-25: Screenshot vom systeminternen Protokoll.....335
Abbildung 7-26: Screenshot der Simulationsergebnisse mit gestörten Raumflächen 336
Abbildung 7-27: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (A) 338
Abbildung 7-28: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (B).....339
Abbildung 7-29: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (C).....339
Abbildung 7-30: Raumflächen zur Simulation von Trockenbauarbeiten einer Leichtbauwand.....340

Kapitel 8:

Abbildung 8-1: Qualitative Darstellung der Rekonstruktion eines Soll(0)-Bauablaufs.....351
Abbildung 8-2: Qualitativ zusammengefasste Untersuchungsfälle in Gruppenintervallen 353
Abbildung 8-3: Prinzip der referenzierenden Marker 355
Abbildung 8-4: Prinzip einer einzelnen Stützstellenverifizierung 357
Abbildung 8-5: Gegenüberstellung der Ist-Anhaltspunkte mit dem Soll(0)-Bauablaufmodell 358
Abbildung 8-6: Einarbeitung der Marker in das Soll(0)-Bauablaufmodell 358
Abbildung 8-7: Prinzip der Soll-zu-Ist-Modifikation anhand der Stützstellenverifizierungen.....360
Abbildung 8-8: Gegenüberstellung zweier Modellversionen zur Messung der Zeitwirkung 362

Abbildung 8-9: Konzeptionelle Darstellung einer Einzelfallbetrachtung 363
Abbildung 8-10: Beispielhafte Darstellung eines resultierenden Zeitvektors.....368
Abbildung 8-11: Probe der Gesamtbauzeitverlängerung mithilfe von Zeitvektoren 369
Abbildung 8-12: Beispiel – Ausgangssituation zur Messung von Fristverlängerungsansprüchen 371
Abbildung 8-13: Bewertung von Fristverlängerungsansprüchen mit der Soll-zu-Ist-Modifikation.....373
Abbildung 8-14: Konstellation 1 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins.....376
Abbildung 8-15: Konstellation 2 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins.....377
Abbildung 8-16: Konstellation 3 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins.....378
Abbildung 8-17: Konstellation 4 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins.....379
Abbildung 8-18: Herleitung des Aufbauschemas aus den Zeitvektoren des Gruppenintervalls 387
Abbildung 8-19: Skizze des Veränderungsprotokolls.....388

Anhang:

Abbildung A-1: Fallbeispiel nach *Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 672* 421
Abbildung A-2: Fallbeispiel nach *Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 673* 422
Abbildung A-3: Fallbeispiel nach *Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 675* 424
Abbildung A-4: Fallbeispiel nach *Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 676* 426
Abbildung A-5: Fallbeispiel nach *Lang/Rasch in Vygen/Joussen/Lang/Rasch, Rdn. 163, S. 631* 428

Tabellenverzeichnis

Kapitel 2:

Tabelle 2-1: Ordnungsdefinitionen 18
Tabelle 2-2: Übersicht möglicher Gewerkegruppen für Büro- und Verwaltungsgebäude 32
Tabelle 2-3: Kriterien für die Verifizierung und Validierung im Zuge einer Simulationsstudie 44
Tabelle 2-4: Verhaltenseigenschaften von Agenten nach *Klügl* 52
Tabelle 2-5: Digitale Bauzeitanalysen der internationalen und nationalen Fachliteratur 73

Kapitel 3:

Tabelle 3-1: Fragestellungen für die Dokumentation des Ist-Bauablaufs 96
Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Störungstypen nach *Roquette et al.* 100

Kapitel 4:

Tabelle 4-1: Notwendige Informationen einer Behinderungsanzeige nach *Lang/Rasch.* 130
Tabelle 4-2: Kausalitätsformen des Haftungs- und des Schadensrechts für gestörte Bauabläufe 161

Kapitel 5:

Tabelle 5-1: Beispielhafte Szenarien zur interaktiven Gestaltung der Vorgangsintervalle 200
Tabelle 5-2: Clusterprinzip der geometrischen Aufwandsverteilung 229

Kapitel 6:

Tabelle 6-1: Messung von Zeitkollisionen mithilfe der Klasse ProcessEvent 258
Tabelle 6-2: Flächenzuweisungen geometrischer Konfliktprüfungen 268
Tabelle 6-3: Blockier-Funktionen der Klasse Blocker 269

Kapitel 7:

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse 309
Tabelle 7-2: Gewählte geometrische Gewichtungen.....310
Tabelle 7-3: Zeitliche Abweichungen infolge des zusätzlichen Vorgangs 315
Tabelle 7-4: Vorgenommene Priorisierung der Arbeitskräfte und die dazugehörigen Prozesse 327

Kapitel 8:

Tabelle 8-1: Gegenüberstellung eines Soll-Bauablaufs in unterschiedlichen Intervallebenen.....354
Tabelle 8-2: Zeitvektorielle Darstellung einer Verzögerung und Beschleunigung 367
Tabelle 8-3: Darstellung von betragslosen Zeitvektoren.....368
Tabelle 8-4: Kommentierung der Soll-zu-Ist-Modifikation i. A. a. Kriterien von *Tiesler* 391

Pseudocodeverzeichnis

Kapitel 5:

Pseudocode 5-1: Entwurf der geometrischen Aufwandsverteilung 230

Kapitel 6:

Pseudocode 6-1: Aufbau der Schaltfunktion
switchTransition() einer Transition.....241

Pseudocode 6-2: Standardmäßiger Aufbau der Übergangsfunktion
calculate() einer Transition 242

Pseudocode 6-3: Ermittlung des spätesten Termins
mit der Funktion findLastDateInToken().....242

Pseudocode 6-4: Einfache Simulationsschleife
für die Ausführung des Petri-Netz-Modells.....243

Pseudocode 6-5: Ermittlung der U- und V-Koordinatenachsen
relativer 2D-Ebenen im 3D-Raum 247

Pseudocode 6-6: Umrechnung eines 3D-Punkts
auf eine relative 2D-Ebene im 3D-Raum.....248

Pseudocode 6-7: Prüfung, ob sich ein beliebiger 3D-Punkt
auf der relativen 2D-Ebene befindet 248

Pseudocode 6-8: Umrechnung eines 2D-Punkts als 3D-Punkt
anhand der 2D-Ebene.....249

Pseudocode 6-9: Funktion calculate() der Klasse DateTransition.....282

Pseudocode 6-10: Funktion addDate(ti: LocalDateTime, ob: Object)
der Klasse SimplePetriNet 283

Pseudocode 6-11: Funktion calculate()
der Klasse CapacityWorkingTimeTransition.....285

Pseudocode 6-12a: Funktion calculate() der Klasse TaskTransition 288

Pseudocode 6-12b: Funktion calculate() der Klasse TaskTransition 289

Pseudocode 6-13: Funktion cut(ti: LocalDateTime)
der Klasse TaskTransition.....290

Pseudocode 6-14: Funktion proofGermCells() der Klasse TaskTransition.....298

Pseudocode 6-15a: Erweiterte Simulationsschleife 302

Pseudocode 6-15b: Erweiterte Simulationsschleife 303

Abkürzungsverzeichnis

2D zweidimensional
3D dreidimensional
4D vierdimensional
5D fünfdimensional
Abs. Absatz
AG Auftraggeber
AGB Allgemeine Geschäftsbedingungen
AGK Allgemeine Geschäftskosten
AK Arbeitskraft/-kräfte
Az. Aktenzeichen
AN Auftragnehmer
API Application Programming Interface (Applikationsschnittstelle)
ARH Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau
ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation
ATV Allgemeine Technische Vertragsbedingungen
BauR Baurecht (Zeitschrift)
BauW Bauwirtschaft (Zeitschrift)
Bd. Band
BeckOGK Beck´scher Online-Groß-Kommentar
BeckOK Beck´scher Online-Kommentar
BeckOK-VOB/B Beck´scher Online-Kommentar zur VOB/B
BeckRS Beck Online Rechtsprechung (Zeitschrift)
BGB Bürgerliches Gesetzbuch
BGH Bundesgerichtshof
BGK Baustellengemeinkosten
BIM Building Information Modeling
BPMN Business Process Model and Notation
bzw. beziehungsweise
ca. circa
CAD Computer Aided Design
CPM Critical Path Method
CYCLONE Cyclic Operation Network
C# C-Sharp (Programmiersprache)
DAW Digital Audio Workstation
d. h. das heißt
DIN Deutsches Institut für Normung
Drs. Drucksache
DS Der Sachverständige (Zeitschrift)
DStR Deutsches Steuerrecht
DT Deutscher Bundestag
EG Erdgeschoss
EKT Einzelkosten der Teilleistungen
EPK Ereignisgesteuerte Prozesskette
et al. et alia
etc. et cetera
EU Europäische Union
f. folgend
ff. fortfolgend
Fn. Fußnote
gem. gemäß
GesamtHrsg. Gesamtherausgeber
ggf. gegebenenfalls
GPS Global Positioning System
h (Arbeits- oder Zeit-)Stunde
HK-BGB Handkommentar – Bürgerliches Gesetzbuch
HK-ZPO Handkommentar – Zivilprozessordnung
HOAI Honorarordnung für Architekten und Ingenieure

Hrsg.	Herausgeber
i. A. a.	in Anlehnung an
IBR	Immobilien- & Baurecht (Zeitschrift)
IBRRS	Immobilien- & Baurecht Rechtsprechung (Zeitschrift)
i. d. R.	in der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission
IFC	Industry Foundation Classes
inkl.	inklusive
ISO	International Organization for Standardization
i. S. d.	Im Sinne des/der
i. S. v.	im Sinne von
i. V. m.	in Verbindung mit
JTS	Java Topology Suite
KG	Kammergericht
Komm.	Kommentar
LG	Landgericht
LKW	Lastkraftwagen
LOD	level of development/detail
LOI	level of information
LPH	Leistungsphase
LV	Leistungsverzeichnis
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MCE	Management-Consulting-Engineering
mdb	Microsoft-Database
Min.	Minute
MPM	Metra Potential Method
MS	MicroSoft
MüKoBGB	Münchner Kommentar Bürgerliches Gesetzbuch
MüKoZPO	Münchner Kommentar Zivilprozessordnung
nD	n-Dimensional (n = unbegrenzt)
NJ	Neue Justiz (Zeitschrift)
NJW	Neue Juristische Wochenschrift (Zeitschrift)
NK-BGB	Nomos-Kommentar – Bürgerliches Gesetzbuch
Nr.	Nummer
NZBau	Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht
o. Ä.	oder Ähnliches
OLG	Oberlandesgericht
OSim	Objekt Simulator
PERT	Program Evaluation and Review Technique
Pos.	Position
PPM	Project Portfolio Management (-Software)
Red.	Redakteur
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung
resp.	respektiv
Rdn.	Randnummer
RFID	Radio-Frequency Identification
S.	Seite
SIMPHONY	Simulation framework for multiscale phenomena in micro- and nanosystems
SIMoFIT	Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering
St.	Stand

STS	Simulation Toolkit Shipbuilding
Stk	Stück
sog.	sogenannte/s/r/n/m
TL	Teilleistung
u. a.	*unter anderem*
UML	*Unified Modeling Language*
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
u. v. m.	und vieles mehr
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vgl./vgl.	Vergleiche
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
Vol.	Volume
Vorbem.	Vorbemerkung
V & V	Verifizierung und Validierung
WuG	Wagnis und Gewinn
XML	Extensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
ZfBR	Zeitschrift für Baurecht
ZPO	Zivilprozessordnung
z. T.	zum Teil
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
§	Paragraf
§§	Paragrafen

„*Das Leben kann nur in der Schau nach rückwärts verstanden,*
aber nur in der Schau nach vorwärts gelebt werden."

Søren Kierkegaard (* 1813; † 1855)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Obwohl häufig klar ist, dass eine Bauablaufstörung stattfand, ist oft unklar, welche Partei die daraus resultierenden Mehrkosten tragen muss. Aufgrund der schnelllebigen und komplexen Bauabläufe können viele Faktoren zu gegensätzlichen Ansichten zwischen Vertragspartnern führen. Sobald sie sich nicht außergerichtlich einigen können – was jedoch hinsichtlich der zu erwartenden Verfahrenskosten immer empfehlenswert ist –, kommt es naheliegenderweise zum Rechtsstreit.

Gerichtliche Auseinandersetzungen sind zwar nicht die Regel, aber auch keine Seltenheit. Statistiken verdeutlichen, dass der Nachweis einer vertraglichen Verantwortung wegen Bauablaufstörungen die wahrscheinlichste Ursache für Streitigkeiten bei Bauvorhaben ist. *Zimmermann und Hamann* äußerten bspw. im Jahr 2009, dass immer mehr Streitfälle in Bausachen vor deutschen Gerichten stattfinden.[1] *Sundermeier* erkannte zu dieser Zeit: „*Die Belastung der staatlichen Gerichtsbarkeit durch Rechtsstreitigkeiten bei der Realisierung von Bauvorhaben hat in der Vergangenheit stetig zugenommen*."[2] Eine bemerkenswerte empirische Umfrage in Deutschland ergab, „[…] *dass rund 94 % der Auftraggeber und etwa 95 % der Auftragnehmer von Bauleistungen in den vergangenen zehn Jahren Erfahrungen als Streitpartei in einem Klageverfahren gesammelt haben*."[3] *Leupertz* bezeichnet die Gerichtsverhandlungen in Bausachen als „zeitaufwändig" und „schwerfällig".[4] So fügt er hinzu: „[…] *zwischen der Entstehung eines bauvertraglichen Streits und seiner gerichtlichen Bescheidung* [liegen] *oft Jahre, bei größeren Prozessen über mehrere Instanzen, nicht selten sogar eine Dekade und mehr*."[5]

Inzwischen ist die Anzahl der Rechtsstreitigkeiten leicht rückläufig.[6] Dennoch fanden im Jahr 2016 allein in *erster Instanz* vor den Amts- und Landgerichten insgesamt *38.480 erledigte Zivilverfahren* in Bau- und Architektensachen (ohne Architektenhonorarstreitigkeiten) statt.[7] Daneben wurden noch *4.093 Verfahren* vor den Oberlandesgerichten in Berufungssachen entschieden.[8] Zwar sind nicht alle Zivilprozesse auf Bauzeitverzögerungen zurückzuführen, doch *Haghsheno* hat in einer Umfrage gezeigt, dass sich die meisten Konfliktpotentiale aus zeitbezogenen Streitthemen ergeben.[9] Zu einem tendenziell vergleichbaren Ergebnis kamen *Böhmer et al*., die *1.344 baurechtliche Mandanten* in den Jahren 2014/15 befragten.[10] Eindrücke möglicher Entstehungsgründe liefern *Malkwitz et al*. in Form einer Studie zu Großbauprojekten, bei der etwa *91 %* der Befragten angaben, dass sich Nachträge aufgrund

[1] Vgl. Zimmermann/Hamann, 2009: S. 10.
[2] Sundermeier, 2009: S. 25.
[3] Sundermeier, 2009: S. 21.
[4] Vgl. Leupertz, DS 2013: 297.
[5] Leupertz, DS 2013: 297.
[6] Die Studie basiert auf Daten des Statistischen Bundesamts. Das Ergebnis der Auswertung kann unter *Gnerlich* eingesehen werden. Vgl. Gnerlich, 2017: S. 83-84.
[7] Vgl. Statistisches Bundesamt, 10/2.1, Jahrgang 2016: S. 18, 48.
[8] Vgl. Statistisches Bundesamt, 10/2.1, Jahrgang 2016: S. 94.
[9] Vgl. Haghsheno, 2004: S. 130-134.
[10] Vgl. Böhmer/Simon/Helmbrecht, 2016: S. 8, 10.

eines ungenau definierten Bau-Solls einstellen.[11] *84 %* der Befragten nannten u. a. den Eintritt von Bauablaufstörungen wegen verspäteten Beauftragungen von Nachunternehmen.[12] Laut *Weber und Helmus* sind diese beiden Aspekte die am häufigsten genannten Gründe von Nachunternehmern für Streitigkeiten bei der Nachtragsstellung.[13] Insgesamt schätzen Experten, dass allein vor den deutschen Gerichten um einen jährlichen Schaden von bis zu fünf Milliarden Euro gestritten wird.[14] Die genannten Umstände haben sicherlich dazu beigetragen, dass im Zuge der Bauvertragsrechtsreform im Jahr 2018 eine umfassende Baubeschreibungspflicht im neuen Bauvertrag vorgesehen wird, die u. a. verbindliche Regelungen zur Bauzeit enthält.[15]

Generell ist zwischen rechtlichen Aspekten zu differenzieren, um Rechtsklarheit zu schaffen. Dazu sollten strittige Sachverhalte verständlich und nachvollziehbar ausgearbeitet werden. Aufgrund dessen geben entweder die Parteien und/oder die Gerichte baubetriebliche Gutachten in Auftrag.

In Deutschland wird kaum noch ein Großbauprojekt ohne Gutachten mit Forderungen aus Bauablaufstörungen abgewickelt.[16] Daher sind sie aus der derzeitigen Projektabwicklungspraxis nicht mehr wegzudenken.[17] Zumeist sollen baubetriebliche Gutachten spezielle, unvorhergesehene Komplexfragen aus der Sicht des Auftragnehmers klären. Herausforderungen bestehen darin, die Komplexitäten nicht nur in Sachverhaltsdarstellungen der geplanten Soll- und tatsächlich ausgeführten Ist-Bauabläufe wiederzufinden, sondern auch in der Aufgabenstellung diese bauablaufbezogen gegenüberzustellen und daraus die entstandenen Mehrkosten logisch abzuleiten. In der Regel verzichten Auftragnehmer auf kostspielige Privatgutachten, mit dem Ergebnis, dass sie oft erst nach Abschluss des Bauvorhabens oder nach Fertigstellung eines Großteils der vertraglichen Leistung dann doch hinzugezogen werden.[18] Möglicherweise sind dadurch Informationen aus verfügbaren Dokumenten bereits überholt, widersprüchlich, unvollständig oder durcheinander. *Zeiß* schreibt in diesem Zusammenhang gar von einer „in Kilogramm zu messenden Papierflut", die es abzuarbeiten gilt.[19] Derartige Voraussetzungen erschweren die Erstellung vieler Gutachten. Die schlüssige Darlegung eines berechtigten Anspruchs erfordert oft eine sehr umfangreiche Analysearbeit.

Obwohl die Gerichte Einzelfallbetrachtungen vornehmen und entsprechende Entscheidungen treffen, begegnen sie baubetrieblichen Gutachten mit Vorsicht.[20] In den letzten Jahren sammelte sich aus Urteilen der Rechtsprechung und Beiträgen der Fachliteratur eine Fülle von Anforderungen zur Nachweisführung und Glaubhaftmachung berechtigter Ansprüche aus gestörten Bauabläufen an, die nun kaum noch erfüllbar erscheinen – insbesondere betrifft dies

[11] Vgl. Malkwitz/Aghazadeh/Bartholomé/Kleinen/Körbel, 2017: S. 8. In der Studie wurden *389 Teilnehmer* befragt. Als Großbauprojekt bezeichnen sie alle Bauprojekte ab einem *Projektvolumen* von einschließlich *50 Millionen* Euro. Vgl. Malkwitz/Aghazadeh/Bartholomé/Kleinen/Körbel, 2017: S. 1.
[12] Vgl. Malkwitz/Aghazadeh/Bartholomé/Kleinen/Körbel, 2017: S. 10.
[13] Vgl. Weber/Helmus, 2006: S. 36.
[14] Vgl. Biel, St. 26.01.2015.
[15] Vgl. Deutscher Bundestag, BT-Drs. 18/11437: S. 1.
[16] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 401.
[17] Vgl. Eschenbruch/Gerstberger, BauW 2018: 45.
[18] Vgl. Tiesler, 2018: S. 140.
[19] Vgl. Zeiß, 2009: S. 3.
[20] Vgl. Eschenbruch/Gerstberger, BauW 2018: 45.

auftragnehmerseitige Forderungen.[21] Diese Anforderungen greift die Rechtsprechung regelmäßig auf und benennt nicht selten neue Kriterien, die durch die baubetrieblichen Gutachten hätten erbracht werden sollen. *Tiesler* berichtet über einen Fall, bei dem sich von ursprünglichen *2,3 Millionen Euro*, im Verlauf von *8 Jahren*, lediglich *60.000 Euro* vor Gericht einklagen ließen.[22] Weiteren Schätzungen zufolge werden den Auftragnehmern lediglich *10* bis *30 %* der beanspruchten Kosten erstattet.[23]

Neben der Entwicklung in der Rechtsprechung schreitet ebenso die Digitalisierung zügig voran. Immer leistungsfähigere digitale Geräte sind in zunehmender Vielfalt und Schnelllebigkeit miteinander vernetzt und erzeugen riesige Datenmengen (Stichwort: *Big-Data*).[24] Nach einer Schätzung von *Haroon et al*. sind bis zum Jahr 2020 weltweit rund *501 Milliarden* Geräte/Gegenstände digital vernetzt, die entweder Daten erzeugen oder auswerten.[25] Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass die Informationen der Daten evtl. fehlerhaft sind, weshalb computergestützte Plausibilitätsanalysen von Forschern als sinnvoll erachtet werden.[26]

Die Digitalisierung macht auch vor dem Bauwesen nicht Halt. Mittlerweile kommen u. a. Modellierungssoftware, digitale Bautagebücher oder Laserscanning-Methoden zum Einsatz.[27] Solche digitalen Anwendungen werden unter ***Building Information Modeling*** (BIM) zusammengefasst, das immer mehr Beachtung im deutschen Bauwesen findet.[28] BIM soll dazu beitragen, dass die baulichen Aufgaben durch verbesserte Planungsmethoden wirtschaftlicher bewältigt werden.[29] Laut *Borrmann* ermöglicht BIM „[…] *im Vergleich zu bisherigen Verfahren viel tiefgreifendere Möglichkeiten zur Computerunterstützung bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, da Bauwerksinformationen nicht in Zeichnungen abgelegt, sondern in Form eines umfassenden digitalen Bauwerksmodells erstellt, vorgehalten und weitergegeben werden*.“[30] Zukünftig könnten von Bauprojekten immer größere Datenmengen vor, während und nach deren Bauausführung verfügbar sein.

Reicht demnächst ein umfassendes BIM-Modell mit seinem bestehenden Informationsgehalt aus, so dass baubetriebliche Gutachten überflüssig werden? Lassen sich dann spezielle und unvorhergesehene Komplexfragen zu rechtlichen Aspekten – die einen „geisteswissenschaftlichen Charakter“[31] besitzen – angemessen beantworten?

Mit einer transparenten Datenlage sind zwar weniger Streitfragen als bisher denkbar. Dennoch gibt es bereits einige Einschätzungen und Erfahrungsberichte, aus denen hervorgeht, dass

---

[21] Vgl. Tiesler, 2018: S. 58-88; Roquette/Bescher, BauR 2018: 422, 427-430; Kues, NZBau 2018: 506.
[22] Vgl. Tiesler, 2018: S. 141-142.
[23] Vgl. Tiesler, 2018: S. 142. *Roquette et al.* gehen hingegen von etwa *30* bis *50* % aus. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Vorwort zur ersten Auflage, S. VII.
[24] Vgl. Schroeck/Shockley/Smart/Romero-Morales/Tufano, 2012: S. 4.
[25] Für das Jahr 2030 sind *1902 Milliarden* Geräte möglich. Vgl. Haroon/Shah/Asim/Naeem/Kamran/Javaid, 2016: S. 267.
[26] Vgl. Schroeck/Shockley/Smart/Romero-Morales/Tufano, 2012: S. 5.
[27] Umfangreiche Beispiele unter: http://bausoftware.blogspot.com [zuletzt abgerufen am 09.09.2018].
[28] Vgl. Gnerlich, 2017: S. 77-78.
[29] Vgl. Gnerlich, 2017: S. 75-89.
[30] Vgl. Bormann, 2015: S. 602. Ähnlich: Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: S. 24.
[31] Die *Rechtswissenschaft* zählt zu den *Geisteswissenschaften*. Vgl. Brand, NJW 2017: 3558.

nicht alle (streitauslösenden) Ursachen für Bauablaufstörungen zu vermeiden sind.[32] Obwohl eine modellbasierte Arbeitsweise mit BIM definitiv viele Vorteile bringen kann, geht die Modellierung meist nicht „von alleine“ vonstatten. BIM ist keinesfalls als „Allheilmittel“ anzusehen.[33] Möglicherweise entstehen sogar neue bzw. noch nicht erkannte Herausforderungen. Neben der zunehmenden Komplexität der Bauabläufe kann auch der Umfang der Dokumente und Vertragsbedingungen aufgrund widersprüchlicher Interpretationen und gegensätzlicher Einstellungen zunehmend zu einem größeren Streitpotential führen.[34] Laut *Gibbs et al*. ist mit BIM eine Verringerung von Streitigkeiten möglich, aber nicht generell zu vermeiden.[35] Ein passender Spruch von *Friedrich Dürrenmatt* lautet hierzu:[36]

– Je planmäßiger der Mensch vorgeht, umso wirkungsvoller trifft ihn der Zufall. –

Höchstwahrscheinlich bleibt also die Notwendigkeit baubetrieblicher Gutachten trotz Digitalisierung bestehen. *Eschenbruch und Gerstberger* schreiben von einer „Zeitenwende“, bei der die Digitalisierung „[…] *eine schöne neue Welt der baubetrieblichen Gutachten* […]“[37] verspricht. *Ory und Weth* äußern, dass die Digitalisierung „[…] *natürlich auch vor den Gerichten nicht halt* [macht]. *Der elektronische Rechtsverkehr steht vor der Tür, die Berechtigung zur elektronischen Kommunikation mit dem Gericht einerseits und die Verpflichtung dazu andererseits wird kommen*.“[38] Laut *Boehme-Neßler* wird die Digitalisierung die Aufgaben des Rechts ebenso wie seine Instrumente wandeln: „*Dieser Veränderungsprozess, der gerade erst beginnt, muss theoretisch und dogmatisch erfasst und für die Praxis operationabel gemacht werden*.“[39]

Zusammenfassend nimmt neben wachsenden Forderungen der Rechtsprechung zur Darlegung zeitabhängiger Ansprüche aus Bauablaufstörungen auch die Akzeptanz der deutschen Bauwirtschaft für den Einsatz von BIM immer weiter zu. Insbesondere werden Gutachter künftig große und variantenreiche Datenmengen bewältigen müssen, um die komplexen Zusammenhänge für Rechtsfragen inhaltlich aufzubereiten. Eine digitale Arbeitsweise ist absehbar, damit dezidierte Aussagen überhaupt erst gelingen. Dazu ist eine Vorgehensweise notwendig, mit der einerseits *alle verfügbaren Daten* angemessen verwaltet sowie andererseits *nur die rechtlich relevanten Daten* in einen sachlogischen Zusammenhang gebracht werden können. Zur Verarbeitung der relevanten Daten sind mathematisch korrekte Methoden erforderlich, um widerspruchsfreie Erkenntnisse zu erzielen.

[32] Aspekte liefern bspw.: Pärn/Edwards/Sing, 2018: S. 209-219; Liu/Singh/Lu/Bouferguene/Al-Hussein, 2018: S. 236; Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 3; Menden, IBR 2015: 1128; Fuchs, NZBau 2014: 412; Behaneck, St. 01.09.2015; Behaneck, St. 29.01.2016; Koenen, IBR 2016: 1072; Eschenbruch/Malkwitz/Grüner/Poloczek/Karl, 2014: S. 100-101; Scherzer, St. 31.10.2014.
[33] Vgl. Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: S. 12.
[34] Vgl. Abdul-Malak/El-Saadi/Abou-Zeid, 2002: S. 84.
[35] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 3.
[36] Schweizer Schriftsteller, 1921-1990.
[37] Eschenbruch/Gerstberger, BauW 2018: 53.
[38] Ory/Weth, NJW-Beilage 2016: 96.
[39] Boehme-Neßler, NJW 2017: 3036.

1.2 Motivation

In der Regel verwenden Sachverständige Balkenpläne, die mit der Logik von Netzplänen berechnet werden. Auf dieser Basis entwickelten einige Forscher verschiedene Gegenüberstellungsmethoden, um die erforderlichen Bauzeitanalysen zur Nachweisführung materiell-rechtlicher Ansprüche aus gestörten Bauabläufen vorzunehmen. In der gängigen Praxis werden derzeit Netzpläne mit einer *PPM-Software*[40] am Computer berechnet. Jedoch sind mit solchen Methoden keine *dynamischen* Zeit-Raum-Berechnungen möglich. BIM-basierte Bauablaufsimulationen können dies aber leisten.

Simulationen dienen hauptsächlich der Systemanalyse. Sie kommen zum Einsatz, wenn sich komplexe Sachverhalte nicht mehr durch triviale mathematische Methoden berechnen lassen.[41] Nach der *VDI-Richtlinie 3633-1* ist die Simulation „[…] *das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind* […].“[42] Auch Bauabläufe mit ihren komplexen Produktionsprozessen und den unterschiedlichsten Projektbeteiligten sind simulationswürdige Systeme.[43] Bauablaufsimulationen erlauben dynamische „Was-wäre-wenn“-Untersuchungen, um bspw. die Gesamtdauer eines Bauprojekts oder eine zeitliche Ressourcennutzung zu testen.[44] Hauptsächlich befassten sich bisher viele Forscher mit der Bauablaufsimulation als entscheidungsunterstützendes Werkzeug zur Ausführungsplanung oder dem Baustellencontrolling.[45] In keiner der Forschungsarbeiten wurde jedoch auf die Problemstellung eingegangen, wann welche *zeitabhängigen Ansprüche* auf Basis *baurechtlicher Aspekte* bestehen und in welcher Höhe diese nach der *deutschen Rechtsprechung* mit einer Bauablaufsimulation *baubetrieblich bemessen* werden können.

Baurechtliche Themenkomplexe erfordern Analysen, bei denen rein naturwissenschaftliche Betrachtungen allein *nicht* ausreichen. In der Gerichtsbarkeit besteht ein Bestreben zur Aufrechterhaltung der Rechtssicherheit und ggf. der Herstellung von Rechtsfrieden. Ein vollautomatisierter Simulationsansatz könnte an derartigen „Hürden“ scheitern, da eine menschliche „Auffassungsgabe“ für die Anforderungen notwendig ist. Darum wird von einer vollautomatisierten Lösung abgesehen. Besser geeignet sind Plausibilisierungs- und Machbarkeitsbewertungen mit einer rückblickenden Analysemethodik.

Gutachtertätigkeiten mit computergestützten Simulationen sind in deutschen Gerichtsverhandlungen kein Novum. Beispielsweise werden Simulationen in Unfallrekonstruktionen regelmäßig eingesetzt.[46] In Gerichtsverhandlungen haben sie bereits einen derartig hohen Stellenwert erreicht, dass sogar einige Juristen die Eignung manueller Berechnungen über komplexe Zusammenhänge hinterfragen.

---

[40] Auch *Projekt-Management-Software* genannt. Bekannte *Produkte* sind u. a. „Mircrosoft-Project“ oder „Oracle Primavera“.
[41] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 19-20, 43.
[42] VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[43] Vgl. Franz, 1989: S. 185; Chen/Griffis/Chen/Chan, 2013: S. 89.
[44] Vgl. Chen/Griffis/Chen/Chan, 2013: S. 89.
[45] Siehe *Kapitel 2.3* und *Kapitel 2.4*.
[46] Vgl. Burg/Moser, 2017: Fachbuch; PC-Crash-Software: www.pc-crash.com/#videos [zuletzt abgerufen am 27.07.2018].

Um materiell-rechtliche Ansprüche gem. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B für ein Brückenbauprojekt verständlicher darzulegen, wurde mittlerweile auch eine Simulation in einer deutschen Gerichtsverhandlung genutzt.[47] Hierbei handelte es sich jedoch *nicht* um ein *computergestütztes Simulationsmodell*, sondern um ein *materielles Modell*[48] mit der Nachbildung einer detailgetreuen Baustelle und Miniatur-Baugeräten.[49] Daraus lässt sich schließen, dass computergestützte Simulationsanwendungen zur Darlegung von Ansprüchen aus gestörten Bauabläufen in *deutschen Gerichtsverhandlungen* zulässig sind, zumal sie sehr stichhaltige Analysemethoden und aufschlussreiche Darstellungsmöglichkeiten bereitstellen könnten. Für die vorliegende Arbeit ergibt sich hieraus eine bisher kaum betrachtete Forschungslücke.[50]

1.3 Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit soll untersucht werden, inwieweit sich computergestützte Simulationen in Verbindung mit BIM-Gebäudemodellen zur Begutachtung gestörter Bauabläufe eignen. Im Vordergrund der Betrachtungen liegt die Simulation von kausalen Zusammenhängen und Zeitwirkungen. Ein besonderes Ziel der Arbeit besteht in der Erschließung des neuen Forschungsthemas mit seinen unterschiedlichen Perspektiven. So findet eine Grundlagenforschung statt, bei der die Themengebiete *Baubetrieb*, *Simulation und BIM* mit den Anforderungen des *deutschen Baurechts* aufeinander abgestimmt werden. Da Bauablaufsimulationen häufiger Prognosewerkzeuge darstellen und baubetriebliche Gutachten eher ein Rekonstruktionswerkzeug benötigen, musste der Grundlagenteil in einer angemessenen Tiefe betrachtet werden, um die Themengebiete zusammenbringen zu können. Deshalb fällt er umfangreich und teilweise sehr detailliert aus. Darüber hinaus werden in der vorliegenden Arbeit Lösungsvorschläge erarbeitet, wie eine BIM-basierte Bauablaufsimulation gestaltet werden kann. Hierzu werden zwei Entwicklungen vorgenommen:

- die einer geeigneten *BIM-basierten Bauablaufsimulation* mit Petri-Netzen und
- die eines darauf angepassten *Nachweisverfahrens* (Soll-zu-Ist-Modifikation).

Beide Entwicklungen sind miteinander gekoppelt und bilden zusammen das im Titel der Arbeit genannte Konzept zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Abbildung 1-1 liefert einen grafischen Gesamtüberblick zum Aufbau der Arbeit. Linksseitig der Abbildung werden die Hauptzusammenhänge der „*digitalen Themenfolge*“ durch kurz kommentierte Pfeile als Orientierungshilfe hervorgehoben. Entsprechend sind rechtsseitig der Abbildung die Zusammenhänge der „*baubetrieblichen und -rechtlichen Themenfolge*“ zu sehen. Obwohl zwei Themenfolgen gezeigt werden, greifen alle Themen ineinander.

[47] Vgl. MCE-Consult, 2008: S. 78.
[48] Zur Unterscheidung verschiedener Modellarten siehe *Kapitel 2.2.3*.
[49] Vgl. MCE-Consult, 2008: S. 78.
[50] Siehe *Kapitel 2.4.11*.

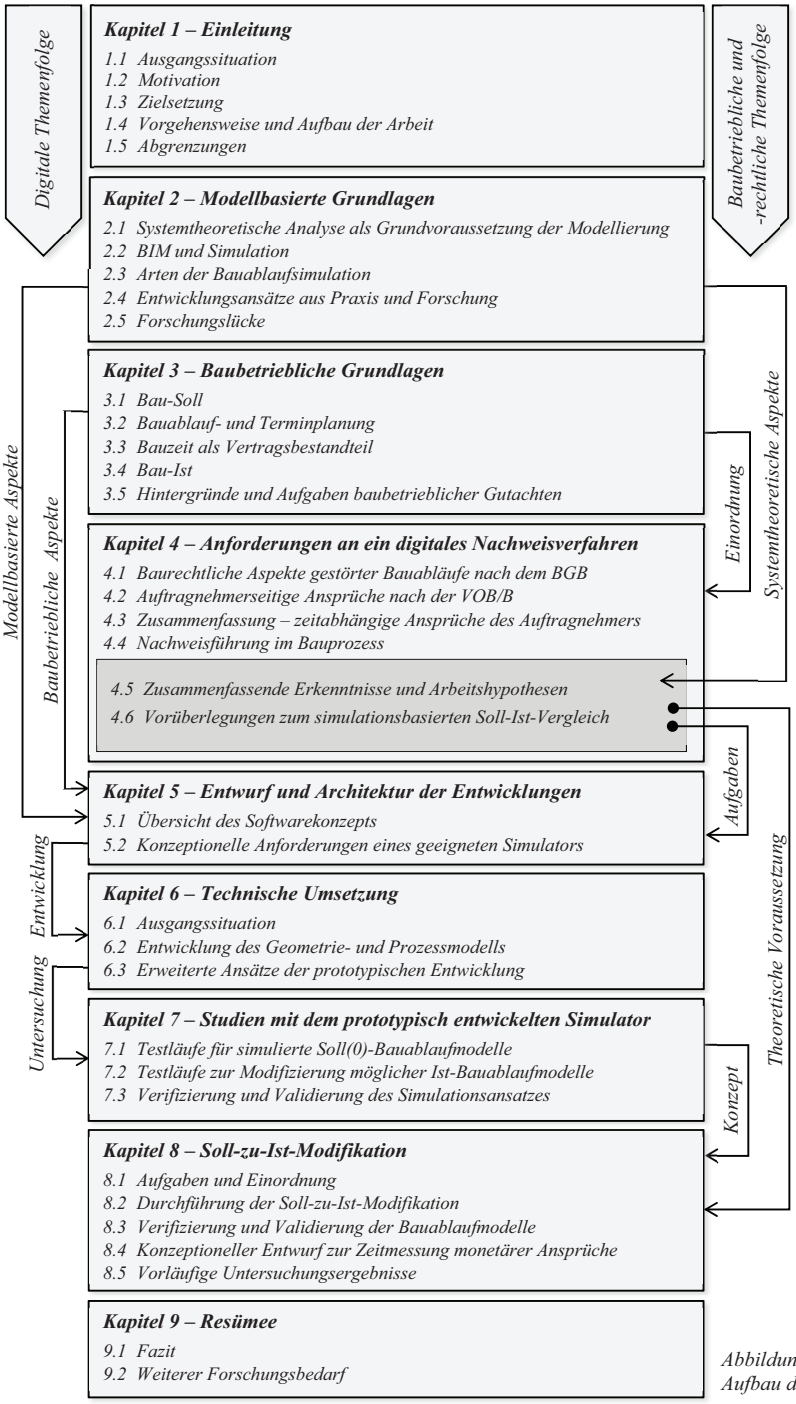


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Zusammengefasst stellt sich die oben abgebildete Vorgehensweise wie folgt dar:

Nach der Einführung in das Forschungsthema durch *Kapitel 1* folgt in *Kapitel 2* ein umfangreicherer Grundlagenteil. Zu Beginn beschäftigt sich *Kapitel 2.1* mit der Systemtheorie als Grundlage der Modellierung. Der Schwerpunkt liegt in der abstrakten Beschreibung dynamischer Prozessabläufe, die mit der Simulation realitätsnah nachgebildet werden können. Darauf aufbauend werden in *Kapitel 2.2* das Building Information Modeling (BIM) und die Simulation thematisiert. In *Kapitel 2.3* liegt der Schwerpunkt in der computergestützten Bauablaufsimulation zur dynamischen Nachbildung von Bauabläufen. *Kapitel 2.4* geht auf Bauablaufsimulationen ein, die seitens der Praxis und Forschung entwickelt wurden. Darin folgt zuerst ein Überblick über nationale sowie internationale Forschungsarbeiten zu Bauablaufsimulationen. Die Herangehensweise dient dem Stellenwert des entwickelten Simulationsansatzes. Anschließend werden Arbeiten vorgestellt, die einen Bezug zum hier betrachteten Forschungsthema aufweisen. Anschließend wird in *Kapitel 2.5* die Forschungslücke der vorliegenden Arbeit tabellarisch aufgelistet. Der Aufbau der Tabelle beruht auf (den) Entwicklungsansätzen, die in *Kapitel 2.4* vorgestellt wurden.

Kapitel 3 umfasst die baubetrieblichen Grundlagen. Darin enthalten sind Aspekte für gutachterliche Tätigkeiten zur bauzeitlichen Bewertung gestörter Bauabläufe. In diesem Kapitel werden teilweise baurechtliche Themen vorweggenommen, damit sich das Aufgabengebiet der baubetrieblichen Gutachten besser herausstellt.

Baurechtliche Themen finden in *Kapitel 4* statt. Häufig sind für Simulationsexperten baurechtliche Anforderungen ein unbekanntes Wissensgebiet. Darum wird mit dem *Kapitel 4.1* zunächst auf rechtliche Grundlagen des BGB-Werkvertragsrechts über Leistungsstörungen eingegangen. Das *Kapitel 4.1* startet mit dem allgemeinen Schuldrecht und endet mit den Regelungen des neuen BGB-Bauvertrags. Im Anschluss daran werden in *Kapitel 4.2* die Grundlagen der VOB/B zu diesem Thema vorgestellt. Diese Vertiefung beruht darauf, dass die einschlägigen Gerichtsentscheidungen über Bauablaufstörungen für Bauvorhaben stattfanden, bei denen die VOB/B wirksam vereinbart worden war. Das nächste *Kapitel 4.3* umfasst baurechtliche Grundlagen mit zeitabhängigen Ansprüchen seitens des Auftragnehmers wegen Bauzeitverzögerungen. Sie bilden den für eine Simulationsanwendung erforderlichen *Simulationszweck*. In der weiteren Vorgehensweise werden in *Kapitel 4.4* Anforderungen zur Darlegung von Ansprüchen aufgrund gestörter Bauabläufe genannt. Darin wird ein Schwerpunkt auf die prozessualen Anforderungen gelegt. In *Abbildung 1-1* sind die *Kapitel 4.5* und *Kapitel 4.6* hervorgehoben. Dies deshalb, da in diesen Unterkapiteln die drei Themengebiete *Baubetrieb*, *Simulation* und *BIM* mit den Anforderungen des *deutschen Baurechts* durch die Bildung von Arbeitshypothesen zusammengebracht werden. Daraus folgen theoretische Vorüberlegungen für das simulationsbasierte Nachweisverfahren – die in dieser Arbeit entwickelte *Soll-zu-Ist-Modifikation*.

Kapitel 5 enthält das Konzept zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation für Ausbaugewerke. In *Kapitel 5.1* wird der Entwurf eines Softwarekonzepts als Lösungsansatz vorgestellt. Dieser Entwurf führte im Rahmen der prototypischen Entwicklungen zum *BIM-basierten Simulator*. Zusammen mit der entwickelten *Soll-zu-Ist-Modifikation* können die daraus erzielbaren Simulationsergebnisse für zeitabhängige Ansprüche gem. *Kapitel 4.3* ausgewertet werden. *Kapitel 5.2* thematisiert konzeptionelle Beschreibungen über Anforderungen an einen BIM-basierten Simulator.

In *Kapitel 6* wird die prototypische Entwicklung des BIM-basierten Simulators beschrieben. Dieser ist auf das in *Kapitel 5.1* entworfene Softwarekonzept abgestimmt. Die Gründe zur Wahl eines Petri-Netz-Simulators werden in *Kapitel 6.1* genannt. Weiterhin folgt eine prinzipielle Beschreibung, wie Petri-Netze für den entwickelten Lösungsansatz als Simulator ausgeführt werden. Das *Kapitel 6.2* umfasst die Architektur zur ganzheitlichen Verknüpfung solcher Petri-Netze mit einem Prozess- und einem dreidimensionalen Gebäudemodell. In *Kapitel 6.3* werden Lösungsansätze zur störungsmodifizierten Simulation von Terminplänen vorgestellt.

Studien mit dem prototypisch entwickelten Simulator sind in *Kapitel 7* zu finden. Das *Kapitel 7.1* enthält neben Testläufen zur Simulation von Soll(0)-Bauablaufmodellen u. a. auch die erzielbaren Genauigkeiten berechneter Simulationsergebnisse. Aufbauend darauf folgen weitere Testläufe in *Kapitel 7.2* zur störungsmodifizierten Simulation. Mit dem *Kapitel 7.3* werden die vorgenommenen Maßnahmen zur Verifizierung des Simulators und Validierung der Simulationsergebnisse sowie gewonnene Erkenntnisse aus geführten Expertenbefragungen zum entwickelten Simulationsansatz vorgestellt.

Das *Kapitel 8* geht auf die *Soll-zu-Ist-Modifikation* ein. Dieses baubetriebliche Nachweisverfahren basiert auf theoretischen Vorüberlegungen der *Kapitel 4.4.3* und *Kapitel 4.5*. Die Aufgabe der Soll-zu-Ist-Modifikation besteht darin, die simulierten Bauablaufmodelle zu verifizieren und zu validieren. Daneben werden mit ihr die baubetrieblichen Prüfungen der zeitabhängigen Ansprüche aus gestörten Bauabläufen gem. *Kapitel 4.3* vorgenommen.

Die Arbeit endet mit dem Resümee in *Kapitel 9*. Es umfasst ein Fazit und unterbreitet Vorschläge für einen weiterführenden Forschungsbedarf.

1.5 Abgrenzungen

In diesem Unterkapitel finden verschiedene Abgrenzungen statt, um der vorliegenden Arbeit eine inhaltliche Richtung zu geben. Für eine grobe Übersicht werden dazu in den folgenden vier Unterkapiteln (von *Kapitel 1.5.1* bis *Kapitel 1.5.4*) *stichpunktartige Aspekte* genannt. Weitere Abgrenzungen ergeben sich aus dem Text der Dissertationsschrift.

1.5.1 Konzeptionelle Entwicklung

i) Die Arbeit befasst sich mit Rekonstruktionen. Prognosen, etwa zur Planung von Bauabläufen, werden nicht thematisiert. Der gesamte Lösungsansatz ist längst nicht vollständig. Mit dieser Arbeit soll der Weg dazu bereitet werden.

ii) Das in *Kapitel 4.1* vorgestellte Softwarekonzept wurde nicht als „marktreifes“ und vollständig auszuführendes Produkt entwickelt. Obwohl das Konzept in dieser Arbeit eher kurz angerissen wird, ist es für die gesamte Forschungsarbeit von großer Bedeutung, da es den Schwerpunkt der Entwicklungen bestimmt. Hieraus leiten sich alle Komponenten der BIM-basierten Bauablaufsimulation zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen ab. Beispielsweise hat das Softwarekonzept die prototypische Entwicklung eines Simulators auf Basis von Petri-Netzen veranlasst. Ebenso wurde ein agentenbasierter Simulationsansatz ausgearbeitet, der sich besonders zur plausiblen Nachbildung dynamischer Produktionsprozesse eignet. Daher werden die beiden Simulationsansätze im Grundlagenteil näher betrachtet.

1.5.2 Digitale Lösungsansätze und Methoden

i) Ein Hauptaugenmerk ist auf die baubetriebliche Bewertung von Zeitwirkungen gerichtet. Die Schwierigkeit bei solchen Rekonstruktionen liegt darin, dass oft unklar ist, welche Daten zur Simulation verfügbar sind. Dies ist der Einmaligkeit und Vergangenheit der zu untersuchenden Sachverhalte geschuldet und betrifft sowohl Soll- als auch Ist-Bauablaufmodelle. Grundsätzlich wird immer von einem gewissen Maß an Unkenntnis über den zu analysierenden Sachverhalt ausgegangen. Der Einzelfall bestimmt, welche Daten zur Durchführung der Simulation gegeben und notwendig sind. Maßgebend sind der Sachverhalt und das jeweilige Untersuchungsziel. Eine Eingrenzung bestimmter Daten würde die Flexibilität des Ansatzes einschränken. Welche Daten für einen Kausalitätsnachweis nach der Rechtsprechung geeignet sind, lässt sich bei *Tiesler* nachlesen.[51]

ii) Vordergründig erfolgt die Entwicklung einer Methodik, die mit unterschiedlichen Funktionen virtuelle Bauabläufe plausibel nachbildet. Der entwickelte Lösungsansatz bietet verschiedene Herangehensweisen zur Simulationsmodellierung. Die dafür erforderlichen Simulationsdaten lassen sich aus verschiedenen Modellbeschreibungen entnehmen und ableiten. Auf geeignete Benutzeroberflächen zur Eingabe der Daten wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Ebenso bleiben Modellierungen bzw. Eingaben der Geometrie- und Prozessdaten unberücksichtigt. Der Aufbau der verwendeten MS-Access-Datenbank für das Prozessmodell und das verwendete XML-Schema zum BIM-Datenexport sind zweckdienlich. Sie ermöglichen lediglich prototypische Werteingaben und bleiben daher in den Betrachtungen außen vor. Da die vorliegende Arbeit auf den Forschungsarbeiten von *Kugler* und *Samkari* aufbaut, können dort die Herangehensweisen zur Einbindung und Verwendung entsprechender Simulationsdaten nachgelesen werden.[52] Im Gegensatz dazu bietet die vorliegende Arbeit Ansätze zur chronologischen Integration von angehängten Daten in den entwickelten Simulationsansatz.

iii) Der Übersicht halber finden weitestgehend keine mathematischen Beschreibungen statt. Für sie wurden vornehmlich Abbildungen ausgearbeitet, um die jeweiligen Funktionsweisen zu veranschaulichen. In den Simulationsberechnungen erfolgen keine tiefergehenden Wahrscheinlichkeitsberechnungen und Optimierungsmethoden.

iv) Die Begriffe „Simulation“ und „Bauablaufsimulation“ werden im folgenden Text mitunter synonym verwendet. Beim entwickelten Lösungsansatz handelt es sich stets um eine „BIM-basierte Bauablaufsimulation“ – auch wenn eine derartige Bezeichnung teilweise ausbleibt. Hierunter werden insbesondere Bauablaufsimulationen für Ausführungsleistungen im Hochbau fokussiert. Planungsleistungen, die häufiger in der Fachliteratur über BIM zu finden sind, stehen nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen und werden allenfalls bedarfsweise erwähnt. Das Hauptaugenmerk bilden Ausführungsprozesse für Ausbaugewerke. Ausführungsprozesse für den Roh- oder Tiefbau bleiben in den Untersuchungen außen vor.

---

[51] Vgl. Tiesler, 2018: S. 43-46, 139 ff.
[52] Vgl. Samkari, 2014: S. 73-116; Kugler, 2012: S. 33-34, 81-176.

1.5.3 Baubetriebliches Nachweisverfahren

i) Die umfangreicheren baubetrieblichen Nachweisverfahren, die bereits von der Fachliteratur zur Bewertung gestörter Bauabläufe vorgeschlagen wurden, sind in den Arbeiten von *Möhring* sowie *Tiesler* nachzulesen.[53]

ii) Zukünftig könnte eine digitale Arbeitsweise die Informationsbeschaffung verbessern. Über die digitale Arbeitsweise ließen sich relevante Informationen, z. B. mit mobilen Bautagebüchern, während einer baubegleitenden Begutachtung zeitnah erfassen (siehe *Kapitel 1.1*). Derartige Erfassungskonzepte sind jedoch kein Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

iii) Das entwickelte Nachweisverfahren (Soll-zu-Ist-Modifikation) wurde konzeptionell ausgearbeitet. Eine prototypische Entwicklung findet im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht statt.

iv) Obwohl Kostenfragen für eine vollständige Bewertung gestörter Bauabläufe nicht wegzudenken sind, bleiben derartige Betrachtungen größtenteils außen vor. Das heißt, es wird allenfalls nebenbei auf Baukosten, Preisbildungen oder die Ermittlung von Schadenshöhen o. Ä. eingegangen. Falls erforderlich, folgen hierzu weitere Abgrenzungen.

v) Systemanalysen sind bei der Durchführung von Simulationsstudien ein wichtiger Bestandteil. Auch in baubetrieblichen Gutachten sind Systemanalysen das eigentliche Kernthema. Fachdiskussionen zeigten jedoch regelmäßig Wissenslücken zu diesem Thema. In der einschlägigen Fachliteratur wird dieser Zusammenhang eher „beiläufig" erwähnt. Systemtheoretische Analysen bilden in der vorliegenden Arbeit das theoretische Fundament und werden deshalb in *Kapitel 2* besonders ausführlich behandelt.

1.5.4 Baurechtliche Themen

i) Die baurechtlichen Themen wurden im Rahmen der Forschungsarbeit mit Juristen ausgiebig diskutiert und mit der einschlägigen Literatur verglichen. Allerdings können „juristische Feinheiten" bestehen, die zu widersprüchlichen Auffassungen führen. Die Ausarbeitung wurde im Wesentlichen aus der Sicht eines Baubetrieblers angefertigt und ist dementsprechend zu betrachten. Das Ziel der Ausführungen besteht in der Beschreibung möglicher Modellierungsbedingungen und -anforderungen.

ii) Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Ausführung von Bauleistungen nach dem Regelwerk der VOB/B mit den Regelungen in § 2 Abs. 3, 5, 6, 8 und § 6 VOB/B. Betrachtet werden ausschließlich Einheitspreisverträge i. S. v. § 2 Abs. 2 VOB/B. Planungsleistungen sind kein Bestandteil der Arbeit. Darüber hinaus erfolgt keine Betrachtung über Bauablaufstörungen aus Baumängeln. Weiterhin wird von erfüllten Bauleistungen ausgegangen, so dass Schadensersatzansprüche statt der Leistung unberücksichtigt bleiben.

iii) Unter der Bezeichnung ***Bauprozess*** wird das Verfahren eines Zivilprozesses in Bausachen verstanden. Mit dem Begriff ***Ausführungsprozess*** ist der Produktionsprozess einer Arbeitsaufgabe gemeint.

iv) BGB-Bauverträge werden nur beiläufig betrachtet, da derzeit richtungsweisende Urteile fehlen.

---

[53] Vgl. Möhring, 2012: S. 73 ff. und Tiesler, 2018: S. 89 ff.

2 Modellbasierte Grundlagen

2.1 Systemtheoretische Analyse als Grundvoraussetzung der Modellierung

2.1.1 Grundbestandteile von Systemen

Nach *Niemeyer* ist ein System nicht notwendigerweise ein konkretes, greifbares Ding, sondern lediglich eine Form der Beobachtung über einen tatsächlich vorhandenen Gegenstand oder einen realen ***Sachverhalt***, der aus einer individuellen Erfahrung und einem subjektiven Interesse heraus unterschiedlich wahrgenommen werden kann.[54] *Systemtheoretische Betrachtungen*[55] definieren Vorgehensweisen, wie solche Beobachtungen allgemeingültig als ***System*** beschrieben werden können.

Ein System setzt sich aus einer Menge von ***Teilen***[56] zusammen, die miteinander in Verbindung stehen. Die Teile können sowohl materielle als auch hypothetische Dinge sein, wie etwa Computer in einem Netzwerk, das Zusammenwirken von Arbeitskräften und Maschinen auf einer Baustelle, die Gliederung von Teilleistungen in einem Leistungsverzeichnis, Bauteile für den Lastabtrag in einem Tragwerk oder sogar Schlagwörter in einem rhetorischen Text. Der Beobachter darf den Abstraktionsgrad der einzelnen ***Teile*** nach seiner Auffassung selbst festlegen und bei Bedarf in beliebige Mengen, möglichst sinnvoll, zusammenfassen.[57] Eine ***Systemgrenze*** umschließt diese Mengen, so dass sich der Beobachtungsgegenstand bzw. das System als eigenständige *Ganzheit* darstellt. Das beobachtete System ist somit von anderen Systemen abgegrenzt.[58]

Die Teile können entweder ***Elemente*** oder ***Teilsysteme*** sein (siehe *Abbildung 2-1*).[59] *Teilsysteme* sind nach dem gleichen Prinzip wie ihr übergeordnetes System aufgebaut.[60] Jedes (Teil-)System kann selbst mehrere ineinander verschachtelte Systeme umfassen, die in verschiedenen Hierarchie-Ebenen geordnet sind – den sog. ***Systemebenen***.[61] Jedes Ausgangssystem stellt ebenfalls ein Teilsystem dar, das sich in einem übergeordneten (Teil-)System befindet.[62]

---

[54] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 1; Ulrich/Probst, 1995: S. 27-30; Bossel, 2004: S. 35.

[55] In systemtheoretischen Betrachtungen werden Bewertungen vorgenommen, um Systeme nach einem bestimmten Schema zu definieren. Sie sollen zu einem Erkenntnisgewinn über grundlegende *Zusammenhänge* der Wirklichkeit beitragen. In vielen Fachgebieten wird diese Vorgehensweise angewandt, um tiefergehende Fragestellungen zu ergründen. Zum Beispiel kommt sie in technischen, ökonomischen, biologischen oder gesellschaftlichen Wissenschaften etc. zum Einsatz. Die Vorgehensweise zur Erfassung von Systemen ist der allgemeinen ***Systemtheorie*** zuzuordnen. Sie umfasst u. a. die Kybernetik.

[56] In dieser Arbeit wird nach *Ulrich und Probst* der Begriff „Teil(e)“ verwendet. Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 30. *Niemeyer* sowie *Košturiak und Gregor* benutzen das Synonym „Komponente(n)“. Vgl. Niemeyer, 1977: S. 3; Košturiak/Gregor, 1995: S. 6.

[57] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 38-39. Das System sollte einen *definierbaren Zweck* erfüllen (= ***Systemzweck***).

[58] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 53-54; Bossel, 2004: S. 38, 43-45; VDI-3663, Blatt 1, 2014: S. 22-23.

[59] Vgl. Anschütz, 1974: S. 19; Niemeyer, 1977: S. 1-3; Ulrich/Probst, 1995: S. 27-36.

[60] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 2; Ulrich/Probst, 1995: S. 29; VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.

[61] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 29, 33; Bossel, 2004: S.43-45.

[62] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 50.

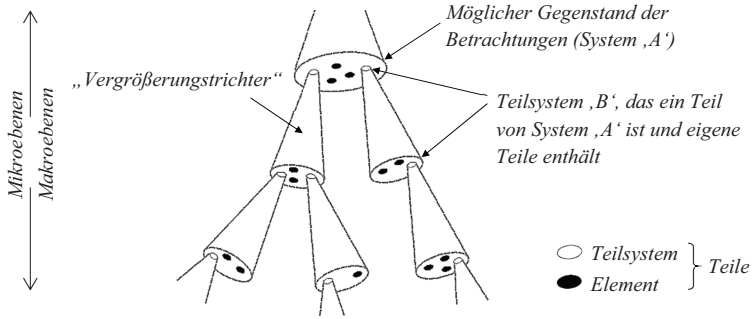


Abbildung 2-1: Gliederung der Teile von Systemen (ohne Struktur)[63]

Theoretisch können unendlich viele Systeme in allen Richtungen der Systemebenen, den Mikro- und/oder den Makroebenen, ineinander verschachtelt sein. In *Abbildung 2-1* werden die Verschachtelungen durch Vergrößerungstrichter gezeigt, die den inneren Aufbau der Teilsysteme in Mikroebenen-Richtung vergrößern. In diesen Teilsystemen sind weitere Teilsysteme enthalten, deren innerer Aufbau abermals durch einen Vergrößerungstrichter illustrativ dargestellt wird.

Im Gegensatz zu den Teilsystemen sind Elemente die nicht weiter zerlegbaren Bestandteile eines Systems.[64] Sie können jedoch ebenfalls als Systeme verstanden werden, bei denen ein weiteres Zerlegen irrelevant oder aus Beobachtungsgründen nicht mehr möglich ist.[65] Die Elemente stellen somit gewollte oder ungewollte Begrenzungen für Detailbetrachtungen weiterer Systeme in Mikroebenen-Richtung dar. Unter Zuhilfenahme einer ***Black-Box*** gem. *Kapitel 2.1.6* lässt sich die Zusammensetzung der Elemente abstrahieren, die der Beobachter nach eigener Überzeugung festlegen darf.

Bossel beschreibt, dass *alle* Systeme auf irgendeine Art und Weise ***dynamisch*** sind, auch jene, die vermeintlich statisch auf den Beobachter wirken.[66] Jede „Dynamik“ entsteht aus zeitveränderlichen Eigenschaften eines Systems.[67] Zur Nachbildung solcher Dynamiken beschreibt *Niemeyer* ***Beziehungen*** zwischen den Elementen, die miteinander zu einer ***Systemstruktur*** vernetzt sind.[68] Über diese Verbindungen können die Elemente gerichtete ***Wirkungen*** untereinander ausüben, wodurch sich evtl. ein *gesamtes* dynamisches ***Systemverhalten*** einstellt.[69]

Bei einer Wirkung können diverse ***Wirkungsgrößen*** von den Elementen aufgenommen, verarbeitet, gespeichert und abgegeben werden.[70] Somit besitzt jedes Element ein momentanes ***Wirkungspotential***, das inhaltlich und zeitveränderlich im Element hinterlegt

[63] Eigene Abbildung i. A. a. Ulrich/Probst, 1995: S. 29.
[64] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 2; Ulrich/Probst, 1995: S. 28; Bossel, 2004: S. 34; VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[65] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 2, 53-54; Ulrich/Probst, 1995: S. 28.
[66] Vgl. Bossel, 2004: S. 36. Beispielsweise existieren in einem statischen Tragwerk dynamische Windlasten.
[67] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 5.
[68] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 4-5.
[69] Siehe *Kapitel 2.1.5*.
[70] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 3, 33.

ist.[71] Das gesamte momentane Wirkungspotential aller Elemente innerhalb eines Systems wird als ***Systemzustand*** bezeichnet.[72] Die Abhandlung, Wirkungen entgegenzunehmen und ggf. mit eigenen Wirkungspotentialen über einen bestimmten Zeitraum zu einer neuen Wirkung zu verarbeiten bzw. umzuwandeln, definiert einen ***Prozess***.[73] Währenddessen kann ein *alter Systemzustand* aufrechterhalten oder ein *neuer Systemzustand* hergestellt werden. Daran können mehrere hintereinander und/oder nebeneinander geschaltete Teile beteiligt sein.[74]

2.1.2 Informationen als Wirkungsgrößen in Systemen

In der Systemtheorie gibt es die drei Wirkungsgrößen *Materie*, *Energie* und ***Informationen***. Informationen lassen sich durch Beobachtung und Bewertung von Materie und Energie gewinnen, sobald ihre erfassten Eigenschaften interpretiert werden.[75] Das kann z. B. durch Messungen und/oder Verhaltensinterpretationen geschehen. Eine Information ist „[…] *je nach Sichtweise das, was wir real vor uns haben und zwecks maschineller Verarbeitung abstrahieren sowie modellieren, oder dann das, was wir nach dieser Verarbeitung durch Interpretation in die Realität zurückgewinnen.*“[76] Folglich gibt es überall Informationen. Diese müssen jedoch erst verstanden und dann in eine aussagekräftige Form interpretiert werden, damit das Erkannte einen informativen Sinn erhält. Durch die Kombination verschiedener Informationen können neue Informationen entstehen. Die Information ist daher eine besondere Wirkungsgröße der Systemtheorie, die im Folgenden als „Standard-wirkungsgröße“ anzusehen ist.

Die Fähigkeit, Informationen von einem Teil zu einem anderen Teil weiterzuleiten, wird als ***Informationsfluss*** oder als ***Wirkung*** bezeichnet. Da alle Bestandteile eines Systems ebenfalls Systeme sind, besitzen diese auch einen Informationsfluss.[77]

2.1.3 Strukturen in Systemen

Laut *VDI-Richtlinie 3633-1* können Prozesse erst stattfinden, wenn die Elemente eines Systems miteinander zu einer ***Struktur*** verbunden sind.[78] Der Informationsfluss findet hauptsächlich im Systeminneren statt und erfolgt zwischen einzelnen Elementen in Mikroebenen.[79] Dadurch sind die Elemente untereinander und über die Systemgrenzen hinaus

---

[71] *Niemeyer* verwendet hierfür den Begriff „Wirkungspotential“. Vgl. Niemeyer, 1977: S. 3.
[72] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 4; etwas genauer: Bossel, 2004: S. 123-133.
[73] I. A. a. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[74] Die Definition wurde i. A. a. DIN EN ISO 9000, 2015: S. 33 gewählt. Demnach ist ein Prozess ein „*Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet*“. Berücksichtigt werden folgende Anmerkungen: „*Eingaben für einen Prozess sind üblicherweise Ergebnisse anderer Prozesse*[,] *und Ergebnisse aus einem Prozess sind üblicherweise Eingaben für andere Prozesse* […] *Zwei oder mehr zusammenhängende und sich gegenseitig beeinflussende*[,] *aufeinanderfolgende Prozesse können auch als ein Prozess bezeichnet werden.*“ Die *VDI-Richtlinie 3633-1* definiert einen Prozess als die Gesamtheit aufeinander wirkender Vorgänge, „[…] *die in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden*.“ VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3 i. A. a. DIN IEC 60050-351, 2014: S. 32.
[75] Eine einheitliche Definition der Information gibt es nicht. Nach *Fuchs und Hofkirchner* sollte der Informationsbegriff vorwiegend dem lateinischen „informatio“ (zu Deutsch: „Vorstellung“ bzw. „Erläuterung“) angepasst werden. Vgl. Fuchs/Hofkirchner, 2002: S. 242, 246.
[76] Fischer/Hofer, 2008: S. 404.
[77] Vgl. Anschütz, 1974: S. 18-19; Niemeyer, 1977: S. 6.
[78] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[79] Vgl. Anschütz, 1974: S. 18-19; Niemeyer, 1977: S. 6.

vernetzt. Jedes Teil, das mit einem anderen Teil über die eigenen Systemgrenzen hinaus in wechselseitiger Wirkung steht, interagiert mit seiner ***Umwelt***.[80] Die Umwelt umfasst die Menge aller über- und nebengeordneten Teile eines Systems.[81]

Ein *offenes System* interagiert mit seiner Umwelt.[82] Findet kein Informationsaustausch mit seiner Umwelt statt, ist es ein *geschlossenes System*.[83] In *Abbildung 2-2* ist der Informationsfluss zwischen den Teilen eines offenen Systems zu sehen.

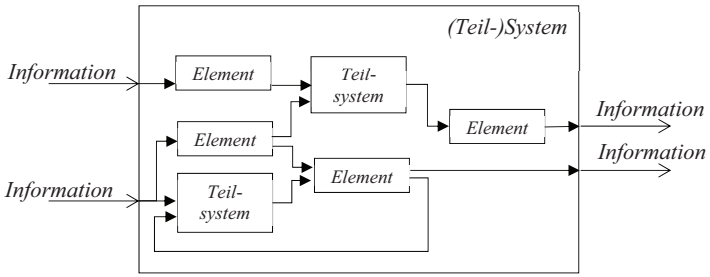


Abbildung 2-2: Verteilter Informationsfluss im Inneren eines offenen Systems[84]

Niemeyer erklärt, dass „[…] *der Umweltbegriff ein rein subjektives Gedankengebilde ist* […]. *Was zum System und was zur Umwelt gehört, richtet sich allein nach dem Wissen* [und] *dem Untersuchungsziel* […] *des jeweiligen Betrachters.*“[85] Da ein ganzheitliches System nicht erfasst werden kann, ist neben der Abgrenzung in Mikroebenen-Richtung auch eine Abgrenzung in Makroebenen-Richtung notwendig. Hierfür wird ein geschlossenes System als obere Grenze festgelegt, während die unteren Begrenzungen durch die Elemente zustande kommen. Geschlossene Systeme lassen sich innerhalb ihrer Umwelt nicht beobachten, da sie aufgrund der ausbleibenden Wirkung isoliert und somit nicht messbar bzw. wahrnehmbar sind.[86]

Systemgrenzen werden aus Strukturen abgeleitet. Es ist zwischen der ***Aufbaustruktur*** und der ***Ablaufstruktur*** zu unterscheiden. Durch eine hierarchische Gliederung der vernetzten Elemente und Teilsysteme lässt sich die *Aufbaustruktur* definieren.[87] Mit begrenzten Wirkungsrichtungen und Prozessreihenfolgen umfasst die *Ablaufstruktur* die Vernetzungslogik des Informationsflusses.[88] *Abbildung 2-3* zeigt schematisch ineinander verschachtelte Systeme mit den jeweiligen Systemgrenzen und Beziehungen als Systemstruktur.

[80] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 50 ff.; Bossel, 2004: S. 235 ff.
[81] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 55.
[82] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 39-41; Niemeyer, 1977: S. 25-26; Ulrich/Probst, 1995: S. 50-56.
[83] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 39-41; Niemeyer, 1977: S. 26.
[84] Eigene Abbildung.
[85] Niemeyer, 1977: S. 55.
[86] Vgl. Bossel, 2004: S. 37.
[87] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 27-31.
[88] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 28, 31.

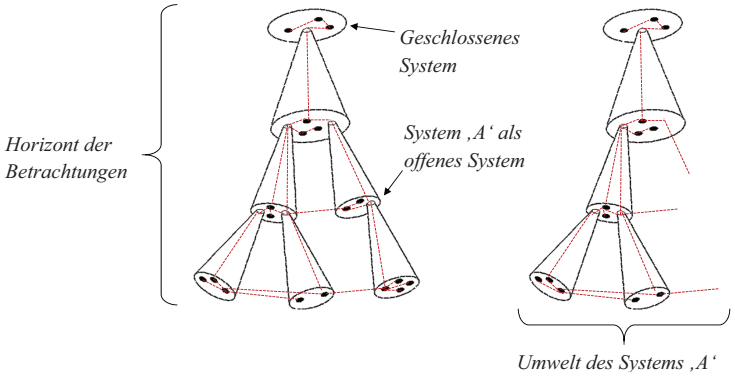


Abbildung 2-3: Die Grenzen und die Umwelt von Systemen (mit Struktur)[89]

2.1.4 Ordnungsbegriff – Ausgangspunkt für objektive Bewertungen

Informationen sind ausschlaggebend für Systemstrukturen und Systemgrenzen. Die Menge an Informationsarten, die ein System aufnehmen, verarbeiten und abgeben kann, ist durch den Beobachter festzulegen. Er muss bestimmen, welche Teile aufgrund ihrer Beziehungen zueinander als Menge zusammengefasst werden können. Voraussetzung ist das Vorhandensein solcher Beziehungen, die oftmals eine ausreichende räumliche Nähe zwischen den Teilen innerhalb eines Systems aufweisen.[90] Entsprechend hat der Beobachter im Rahmen eines „[…] *Wirklichkeitsbereiches inhaltliche Aussagen* [zu treffen, bei denen er zuerst] *eine Zuordnung des betreffenden Inhalts zu den Strukturbegriffen und Strukturgesetzen herstellen* [muss].“[91] Eine Zuordnung ist *nur* durch die Berücksichtigung eines Schemas und des entstehenden Zugewinns von ***Ordnung*** möglich.[92] Information und Ordnung sind zwei einhergehende Begriffe in der Systemtheorie, denn „[…] *wo kein Ordnungsmuster ist, da ist auch keine Information.*“[93] In einem systemtheoretischen Ansatz wird der Zusammenhang zwischen Information und Ordnung wie folgt beschrieben:

- ***Syntax/Grammatik*** (= Form/Regel zur Abbildung bzw. Strukturierung der Information, z. B. Zeichen, Schrift oder Satzbau.)
- ***Semantik*** (= inhaltlicher Gehalt bzw. Bedeutung der Information. Zum Beispiel weist der Spruch: „Komm wir essen Opa! Satzzeichen können Leben retten.“ auf unterschiedliche Semantiken hin, sobald die Syntax/Grammatik verändert wird.)
- ***Pragmatik*** (= Wirkung der Information – im Sinne einer Vorgabe oder Deutung der Semantik. Zum Beispiel sind in konjunktiv verfasste „ca.-Termine“ nicht klar zu deuten, da sie unterschiedlich auf den Informationsempfänger wirken können.) [94]

[89] Eigene Abbildung.
[90] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 10.
[91] von Cube, 1970: S. 33.
[92] Vgl. Fuchs/Hofkirchner, 2002: S. 254 ff.
[93] Ulrich/Probst, 1995: S. 76. Siehe auch Fuchs/Hofkirchner, 2002: S. 254, 277; Niemeyer, 1977: S. 10.
[94] Vgl. Fischer/Hofer, 2008: S. 344, 747, 822; Fuchs/Hofkirchner, 2002: S. 242-250, 266, 267; Ashby, 1957: S. 140-145.

Laut *Ulrich und Probst* ermöglicht Ordnung dem Menschen „[…] *sich zurechtzufinden, Fehlendes zu ergänzen und das Einzelne im Kontext des Ganzen zu verstehen.*“[95] Das Prinzip lässt sich anhand von Rechenmaschinen verdeutlichen. So werden in der Informatik Zahlenwerte oder Zeichen durch ein allgemeingültiges Ordnungsschema (aus „Null“- und „Eins“-Kombinationen) binär codiert und sind dadurch maschinell verarbeitbar. Mit demselben Schema können andere Rechenmaschinen die Information decodieren und interpretieren, um Zugriff auf die ursprüngliche Information zu erhalten.[96]

Diese Zusammenhänge sind auf die menschliche Erfassung von Ordnung und Informationen übertragbar. Analogien bestehen bspw. bei der Erstellung einer Behinderungsanzeige. Eine Behinderungsanzeige sollte möglichst verständlich formuliert werden, damit Dritte einen Behinderungssachverhalt im System „Bauablauf“ nachvollziehen können. Folgende systemtheoretische Zusammenhänge sind wiederzufinden:

- Bauablauf ⇔ stellt das System dar;
- hindernder Umstand und Auswirkungen ⇔ ein Teil des Systems mit Wirkungsbeziehungen zu anderen Systemteilen (Informationen);
- Behinderungsanzeige ⇔ enthält alphanumerisch „codierte“ Informationen bzw. Daten[97], bspw. Worte, Zahlenwerte und/oder Sätze in einem tabellarischen Formular (Systemteile und Wirkungsgrößen zueinander);
- dritte Personen ⇔ „decodieren“ Informationen, um die Wirkungen zwischen den Systemteilen zu erkennen.

Weitere Ordnungsstrukturen existieren in der Aufbau- und Ablauforganisation von Unternehmen. Die Aufgabenbereiche und -reihenfolgen der jeweiligen Sparten sind dort klar voneinander getrennt.

Bei der Herleitung eines Systems muss sich der Beobachter auch mit ***Unordnung*** auseinandersetzen, da ein unbekanntes System erst in eine Ordnungsstruktur überführt werden muss und die meisten dynamischen Systeme dazu neigen, in eine vermeintliche Unordnung überzugehen. Eine Unordnung ist nicht mit einem „chaotischen Zustand“ zu verwechseln. Vielmehr stellt eine Unordnung eine ***gegenwärtige Ordnung*** dar, die aus der wahrscheinlichsten aller Kombinationen heraus entstanden ist.

---

[95] Ulrich/Probst, 1995: S. 77.

[96] Dieses Prinzip lässt sich auf die menschliche Sprache und Schrift übertragen, mit der vorwiegend Informationen ausgetauscht und gespeichert werden sollen. Demgegenüber ist ein Computer, im Gegensatz zum Menschen, nicht in der Lage, neue Informationen von Grund auf zu erdenken oder inhaltlich eigenständig qualitativ zu bewerten. Ein Computer ist vielmehr ein Verarbeitungssystem, das zu codierende Informationen aufnehmen (z. B. durch Sensoren oder menschliche Eingaben) und diese in eine bestimmte Reihenfolge sortieren sowie umrechnen (kombinieren) kann, wodurch neue Informationen entstehen. Der Inhalt einer Information hat für einen Computer keine sonderliche Bedeutung. Sie werden für Rechenmaschinen gem. *Shannon* quantitativ auf Signale und Berechnungsregeln heruntergebrochen. Computersysteme werden aufgrund ihrer Eigenschaften als ***Automat*** bezeichnet. Ein einfacher Automat lässt sich abstrakt durch eine Input- und Output-Variable, eine Zustandsvariable, eine Zustandsfunktion sowie eine Ausgabefunktion vollständig beschreiben. Vgl. Fuchs/Hofkirchner, 2002: S. 251 ff. i. V. m. Anschütz, 1974: S. 93 ff.; Niemeyer, 1977: S. 71 ff.; VDI-3633, 2018: S. 5.

[97] Vgl. VDI-3633, 2018: S. 8-9.

Folgende Ordnungsdefinitionen werden festgelegt:

Tabelle 2-1: Ordnungsdefinitionen[98]

Bezeichnung	Definition
Gewollte Ordnung	soll als gegenwärtige Ordnung erreicht werden
Unordnung	signifikante Abweichung von der gewollten Ordnung
Objektive Ordnung	subjektive und wertneutrale Wahrnehmung der gegenwärtigen Ordnung

Die *objektive Ordnung* kann theoretisch alle Ordnungsformen annehmen, da sie keinen physikalischen Naturgesetzen folgt, sondern sich aus deren Erkenntnis oder aus Erfahrungswerten bildet. Wenn nur unpräzise Informationen über das betrachtete System vorliegen, weicht die *objektive Ordnung* teilweise von der *gegenwärtigen Ordnung* ab. Objektivität ist insbesondere dann vorhanden, wenn verschiedene unabhängige Beobachter ein vergleichbares Ergebnis über ein System erzielen.

Der folgende Versuchsaufbau verdeutlicht die *gegenwärtige Ordnung*. Er dient gleichzeitig als Beispiel zur Modifikation von Simulationsläufen.

Versuchsaufbau „Würfelbeispiel“:

Nachstehend wird die Entwicklung des Erwartungswerts beim Würfeln betrachtet. Der Erwartungswert ist ein *durchschnittlicher* Wahrscheinlichkeitswert μ, der nach mehrfachen Ausführungen regelmäßig erwartet werden kann. Er lässt sich durch die Aufsummierung aller möglichen *gewichteten Zufallsgrößen* berechnen. Beim Würfeln liegt eine gleichverteilte Eintrittswahrscheinlichkeit von *1/6* (= Gewichtung) für alle sechs Augenzahlen *i* (= Zufallsgrößen) vor. Beim einzelnen Würfel ist der Erwartungswert $\mu = 3{,}5$. Die Berechnung erfolgt folgendermaßen:

$$\mu = \sum_{i=1}^{6} i \cdot \frac{1}{6} = \underline{3{,}5}$$

Um die Entwicklung des Erwartungswerts aufzuzeigen, werden in vier Versuchsreihen mehrere virtuelle Würfel nacheinander geworfen. Dazu erfolgt nach jedem Wurf eine Aufsummierung der gegenwärtigen Augenzahl, die mit der Anzahl der durchgeführten Würfe dividiert wird. Die Entwicklung des Erwartungswerts lässt sich als Funktion über die Anzahl der Würfe darstellen.

Abbildung 2-4 zeigt vier Funktionsverläufe mit je *250 Würfen*. Während der Berechnung wurde jede geworfene Augenzahl mit dem Faktor = *1,0* multipliziert. Alle vier Versuchsreihen konvergieren und nähern sich dem Erwartungswert an. Sie schaffen eine ***ideale Ordnung***, die sich gegen Ende der Funktionsverläufe durch die Annäherung identifizieren lässt.

[98] Eigene Darstellung.

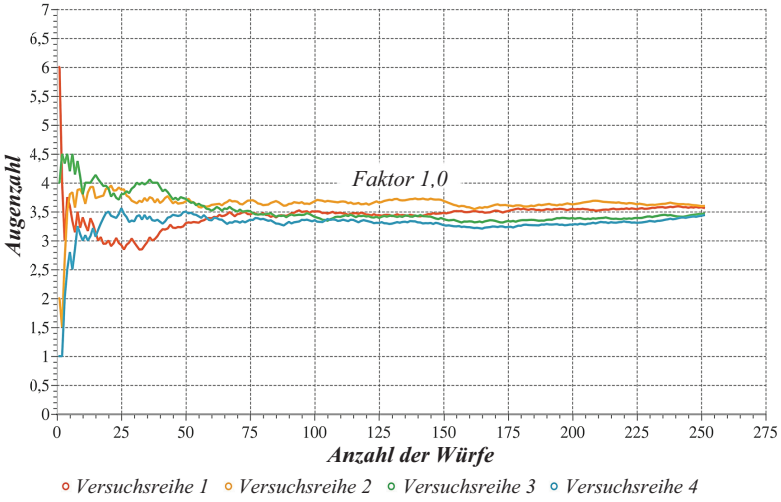


Abbildung 2-4: Erwartungswert beim Würfeln (4 Versuchsreihen mit je 250 Würfen)[99]

In *Abbildung 2-5* ist der gleiche Versuchsaufbau zu sehen, der nur leicht verändert wurde. Bis zum *999. Wurf* ist der Versuchsaufbau mit dem vorausgegangenen Aufbau vergleichbar. Ab dem *1000. Wurf* wird jede Augenzahl doppelt gezählt (Erhöhung der Augenzahl von Faktor *1,0* auf *2,0*). Die erzielten Veränderungen werden als Wirkungen im System angesehen. Sie führen zu einem deutlichen Knick und einem bogenförmigen Funktionsverlauf, der sich bei allen vier Versuchsreihen einstellt. Ihr Verhalten ist aufgrund der gleichverteilten Wahrscheinlichkeit annähernd identisch.

Die vier Versuchsreihen konvergieren nach dem Knick gegen den neuen Erwartungswert von *7,0*. Der Weg dorthin wird von der neuen *idealen Ordnung* „vorgegeben". Da der *1000. Wurf* abgewartet werden muss, liegt eine zeitveränderte Berechnungsregel vor, die den Verlauf der *idealen Ordnung* bestimmt. Der Versuch verdeutlicht, dass eine *Unordnung* die Ausprägung einer *gegenwärtigen Ordnung* ist, die sich einer anderen *idealen Ordnung* annähert und einige Ausreißer enthält.

Die *gegenwärtige Ordnung* liegt in Raum und Zeit faktisch vor. Sie kann in ihrer Entstehung und Entwicklung beeinflusst werden, indem äußere Eingriffe auf das System stattfinden. In diesem Fall wurde eine Berechnungsregel zu einem bestimmten Zeitpunkt geändert, bei der die Information „rechne mit der doppelten Augenzahl (*Faktor 2,0*) ab dem *1000. Wurf*" hinzugefügt wurde.

[99] Eigene Abbildung.

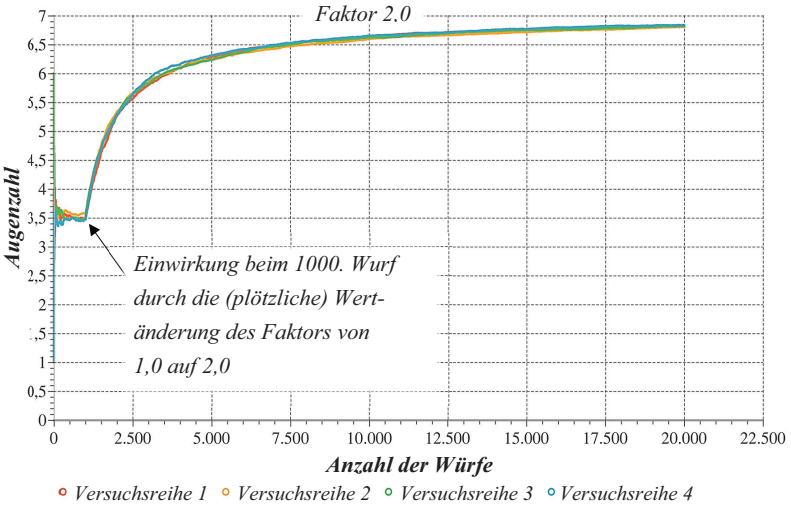


Abbildung 2-5: Modifizierte Ordnung (Verdoppelung der Augenzahl beim 1000. Wurf)[100]

Mit solchen Berechnungsregeln lassen sich durch Modifikationen bestimmte Systemzustände erreichen. *Abbildung 2-6* erläutert, wie sich mit dieser Herangehensweise der Funktionsverlauf zielgerichtet verändern lässt.

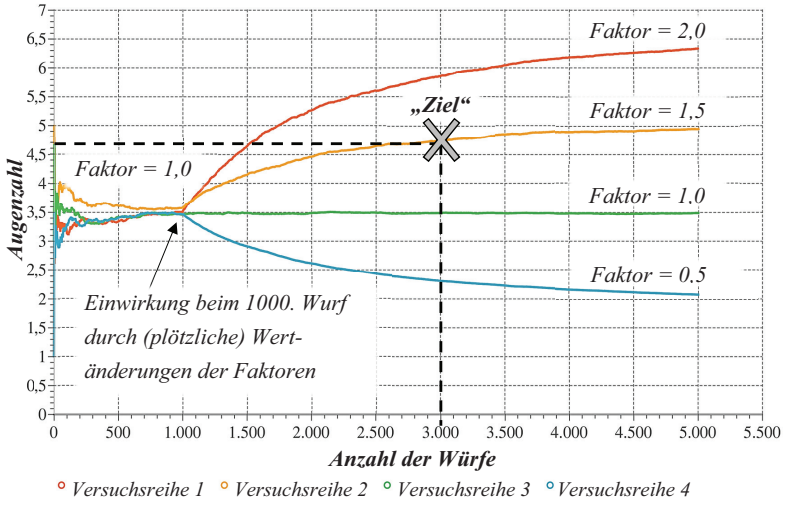


Abbildung 2-6: Annäherung an ein Ziel durch Modifizierungen der Faktoren[101]

[100] Eigene Abbildung.
[101] Eigene Abbildung.

In *Abbildung 2-6* wurde *vorab* der Wert *4,75* zum *3000. Wurf* als *Ziel*[102] festgelegt. Dieses sollte durch einen modifizierenden Eingriff mit der Änderung eines Faktorwerts zum *1000. Wurf* erreicht werden. Wie *Abbildung 2-6* zeigt, erlangte *nur* die Versuchsreihe mit dem Faktor *1,5* das Ziel. Alle anderen Funktionsverläufe orientieren sich aufgrund ihrer Faktorwerte jeweils an ihrer eigenen *idealen Ordnung*.

Der Versuchsaufbau ist analog auf die Simulation gestörter Bauabläufe übertragbar. Mit dieser Vorgehensweise sollen unklare Sachverhalte des Bauablaufs rekonstruiert werden. Dazu wird ein vergleichbarer Einsatz mit unterschiedlichen ***Gewichtungsfaktoren*** angestrebt, die zeitvariabel in unterschiedlichen Intensitäten aufeinander abzustimmen sind. Mit ihnen ist die Herstellung einer *objektiven Ordnung* möglich.

2.1.5 Emergentes Systemverhalten

Niemeyer beschreibt, dass Systeme durch den Austausch von Informationen aufgebaut, verändert oder sogar zerstört werden können.[103] Interaktionen, die im Inneren eines Systems stattfinden, ermöglichen Zustands- und Strukturänderungen.[104] In diesem Fall wird vom *Aufbau eines Systems* gesprochen.[105] Je größer ein System ist, desto größeren Einfluss kann es auf seine Umwelt ausüben.[106] Ebenso gilt: Je größer ein System aufgebaut ist, umso mehr ist es in der Lage, Beeinträchtigungen durch andere Systeme zu kompensieren und sich ggf. gegenüber anderen einwirkenden Systemen zu stabilisieren.[107]

Niemeyer verwendet hierfür den Begriff „Konkurrenzkampf der Systeme".[108] „*Die möglichen Formen des Kampfes reichen von der einseitigen Aufzehrung der umgebenden Systeme über verschiedene Aufzehrungshierarchien bis hin zu äquivalenten Austauschbeziehungen.*"[109] Die Konkurrenzkämpfe basieren auf einem *Gleichgewichtsprinzip*. Immer wenn ein Systemzustand zunimmt, nimmt als Folge der Zustand eines anderen Systems ab. So verbraucht etwa ein Feuer Sauerstoff aus seiner Umgebung, damit es weiterbrennen kann. Das Gleichgewichtsprinzip ist ebenso in Bauprojekten wiederzufinden. Beispielsweise nimmt ein Abfallcontainer eine bestimmte Fläche auf dem Baustellengelände ein. Dadurch nehmen die verfügbaren freien Flächen auf der Baustelle ab. Auch die Ausführung einer Bauleistung basiert auf diesem Prinzip: Ein voranschreitender Bauablauf verbraucht allmählich geplante Zeit- und Kostenreserven. Schreitet der tatsächliche Bauablauf wirtschaftlicher als gedacht voran, bleiben mehr Reserven vom geplanten Bauablauf übrig. Je nach Ausmaß kann die Ausführung aber auch durch Störungen gehemmt werden oder gänzlich zum Erliegen kommen. In solchen Fällen werden Zeit- und Kostenreserven aufgezehrt oder Qualitätsstandards vernachlässigt. Derartige Konkurrenzkämpfe werden als ***Emergenz*** bezeichnet. Laut *von Bertalanffy* steht sie für das „mystisch anmaßende" Herausbilden neuer Strukturen zwischen den Elementen im Zusammenspiel derer Wirkungspotentiale.[110]

---

[102] Das *Ziel* ist in *Abbildung 2-6* durch ein *Kreuz* gekennzeichnet.
[103] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6.
[104] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6; Bossel, 2004: S. 313.
[105] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6.
[106] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6.
[107] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6.
[108] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6-7.
[109] Niemeyer, 1977: S. 6.
[110] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 54-55; Ashby, 1957: S. 136-137.

Das Bestreben nach Aufbau und Stabilisierung deutet auf die Existenz der Interaktionsbeziehungen hin.[111] Ob ein Systemzustand durch eine Beziehung zu- oder abnimmt, hängt, wie das vorausgegangene Würfelbeispiel in *Kapitel 2.1.4* zeigt, von der Art der gesendeten und betrachteten Informationen ab. Informationen, die ausgetauscht werden, können den Zustand des aufnehmenden Systems verstärken oder abschwächen. Hier ist zwischen folgenden Beziehungen zu unterscheiden:

- ***gleichgerichtete Beziehung:*** Größere Eingangssignale verursachen einen größeren Zuwachs eines bestimmten Systemzustands und kleinere Eingangssignale einen kleineren Zuwachs eines bestimmten Systemzustands.[112] Zum Beispiel kann die Produktionsgeschwindigkeit durch einen erhöhten Kapazitätseinsatz zunehmen.
- ***entgegengesetzte Beziehung:*** Größere Eingangssignale verursachen eine Verringerung eines bestimmten Systemzustands. Kleinere Eingangssignale erzielen einen Zuwachs eines bestimmten Systemzustands.[113] Zum Beispiel erfordert ein geringerer Kapazitätseinsatz einen größeren Zeitverbrauch.

Die Dynamik der Systeme beeinflusst die zeitveränderlichen Beziehungen zwischen den Teilen. *Niemeyer* differenziert zwischen ***Interaktions-*** und ***Kombinationsbeziehungen*** (siehe *Abbildung 2-7*).[114]

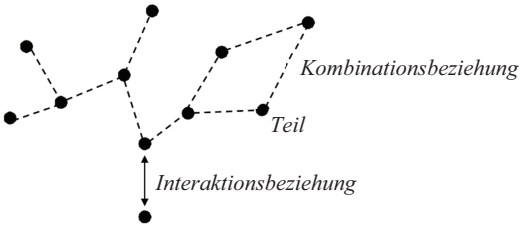


Abbildung 2-7: Systemstrukturen durch Interaktions- und Kombinationsbeziehungen[115]

Eine *Interaktionsbeziehung* stellt eine ***Wechselwirkung*** zwischen zwei Teilen dar. Infolge einer Informationsübertragung sind daraus *Kombinationsbeziehungen* zu anderen Teilen möglich. Die betroffenen Teile können frei angeordnet sein, damit Systeme umstrukturiert werden oder sich neue (Teil-)Systeme bilden.[116] Kombinationsbeziehungen treten im Gegensatz zu Interaktionsbeziehungen synchron auf.

Im Laufe der Zeit beschreiben diese Wirkungsbeziehungen ***Nebenläufigkeiten***. Die Nebenläufigkeit steht für zeitparallele Prozesse, die sich nicht gegenseitig bedingen müssen, aber können.

---

[111] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 6.
[112] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 44. Analog und anschaulich dazu: Bossel, 2004: S. 64-75.
[113] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 44; Bossel, 2004: S. 64-75.
[114] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 3.
[115] Eigene Abbildung.
[116] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 8.

2.1.6 Kausale Wirkungen in Systemen

Der Versuchsaufbau mit den Würfeln in *Kapitel 2.1.4* zeigt, dass sich der Systemzustand durch einen variablen Input ändern kann. Im Inneren des Systems transformieren Prozesse den jeweiligen Input und erzeugen einen Output. Die Wirkung, die den Zustand eines Teils ändert und/oder das Teil zu einer *weiteren* ***Wirkung*** anregt, wird als ***Ursache*** bezeichnet.[117] Sie ist das Resultat einer selbstbedingten Fortschreibung des eigenen alten Systemzustands. Zwischen *Ursache(n)* und *Wirkung(en)* besteht ein ***kausaler Zusammenhang***.[118] Dieser erfolgt in einer *fließenden* Zeitentwicklung und entspricht einem ***kontinuierlichen Prozess*** für ein dynamisches Systemverhalten.

Oftmals ist die Existenz eines Systems zwar bekannt, der innere Aufbau aber unbekannt. Das beobachtete (Teil-)System stellt sich dann als undurchsichtige *Black-Box* dar. Sie ist ein *Modell* für ein *kausales Systemverhalten* (siehe *Abbildung 2-8*).[119]

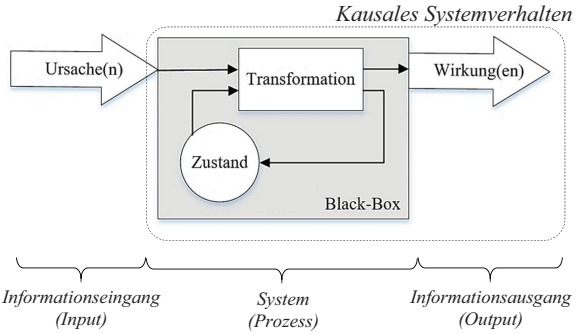


Abbildung 2-8: Systemtheoretische Beschreibung eines kausalen Zusammenhangs[120]

Die innere Struktur einer Black-Box, zwischen Ursache (Informationseingang) und Wirkung (Informationsausgang), kann in einer beliebig mathematischen oder prinzipiellen Form charakterisiert und durch *heuristisches Experimentieren*[121] rekonstruiert werden.[122] Dabei wird nur die Verkettung zwischen Ursache und Wirkung verfolgt.[123]

Ulrich und Probst schreiben: „*Erst das Erkennen der Funktionen, die ein System in seiner Umwelt ausübt, führt uns zum Verstehen der Verhaltensweise des Systems.*“[124] Oft sind Kausalitäten in der Realität miteinander verworren und treten teilweise ***zyklisch*** auf. Bei zyklischen Wirkungen fließt der Output eines Systems (oder ein Anteil des Outputs) als

[117] Vgl. Anschütz, 1974: S. 15.
[118] Vgl. Anschütz, 1974: S. 14-18.
[119] Vgl. Anschütz, 1974: S. 15.
[120] Eigene Abbildung.
[121] Die *Heuristik* ist ein Verfahren, das als wissensbasiertes Probieren bezeichnet wird.
[122] Vgl. Anschütz, 1974: S. 14 i. V. m. Bossel, 2004: S. 16. Die Formel $f(x) = x^2$ ist z. B. auch eine *Black-Box*.
[123] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 45-46.
[124] Ulrich/Probst, 1995: S. 52.

selbsterzeugter Input zurück.[125] Eine solche Wirkungsbeziehung wird als *geschlossener Wirkungsweg*[126] und ihre Informationsflüsse als ***Rückkopplung***[127] bezeichnet.

Allgemein können zwei verschiedene Informationseingänge ursächlich für ein Systemverhalten sein:[128]

1. ***Steuern*** durch Einwirkungen aus der Umwelt,[129]
2. ***Regeln*** durch Rückkopplungen, bei dem sich das System selbst einen Input zuführt.[130]

In dieser Arbeit wird das *Steuern* als eine externe Wirkung aus der Umwelt auf ein System verstanden, während das *Regeln* eine interne Wirkung eines Systems darstellt. Auf Baustellen werden bspw. Arbeitskräfte durch Bauleiter oder Poliere *gesteuert*. Die Arbeitskräfte *regeln* sich selbst, da sie ihre Arbeitsabläufe eigenständig verrichten. Solche sich selbst regelnden Systeme sind danach bestrebt, den eigenen Zustand aufrechtzuerhalten. Sie sind ***selbstorganisierende Systeme***.[131]

Der Vorgang, neue auf alte Systemzustände aufzubauen, wird als ***Autokorrelation*** bezeichnet. Das Prinzip der Autokorrelation basiert auf mindestens zwei Systemzuständen, die im Gegensatz zur Kausalität nicht zwangsläufig, sondern naheliegenderweise aufeinander folgen.[132]

Von Bertalanffy rät davon ab, einzelne Elemente innerhalb eines Systems isoliert zu betrachten, wenn kausale Zusammenhänge nachvollzogen werden sollen.[133] Vielmehr sind ganzheitliche Beobachtungen mit möglichst allen relevanten Wechselwirkungen innerhalb eines Systems durchzuführen.[134] Denn die Bestimmung einer einzelnen, kausalen Ursache ist kaum möglich, wenn ein System mehrere und/oder rückgekoppelte Eingangsgrößen besitzt. In solchen Fällen liegt eher eine ***Korrelation*** vor. Sie beschreibt proportionale Zusammenhänge zwischen *bestimmten* messbaren oder vermuteten Zuständen.

Anders als die Autokorrelation knüpft die Korrelation nicht zwangsläufig an eigene vorausgegangene Zustände an. Sie setzt keinen kausalen Zusammenhang voraus, sondern tritt ggf. rein zufällig oder durch unerkannte zyklische Wirkungen auf. Eine Korrelation kann ein Hinweis auf einen kausalen Zusammenhang sein, muss es aber nicht.

---

[125] Aufgrund einer systeminternen Wirkungsrückführung ist es z. B. möglich, dass der eigene, vorhandene Systemzustand infolge einer Input-Output-Transformation mitberücksichtigt wird. Vgl. Bossel, 2004: S. 129 ff.

[126] Dagegen sieht der „offene Wirkungsweg" keine Wirkungsrückführung vor. Vgl. DIN IEC 60050-351, 2014: S. 137-138.

[127] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 32; Bossel, 2004: S. 45 ff.

[128] Vgl. Bossel, 2004: S. 40 ff.

[129] „*Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.*" DIN IEC 60050-351, 2014: S. 137.

[130] „*Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.*" DIN IEC 60050-351, 2014: S. 136.

[131] Selbstorganisierende Systeme besitzen eine Autonomie in ihrer Handlungsfreiheit. Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 256 ff.

[132] In *Kapitel 2.1.4* basiert die Erwartungswertberechnung beim Würfelbeispiel ebenfalls auf einer *Autokorrelation*.

[133] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 45.

[134] Vgl. von Bertalanffy, 1968: S. 45; Ulrich/Probst, 1995: S. 36-49.

Nur die wenigsten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sind *monokausal*. Eine Monokausalität besteht, wenn eine einzelne Ursache eine weitere bestimmte Ursache erzeugt.[135] *Ulrich und Probst* schreiben, dass Menschen häufig in trivialen monokausalen Strukturen denken.[136] Als Beispiel nennen sie typische Erklärungs- oder Bewertungsabsichten: „*Wenn etwas schief geht, muss doch jemand daran schuld sein! Auch bei unserem eigenen zielbewussten Handeln denken wir oft so, indem wir von einer einzelnen Maßnahme, die wir treffen, nichts anderes erwarten als einen ganz bestimmten Effekt* [...].“[137] Hieraus leiten sie hintereinandergeschaltete monokausale Zusammenhänge als ***lineare Kausalketten*** her.[138] Eine solche Kausalkette entspricht einer nicht aufzuhaltenden Handlungsabfolge, die nur eine unausweichliche bzw. eine *geführte Richtung* konsequent verfolgt. Weil derartige Kausalketten in der Realität nur selten vorkommen, basieren sie meist auf beabsichtigten Einschätzungen und führen gleichzeitig häufig zu ungenauen Annahmen.[139]

2.1.7 Produktivität und Produktion

Die Wirkungsstärke von Prozessen bzw. die Intensität der elementaren Transformation definiert sich durch die ***Produktivität***. Die Produktivität stellt die Steigung der Übergangsfunktion dar, die für einen zeitdiskreten Beobachtungszustand gilt.

Die Überführung in einen *Prozess* erfolgt erst, wenn im Sinne einer *Autokorrelation* der vorausgegangene *Eigenzustand* mitberücksichtigt werden würde. Somit lässt sich die Produktivität als Übergangsfunktion einer Black-Box *ohne* eigene Zustands- und Zeitanteile erklären (siehe *Abbildung 2-9*).

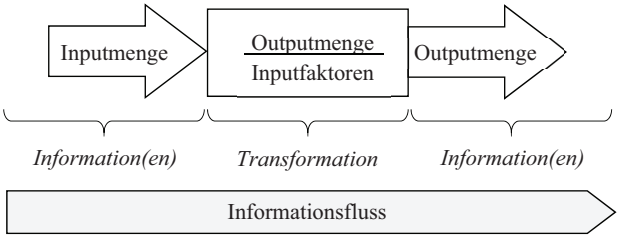


Abbildung 2-9: Grafische Darstellung der Produktivität[140]

Die Produktivität ist ein betriebswirtschaftlicher Begriff. Sie beschreibt ein Verhältnis zwischen produzierten Gütern oder erbrachten Dienstleistungen – der ***Outputmenge*** (Ausbringungsmenge) – sowie dem Produktionsmittel-Einsatz – der ***Inputmenge*** (Einsatzmenge).[141]

[135] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 37.
[136] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 37.
[137] Ulrich/Probst, 1995: S. 37.
[138] Vgl. Ulrich/Probst: 1995: S. 37.
[139] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 36-56.
[140] Eigene Abbildung.
[141] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 16.

Grundsätzlich bietet es sich an, Mengen in numerischen Verhältniszahlen auszudrücken, wenn ein Sachverhalt unklar ist. Das kann dann erforderlich sein, wenn

- bestimmte Zusammenhänge korrelieren,
- unterschiedliche und/oder viele Dinge in Mengen zusammengefasst sind oder
- sich bestimmte Sachverhalte in der Detaillierungstiefe nur unscharf beschreiben lassen.

Dies gilt für die Produktivität. Sie kann wirtschaftliche Bewertungsgrößen als Verhältniszahlen widerspiegeln, die sich analysieren und bewerten lassen.[142]

Die Gesamtproduktivität eines Systems resultiert aus der Summe der ***Produktionsfaktoren***, die durch die Art der Inputmenge (z. B. Arbeit, Kapital, Material oder sonstige Einsatzfaktoren) unterschieden werden können.[143] Die Input- und Outputmengen lassen sich in verschiedenen *Einheiten* ausdrücken, wie z. B. [Stk], [m²] oder [h].

Aus der Gegenüberstellung der Input- und Outputmengen ergibt sich jeweils eine Verhältniszahl ohne Einheit (z. B. Produktivität = *0,75*). In betriebswirtschaftlichen Berechnungen sind solche Verhältniszahlen an geldabhängige Variablen (Preise oder Kosten etc.) gekoppelt, um Aussagen über wirtschaftliche Betriebsergebnisse zu erlangen.[144]

Sobald ein einzelner Produktionsfaktor einer gesamten Outputmenge gegenübergestellt wird, liegt eine ***Teilproduktivität*** vor.[145] Aufgrund verschiedener Informationen lässt sich daraus eine Verhältniszahl mit einer Einheit bilden (z. B. Teilproduktivität = *0,75 m²/h*). Die drei wesentlichen Teilproduktivitäten sind gegliedert in

- ***Arbeitsproduktivität:*** Input- bzw. Produktionsfaktor „Arbeit“ (z. B. die Mitarbeiteranzahl oder Arbeitsstunden);
- ***Kapitalproduktivität*:** Input- bzw. Produktionsfaktor „Kapital“ (z. B. investiertes Kapital oder Maschinenstundenzahlen);
- ***Materialproduktivität*:** Input- bzw. Produktionsfaktor „Material“ (z. B. Materialeinsatz).[146]

Dellmann und Pedell merken an, dass der Nachteil einer Teilproduktivität darin liegt, dass nur ein einzelner Produktionsfaktor stellvertretend für die Summe aller möglichen Produktionsfaktoren angenommen wird, was ggf. zu Fehlinterpretationen führt.[147] Teilproduktivitäten kommen regelmäßig aufgrund definierter Systemgrenzen zustande.

Hofstadler beschreibt, dass die Produktivität die „[…] *wesentliche Kennzahl zur Beurteilung der Ergiebigkeit von einzelnen Arbeiten oder des gesamten Produktions- bzw. Wirtschaftsprozesses* [ist].“[148] Demnach kann die Produktivität durch erwartete und geleistete Bautenstände (im baubetrieblichen Sinne einer Fertigung) oder durch erwartete und erarbeitete Erlöse (im baubetriebswirtschaftlichen Sinne einer Kostenbetrachtung) festgestellt

[142] Vgl. Hofstadler, 2014: S. 1.
[143] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 17, 21. Siehe auch *Kapitel 3.2.1*.
[144] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 16-17.
[145] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 16.
[146] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 21-25.
[147] Vgl. Dellmann/Pedell, 1994: S. 16-17.
[148] Hofstadler, 2014: S. 15.

werden. Da in dieser Arbeit keine Kostenbetrachtung stattfindet, wird unter Produktivität vielmehr die *baubetriebliche Sichtweise* betrachtet, was im Wesentlichen der *Arbeitsproduktivität* entspricht.

Von ***Produktivitätsverlusten*** ist die Rede, wenn eine zuvor gewollte bzw. geplante Produktivität nicht in einer tatsächlichen Umsetzung erreicht wird (siehe Störungen in *Kapitel 3.4.2*). In solchen Fällen wird auch von *Minderleistungen* oder *Intensitätsverlusten* gesprochen.

Die Produktivität ist von der ***Produktion*** abzugrenzen. Die Produktion umfasst die Herstellung von Gütern oder Dienstleistungen durch die Kombination der Produktionsfaktoren,[149] um Produkte erzeugen zu können. Bei der Ausführung von Bauleistungen werden bspw. Bauteile als Produkt erzeugt.

Für die Produktion wird eine bestimmte Zeitdauer benötigt. Sie betrifft aber nicht die *inhaltliche* Durchführung des Herstellungs*prozesses*, sondern ist der dafür notwendige Bedarf der Ressource „Zeit". Die Geschwindigkeit der Produktion resultiert aus der Produktivität der erforderlichen Herstellungsprozesse, die von den Produktionsfaktoren (Mensch, Material, Geräte) und von Umgebungsverhältnissen abhängig sind.

[149] Vgl. Brüssel, 2007: S. 227.

2.1.8 Störung und (Gegen-)Lenkung

Wenn eine *gewollte Ordnung* in eine *Unordnung* übergeht,[150] wird die *Abweichung* als ***Störung*** wahrgenommen. Eine Störung ist immer ein dynamischer Prozess, der unter einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftreten kann, aber nicht auftreten muss. In ihrer Dynamik können kontinuierlich wirkende Rückkopplungen im Sinne einer *Autokorrelation*[151] ursächlich dafür sein, dass weitere Abweichungen entstehen. Eine Störung baut ein eigenes *Wirkungspotential* – das ***Störungspotential*** – auf, das sich fließend über die Zeit verändert und kausal weiterentwickelt. Demnach umfasst das Störungspotential unendlich viele *infinitesimal kleine Störungsanteile* fortgeschriebener „Folgeursachen".

In den *Abbildungen 2-10 und 2-11* werden die infinitesimal kleinen Störungsanteile durch Kreise bzw. durch gekrümmte Pfeile symbolisiert. Insgesamt beginnt eine vollständige Störung ab dem Eintritt ihrer ursächlichen Einwirkung(en) und endet erst, wenn ein gewollter Systemzustand erreicht wurde. Der Beginn einer Störung ist im Vorfeld häufig nicht abschätzbar.

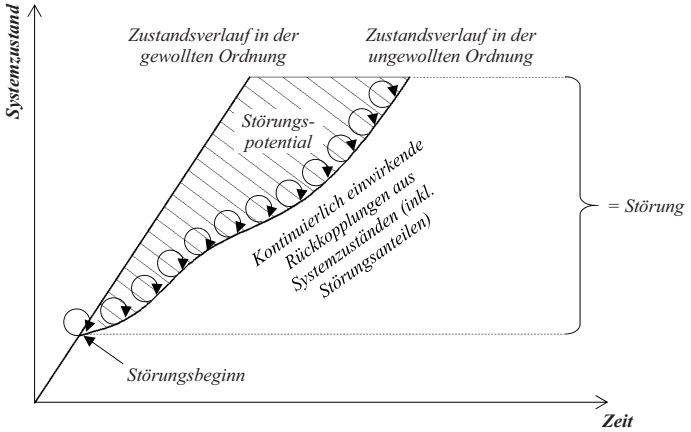


Abbildung 2-10: Qualitative Entwicklung des Systemzustands infolge einer Störung[152]

Ulrich und Probst ordnen die Steuerung und die Regelung unter dem Begriff ***Lenkung*** ein.[153] Sie dient dazu, ein System unter Kontrolle zu halten, sobald Störungen das Systemverhalten beeinflussen (siehe *Abbildung 2-11*).[154] Um die Kontrolle über einen Systemzustand halten zu können, muss ein Ist-Zustand mit einem gewünschten Soll-Zustand *verglichen* werden, wodurch sich eine Abweichung für das Lenken identifizieren lässt. Um ein System zu steuern, ist es wichtig zu wissen, was der zu vergleichende Zustand darstellt und wie er in eine Richtung gelenkt werden kann. Zum Beispiel kann der geplante Erlös oder die Bauzeit den *angepeilten Zustand* während der Bauausführung darstellen. Er kann durch viele verschiedene

[150] Siehe *Kapitel 2.1.4*.
[151] Siehe *Kapitel 2.1.6*.
[152] Eigene Abbildung.
[153] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 78-89.
[154] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 81.

Größen beeinflusst werden. Deshalb sollte eine gezielte Steuerung in einem ganzheitlichen Ansatz erfolgen.[155]

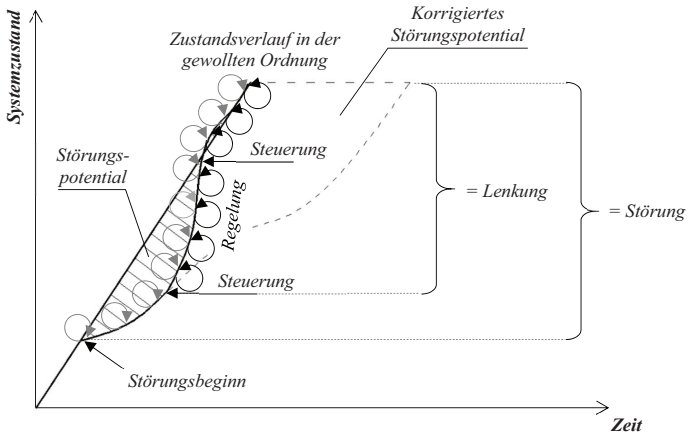


Abbildung 2-11: Qualitative Darstellung zur Entgegenwirkung einer Störung durch Lenkung[156]

2.1.9 Komplexität

Sobald ein System immer weiter zerlegt wird, steigt nicht nur die Anzahl der Teile, sondern oftmals auch die ***Varietät***. Sie definiert die Anzahl der unterschiedlich gearteten, nicht miteinander vergleichbaren Teile und Wirkungen innerhalb eines Systems.[157] Die Varietät kann zu dynamischen nichtlinearen Wechselwirkungen führen, die mitunter in ihrer Intensität und Ausprägung variabel sind.[158] Hieraus lässt sich die ***Komplexität*** herleiten.[159] Sie beschreibt die „[…] *Fähigkeit eines Systems,* [das] *in einer gegebenen Zeitspanne eine große Zahl von verschiedenen Zuständen annehmen* [kann].“[160]

Die Komplexität ist auch ein Ausdruck für die Überschaubarkeit der Interaktionen dynamischer Systeme.[161] Komplexität ist gekennzeichnet durch *nicht trivial* erscheinende Zusammenhänge und macht sich häufig durch ein emergentes Systemverhalten bemerkbar, bei dem neue Ordnungsstrukturen entstehen und sich Abweichungen von gewollten Systemzuständen herausbilden können. Um die Komplexität eines Systems zu verstehen, ist insbesondere die Erfassung der Systemstruktur wichtig.[162] Das heißt, die *gegenwärtige Ordnung*[163] muss verstanden werden, um die Komplexität zu erfassen.

---

[155] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 88; Bossel, 2004: S. 49.
[156] Eigene Abbildung.
[157] Vgl. Ashby, 1957: S. 126.
[158] Vgl. Ashby, 1957: S. 136-137.
[159] Vgl. Ashby, 1957: S. 138-139, 141; Ulrich/Probst, 1995: S. 66 ff., 136 ff., 251-253. Die *Komplexität* beschreibt die Verhaltensmöglichkeiten der Teile. Die ***Kompliziertheit*** beschreibt die Art der Zusammensetzung und Verschiedenheit der Systemstruktur. Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 61.
[160] Ulrich/Probst, 1995: S. 58.
[161] Vgl. Ulrich/Probst, 1995: S. 108-109; Bossel, 2004: S. 22.
[162] Vgl. Bossel, 2004: S. 113.
[163] Siehe *Kapitel 2.1.4*.

Ein System, dessen zeitveränderliches Verhalten *nur* vom Systemzustand und von *nicht zufälligen* Umwelteinwirkungen abhängig ist, wird als ***deterministisches System*** bezeichnet.[164] Entgegen alten Kenntnisständen hebt *Bossel* hervor, dass *nicht* das Verhalten aller dieser deterministischen Systeme rückwärts gerechnet werden kann, um eine eindeutige Ausgangssituation zu ermitteln.[165] Demnach können sich selbst bei einigen deterministischen Systemen über die Zeit unterschiedliche Zustandspfade einstellen, wodurch die früher angenommene Vorhersagbarkeit dieser Systeme zerfällt.[166]

2.1.10 Modellbegriff

In den vorausgegangenen Unterkapiteln wurden systemtheoretische Vorgehensweisen beschrieben, um komplexe Gegebenheiten eines realen oder erdachten Sachverhalts als System zu erfassen. Die abstrakte Nachbildung eines Systems mit seiner Umwelt, seinen Subsystemen, den Elementen, deren Zustandsbeschreibung sowie Beziehungen und Wirkungszusammenhängen wird als ***Modellierung*** bezeichnet, sobald daraus ein ***Modell*** hervorgeht, das durch systemspezifische Informationen formuliert und/oder anderweitig exemplarisch nachgebaut wird. Ein Modell ist somit ein Abbild von einem System.

Ein vorhandenes bzw. ein erschaffenes Modell ist ebenfalls ein System, da es in einer messbaren Form vorliegt.[167] Da ein Modell immer nur ein vereinfachter Ausschnitt eines Sachverhalts ist, soll es nur ***einem bestimmten Zweck*** dienen, der zu einem neuen Erkenntnisgewinn beiträgt und/oder eine bestimmte Arbeitsweise unterstützt.[168] In *Kapitel 2.2.3* werden verschiedene Modellarten vorgestellt.

2.1.11 Das Bauprojekt als komplexes System

Bauprojekte können sehr komplexe Systeme sein. Die Komplexität entsteht hauptsächlich aus dem Zusammenspiel zwischen verschiedenen Planungs- und Ausführungsleistungen, die durch projektorganisatorische Tätigkeiten oder äußere Einflüsse aus der Baustellenumgebung bedingt werden. Auf ein Bauprojekt nehmen durchaus auch Umstände Einfluss, wie Vergütung, Liquidität, Bauentwurf (Ausstattung und Geometrie), Qualitätsanforderungen, Know-how des Unternehmens, rechtliche Aspekte, Zeitkontingente, Fertigungsverfahren, Beschaffungs- und Baustellenlogistik sowie u. a. Bedingungen öffentlicher Behörden als auch Einwirkungen durch Dritte.

Laut *Berger* sind bei „[…] *einer Baustelle, die wegen vielfältig beteiligter Personen ein komplexes Sozialsystem und angesichts der zu organisierenden Planungs- und Baumaßnahmen ein in gleicher Weise kompliziert strukturiertes Dachsystem darstellt, zeitliche Abwicklungsstörungen nahezu unvermeidbar.*“[169] Die Komplexität, die bei der Durchführung eines Bauprojekts entstehen kann, lässt sich anhand der Aufbau- und Ablaufstruktur verdeutlichen (siehe *Kapitel 2.1.3*).

---

[164] Vgl. Bossel, 2004: S. 49.
[165] Vgl. Bossel, 2004: S. 49.
[166] Vgl. Bossel, 2004: S. 49.
[167] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 35, 58-61; siehe „Modell“ in *VDI-Richtlinie 3633*. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 19.
[168] Vgl. Košturiak/Gregor, 1995: S. 6; Bossel, 2004: S. 51; VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3; siehe „Modell“ *Anmerkung 1* und *Anmerkung 2* sowie „Simulationsmodell“ in: VDI-3633, 2018: S. 19, 29.
[169] *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 6, Rdn. 1.

Aufbaustruktur:

Die *Aufbaustruktur* bildet sich hauptsächlich aus der Gesamtheit der am Bauprojekt beteiligten Interessengruppen bzw. Stakeholder[170]. Hervorzuheben sind besonders die planenden sowie die ausführenden Unternehmen und der Bauherr mit seinen Erfüllungsgehilfen. Innerhalb eines Bauprojekts sind verschiedene Unternehmereinsatzformen möglich, die aus der jeweiligen Art der Vergabe (z. B. Einzelvergabe oder Generalunternehmervergabe) resultieren können. *Abbildung 2-12* zeigt die „klassische Dreiteilung":

1. ***Auftraggeber*** (z. B. Bauherr, Generalunternehmer, -übernehmer),
2. ***Planer*** (z. B. Architekt, Fachplaner, Projektsteuerer),
3. ***Auftragnehmer*** (z. B. Generalunternehmer, Subunternehmer).

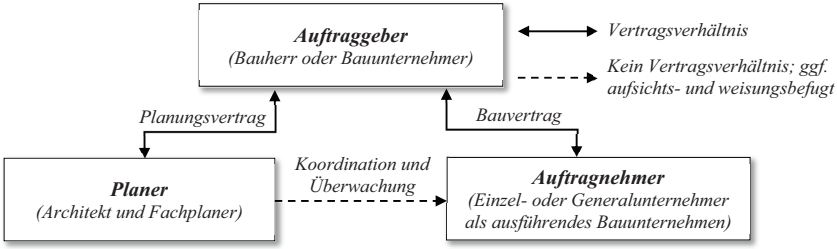


Abbildung 2-12: Klassische Dreiteilung von Bauprojekten[171]

Bei der Herstellung eines Bauwerks können zwischen *50* und *100* Institutionen an Hochbauprojekten beteiligt sein, die zeitweise unterschiedliche, aufeinander abgestimmte Aufgaben erledigen.[172] Bei Großbauprojekten sind die genannten Zahlen ggf. umfangreicher.[173]

Ablaufstruktur:

Mit der Herstellung des Bauwerks verfolgen der Bauherr und alle projektangehörigen Unternehmen ein *gemeinsames* Ziel. Ihre Tätigkeiten sind auf Teilziele begrenzt, die sie selbstorganisierend in einem bestimmten Zeitraum erfüllen. Dabei gehen sie ihren eigenen Interessen nach. Zum Beispiel sind sie bestrebt, ihre jeweiligen vertraglichen Pflichten zu erfüllen und gleichzeitig ihren Termin- und Kostenrahmen einzuhalten. Während der Projektabwicklung bilden diese Aufgaben eine *Ablaufstruktur*. Darin enthalten sind u. a. verschiedene Ausführungsprozesse, die in einer sachlogischen Reihenfolge ineinandergreifen. Daher müssen die unterschiedlichen Aufgaben der beteiligten Gewerke untereinander abgestimmt sein, um die Ziele zu erreichen. Die Gesamtheit (oder eine Teilmenge) aller abgewickelten Ausführungsprozesse wird, unter Beachtung ihrer Wirkungsbeziehungen, als ***Bauablauf*** bezeichnet. Gerade bei Hochbauprojekten ist mit einer Vielzahl verschiedener

[170] Ein *Stakeholder* ist eine „*Person, Gruppe oder Organisation, die an irgendeinem Aspekt des Projekts interessiert ist oder diesen beeinflusst, davon betroffen ist oder sich davon betroffen fühlen kann*". DIN ISO 25100, 2016: S. 8.
[171] I. A. a. Racky, 1997: S. 9.
[172] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 17.
[173] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 17.

Gewerke zu rechnen. Zur Übersicht stellt *Racky* typische *Gewerkegruppen* für Büro- und Verwaltungsgebäude vor (siehe *Tabelle 2-2*).

Tabelle 2-2: Übersicht möglicher Gewerkegruppen für Büro- und Verwaltungsgebäude[174]

Rohbau	Gebäudehülle	Gebäudetechnik	Ausbau
Baustelleneinrichtung	Dachabdichtungs-arbeiten	raumlufttechnische Anlagen	Estricharbeiten
Erdarbeiten	Dachdeckungsarbeiten	Heizanlagen	Innenputz
Verbauarbeiten	Klempnerarbeiten	Sanitäranlagen	Fliesen- und Plattenarbeiten
Mauerarbeiten	Fenster und Außentüren	Dämmarbeiten	Natur- und Werksteinarbeiten
Stahlbetonarbeiten	Metallfassaden	Feuerlöschanlagen	Metallbauarbeiten
Zimmer- und Holzbauarbeiten	Steinfassaden	elektrotechnische Anlagen	Tischlerarbeiten
Stahlbauarbeiten	Außenputz und -anstrich	Blitzschutzanlagen	Trockenbauarbeiten
Abdichtungsarbeiten	Rollladenarbeiten	zentrale Leittechnik	Wandverkleidungen
Gerüstarbeiten		Aufzugsanlagen	Bodenbeläge

Berg betrachtet Bauabläufe aus produktionstechnischer und systemtheoretischer Sicht. Er beschreibt u. a. die *Aufbauorganisation*.[175] Jede Baustelle ist ein komplexes System mit einer Vielzahl von Elementen, Beziehungen und Wirkungsgrößen, die jeweils eine bestimmte ***Arbeitsaufgabe***[176] im Bauablauf erfüllen; sei es der einzelne Arbeitsplatz, ein Bauprojekt, ein Unternehmen oder ein Wirtschaftszweig.[177]

Jede Arbeitsaufgabe ist ein *Arbeitssystem*, bei dem Mensch und Betriebsmittel unter dem Einfluss von Umweltbedingungen zusammenwirken.[178] Ein Arbeitssystem umfasst dynamische sowie zustandsändernde Prozesse, die Arbeitsgegenstände (z. B. Baustoffe, Bauhilfsstoffe, Informations- und Datenträger) während einer Arbeitsaufgabe verändern oder verwenden.[179]

„*Die **Eingabe eines Arbeitssystems** besteht im allgemeinen aus Arbeitsgegenständen, aber auch aus Menschen, Informationen und Energie, die im Sinne der Arbeitsaufgabe in ihrem Zustand, ihrer Form oder Lage verändert oder verwendet werden sollen.*“[180] Demgegenüber besteht die „[…] ***Ausgabe eines Arbeitssystems*** […] *im allgemeinen aus Arbeitsgegenständen, aber auch aus Menschen und Informationen, die im Sinne der Arbeitsaufgabe verändert oder verwendet wurden.*“[181]

[174] I. A. a. Racky, 1997: S. 39.
[175] Vgl. Berg, 1984: S. 24, 48, 51. Ähnliche Begriffsdefinition: „Aufbaustruktur“. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 5.
[176] Zum Beispiel: „*Beton verdichten, Stahl schneiden und biegen, Kellerwand mauern, Rechnungen prüfen und kontieren.*“ Berg, 1984: S. 53.
[177] Vgl. Berg, 1984: S. 24, 48, 51.
[178] Vgl. Berg, 1984: S. 52 ff.
[179] Vgl. Berg, 1984: S. 54.
[180] Berg, 1984: S. 53.
[181] Berg, 1984: S. 54.

Über einen Zeitraum betrachtet, kann ein Arbeitssystem über die internen Prozesse ein dynamisches Verhalten erzeugen, das als Arbeitsablauf bezeichnet wird. Demnach ist der Arbeitsablauf „[…] *die räumliche und zeitliche Folge des Zusammenwirkens von Mensch und Betriebsmittel mit der Eingabe, um diese gemäß der Arbeitsaufgabe zu verändern oder zu verwenden.*“[182]

Bis zur Fertigstellung werden alle erforderlichen Arbeitsabläufe als *Gesamtablauf* bezeichnet.[183] Den Gesamtablauf einer Baumaßnahme definiert *Berg* als *Bauablauf*.[184] Es ist möglich, den Gesamtablauf in detaillierte ***Ablaufabschnitte*** und in logisch zusammenhängende Teile zu zerlegen und zu ordnen. Nach REFA-Methodenlehre können die Ablaufabschnitte in sieben *Hierarchiestufen*[185] gegliedert werden (siehe *Abbildung 2-13*).

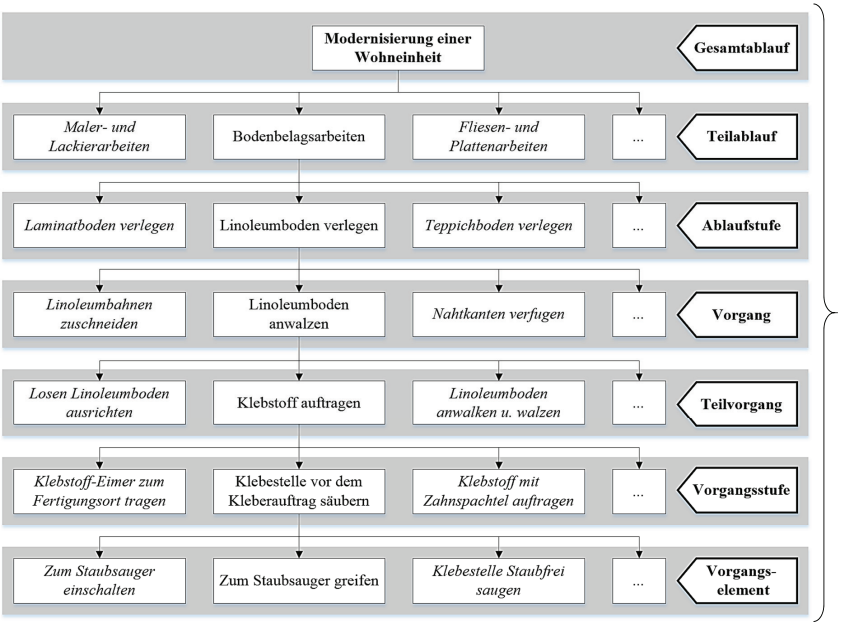


Abbildung 2-13: Ablaufabschnitte nach REFA – Modernisierung einer Wohneinheit[186]

Zusammenfassend bildet ein Bauablauf die zeitliche Folge von Bauzuständen in Form von Vorgängen. Der ***Vorgang*** der Tätigkeit einer Arbeitsaufgabe innerhalb eines Ablaufabschnitts besitzt einen bestimmten Anfang sowie ein Ende und stellt eine Teilleistung zur Erstellung des Projekts der erforderlichen Gesamtausführung dar.[187]

[182] Berg, 1984: S. 53.
[183] Vgl. Berg, 1984: S. 60.
[184] Vgl. Berg, 1984: S. 54-58.
[185] Vergleichbar mit „Systemebenen“ in *Kapitel 2.1.1*.
[186] Eigene Darstellung i. A. a. Berg, 1984: S. 58.
[187] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 15 i. V. m. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 20 ff.

2.2 BIM und Simulation

2.2.1 Building Information Modeling

Im Vordergrund von BIM-Modellen steht (i. d. R.) ein virtuelles ***Gebäudemodell***[188], das sich aus einzelnen digitalen ***Bauteilmodellen*** zusammensetzt. Letztere bestehen ebenfalls aus detaillierteren Bauteilmodellen in hierarchischen Modellstrukturen, wie das Dach eines Hauses, der Dachstuhl des Dachs, ein Balken des Dachstuhls.[189] Alle Bestandteile des Gebäudemodells sind gemäß ihrer jeweiligen Bestimmung aufgebaut und miteinander vernetzt.

Häufig wird eine 3D-Darstellung verwendet, um die Geometriedaten realitätsnah zu visualisieren. Neben ihrer Geometrie können Bauteilmodelle weitere bauteilspezifische Eigenschaften besitzen, die der Anwender aufruft oder erweitert bzw. modelliert. Die bauteilspezifischen Eigenschaften sind z. B. Bauteilattribute, wie das Eigengewicht, oder anderweitig angehängte Dateien, wie PDF-Pläne. Daneben lassen sich prozessbezogene Daten in Prozessmodellen zusammenfassen, die zur Vorgangsberechnung mit den Bauteilmodellen verknüpft werden.[190]

Ein BIM-Modell ist objektorientiert aufgebaut, so dass jedes Modell der *Objektinstanz* einer bestimmten *Klasse* entspricht.[191] Beispielsweise kann ein Bauprojekt, ein Unternehmen, eine Gipskartonwand, eine Deckenplatte, eine Fliese oder eine Putzschicht u. v. m. jeweils eine klassifizierte Objektinstanz sein. Die Eigenschaften dieser Objektinstanzen sind über Attribute abruf- und veränderbar. Sie entsprechen den jeweiligen Modelleigenschaften.

Wegen ihrer Modelleigenschaften sind BIM-Modelle eine Art Datenspeicher.[192] In *Abbildung 2-14* ist das BIM-Modell als zusammenhängende und ***topologisch verteilte Datenbankstruktur*** zu sehen,[193] die die jeweiligen Datensätze „wie eine Tabelle“ speichern kann. Der Zugriff auf die Daten wird i. d. R. über die Geometrie des Gebäudemodells ermöglicht. Mithilfe der 3D-Visualisierung kann der Anwender sich durch die Datenstrukturen navigieren. *Bormann* versteht unter BIM ein digitales Abbild eines Bauwerks mit großer Informationstiefe.[194]

---

[188] Unter anderem auch: *Geometriemodell* oder *Bauwerksinformationsmodell*.

[189] Vgl. Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: S. 86.

[190] Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 16; Tauscher/Smarsly/König/Beucke, 2014: 745-752; Lu/Olofsson, 2014: S. 73-83.

[191] Die Begriffe *Klasse*, *Objekt*, *Instanz*, *Attribute* und *Parameter* stammen aus der Informatik. Mit einer ***Klasse*** lässt sich ein modellspezifisches Schema definieren. Eine Klasse entspricht einer Modellvorlage, die die Eigenschaften bzw. Merkmale eines bestimmten Modelltyps formal vorstrukturiert. Durch eine Klasse werden verhaltens- sowie modelltypische Merkmale klassifiziert. Aus diesem Schema lassen sich konkrete ***Objekte*** ableiten, die aufgrund der Klassifizierung gemeinsame, vergleichbare Merkmale besitzen. Somit können aus einer Klasse mehrere Objekte im Sinne einer mathematischen Menge gebildet werden. Davon ist die einzelne, konkrete Objektversion eine ***Instanz***. Die Eigenschaften der Instanzen sind über ***Attribute*** abrufbar. Obwohl die Objektinstanzen einer bestimmten Klasse vergleichbare Attribute besitzen, können die Werte der Attribute unterschiedlich gestaltet sein (bspw. Objekttyp: Dach; Objektinstanz: Version 1; Attribut: Dachfarbe = „rot“; Objekttyp: Dach; Objektinstanz: Version 2; Attribut: Dachfarbe = „schwarz“). ***Parameter*** sind Variablen für die Entgegennahme von wertverändernden Funktionen. Beispielsweise wäre das „x“ ein Parameter einer beliebigen Relation bzw. Funktion „f(x)“. Vgl. Fischer/Hofer, 2008: S. 70, 409, 452, 611.

[192] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 459.

[193] I. A. a. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 4-5, 7-8.

[194] Vgl. Borrmann, 2015: S. 602.

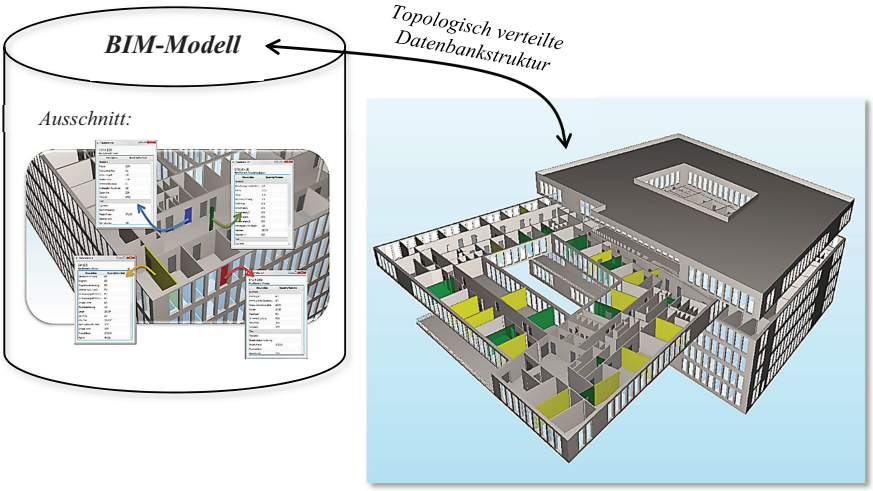


Abbildung 2-14: Beispiel eines BIM-Modells als vernetzter Datenspeicher[195]

Im „Normalfall" wird ein BIM-Modell aufgrund seiner dreidimensionalen Darstellung als ***3D-Modell***[196] wahrgenommen. Sobald diese Bauteilmodelle eigene Zeitanteile – etwa aus Terminplänen – erhalten, werden sie als ***4D-Modelle***[197] bezeichnet. Bei ***5D-Modellen***[198] würden die oben gezeigten Datenspeicher neben den zusätzlichen Zeit-Daten auch Kosten-Daten enthalten. Im Fachjargon sind weitere „endlose" n-Dimensionen für sog. *nD-Modelle* möglich.

4D-Modelle lassen sich in ***4D-Visualisierungen***[199] grafisch darstellen. Letztere sind *zeitproportionale* 3D-Animationen, bei denen die Bautätigkeiten durch sequenziell eingeblendete Bauteilmodelle verdeutlicht werden. Bei der Verwendung von Kosten ist eine farbige Abbildung der Bauteilmodelle möglich, damit sich mit einer Farbskala ein schneller Überblick über die Kostenverteilung im BIM-Gebäudemodell abzeichnet. In diesem Fall handelt es sich im Fachjargon um eine *5D-Visualisierung*. Unabhängig von einer Kostendarstellung können Einfärbungen überdies genutzt werden, um unterschiedliche Bautenstände über die Zeit o. Ä. darzustellen.

Ein BIM-Modell wird zudem anhand seines Modellzustands unterschieden. Hierfür sind die im Modell enthaltenen Informationen maßgeblich. Das sog. *As-Planned-Modell* wird als

---

[195] Eigene Darstellung (Screenshot vom entwickelten Simulator).
[196] Ein *3D-Modell* ist nach *VDI-Richtlinie 2552-2* eine „*dreidimensionale digitale Abbildung eines Bauwerks*". VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 2.
[197] Ein *4D-Modell* ist ein „*erweitertes 3D-Modell, bei dem Modellelemente den Vorgängen eines Terminplans zugeordnet werden*". VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 2.
[198] Ein *5D-Modell* ist ein „*Bauwerksmodell, bei dem Zeiten (4D) und Kosten (5D) mit Objekten eines 3D-Modells verknüpft werden*". VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 2.
[199] Eine *Visualisierung* ist die „*bildliche Darstellung eines geplanten Bauwerks* […]". VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 7.

Ergebnis der BIM-Planung bezeichnet – es bildet den letzten Planungsstand ab.[200] Das sog. *As-Built-Modell* wird mit Ist-Informationen der Ausführung angereichert, bis es ein „vollständiges" Abbild der Wirklichkeit inkl. aller Änderungen darstellt.[201] Laut *Fischer und Jungedeitering* ist in diesem Modell die Ausführungsplanung enthalten.[202] Die Modelle sollen zur Abrechnung in einem Soll-Ist-Vergleich gegenübergestellt werden.[203] Den BIM-Modellen wird ein zugrunde liegender Soll- und Ist-Zustand unterstellt. Doch ist noch nicht hinreichend geklärt, in welcher Form ein zeitlicher Soll-Ist-Vergleich erfolgen soll und inwieweit dieser überhaupt geeignet ist, um baubetriebliche Behinderungsfolgen baurechtlich zu bewerten.[204]

Insgesamt ist die Definition von Building Information Modeling (noch) nicht einheitlich geklärt. Einige Anwender betrachten BIM lediglich als 3D-Visualisierung von virtuellen Gebäuden und ihren Bauteilen. Andere sehen in dem „M" von BI**M** eine *Methode* oder ein *Management*.[205] Sie verstehen BIM-Modelle eher als kollaboratives Modellierungs- und/oder Kommunikationsmittel. Dazu lässt sich die Gebäudegeometrie für die Objekt- und Fachplaner in verschiedene Fachmodelle voneinander abgrenzen.[206] Diese Themen werden hier nicht weiter vertieft.

Zusammenfassend wird unter einem BIM-Modell die Definition der VDI-Richtlinie *VDI/BS-Richtlinie 2552-8.1* übernommen. Hier heißt es hinsichtlich der Qualifikation für ein Arbeiten mit der BIM-Methodik: „*Die Basiskenntnisse sind durchweg auf ein dynamisches System, bestehend aus den fünf BIM-Faktoren, Menschen, Prozesse, Daten, Technologie und Rahmenbedingungen sowie auch deren Wechselwirkung mit ihrer Umwelt, zu beziehen*."[207] Mit dieser Herangehensweise ist es möglich, im Rahmen des BIM-Modells eine Bauablaufsimulation zu modellieren, die auf Basis der BIM-Gebäudemodelle beruht.

Laut VDI-Richtlinie *VDI/BS-Richtlinie 2552-8.1* muss beim Umgang mit BIM „[…] *das dazu notwendige Systemdenken in den Basiskenntnissen einbezogen werden*."[208] Entsprechend ist die Modellierung eines BIM-Modells weitestgehend mit der Simulationsmodellierung vergleichbar (siehe *Kapitel 2.2.2*).

---

[200] Vgl. Kappes, BauW 2017: 73.

[201] Vgl. Kappes, BauW 2017: 73; Fischer/Jungedeitering, BauR 2015: 10, Fn. 6. Laut *VDI-Richtlinie 2552-2* ist das *As-built-Modell* ein „[…] *im Zuge der Ausführung aufgenommenes, angepasstes Bauwerksmodell, das den Istzustand bis zum gewählten Detaillierungsgrad in Gänze widerspiegelt*". VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 2.

[202] Vgl. Fischer/Jungedeitering, BauR 2015: 10, Fn. 6.

[203] Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 23; Fischer/Jungedeitering, BauR 2015: 10, Fn. 6.

[204] Es ist nicht abschließend geklärt, was genau ein *As-Planned-Modell* ist. In der *VDI-Richtlinie 2552-3* wird zwar das Bau-Soll durch das *build as to be built-Modell* definiert. Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 23. Unklar ist, ob es sich hierbei um ein fortgeschriebenes Bau-Soll handelt oder nicht. Bisher gilt: „*Für die Abrechnung muss in jedem Fall ein Abgleich zwischen dem Bau-Soll(build as to be built)- und dem Bau-Ist(as built)-Modell stattfinden. Dabei ist das „build as to be built"-Modell mit dem Modell gleichzusetzen, dass mit seinem Informationsgehalt zum Zeitpunkt der Beauftragung den von allen Beteiligten akzeptierten Stand aufweist. Das „as built"-Modell stellt dann die Abrechnungsgrundlage und den von allen akzeptierten Stand des real erstellten Bauwerks dar.*" VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 23.

[205] Vgl. VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 5.

[206] Vgl. Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: S. 87; VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 5.

[207] VDI/BS-2552, Blatt 8.1, 2017: S. 2.

[208] VDI/BS-2552, Blatt 8.1, 2017: S. 2.

2.2.2 Simulation

Sobald von „Simulation“ die Rede ist, folgen früher oder später die Begriffe „System“, „Modellierung“, oder „Wirkung“. In *Kapitel 2.1* fand eine Erläuterung dieser Begriffe statt, da bei der Simulation fortwährend eine systemtheoretische Denkweise im Sinne einer ***Systemanalyse*** vorausgesetzt wird.

Bei der Simulation soll, wie beim *Building Information Modeling*, mit einem Modell das Abbild eines Systems geschaffen werden.[209] Auf abstrakter Ebene ist die Modellierung eines BIM-Modells weitestgehend mit der Simulationsmodellierung vergleichbar. Grundsätzlich zielt aber die Simulation auf das Nachbilden eines Systems mit seinen *dynamischen Prozessen* ab, woraus ein experimentelles Simulationsmodell hervorgeht.[210] Hierfür ist insbesondere eine wirklichkeitsgetreue Modellierung der *Dynamik* notwendig, um Erkenntnisse über das *Verhalten* und/oder die *Struktur* des Systems zu gewinnen.[211]

Dafür müssen die Simulationsmodelle ein Modellverhalten aufweisen. Diese Aufgabe erledigen interne numerische Berechnungsalgorithmen. Sie können verschiedene mathematische Funktionen unter zeitvariablen Bedingungen abarbeiten, woraufhin komplexe Berechnungsabfolgen möglich sind. Hiermit lassen sich vereinzelte oder umfangreichere *Prozesse* gem. *Kapitel 2.1.1* realitätsnah nachbilden, die sich evtl. gegenseitig bedingen. Die Simulation dient als Analysewerkzeug.[212] Die Aufgaben der Analyse können einige Modellierungen und Parametrierungen voraussetzen, die sich ggf. mehrfach wiederholen. In den Fachtermini wird daher der Begriff ***Experiment*** verwendet, worunter stetige Beobachtungen inkl. Bewertungen und Überarbeitungen des Simulationsmodells zu verstehen sind.

In der vorliegenden Arbeit werden insbesondere ***computergestützte Simulationen*** betrachtet. Sie ermöglichen ***kausale Berechnungen***, die zwar auch von Hand gerechnet werden könnten, aber aufgrund des Arbeitsaufwands in einer „schier endlosen Mammut-Aufgabe“ enden würden.

Computergestützte Simulationen sind dann zu verwenden, wenn bestimmte Eigenschaften eines Systems unbekannt sind und diese ermittelt werden sollen. Erwägungen, die für den Einsatz der Simulation entscheidend sein können, finden sich z. B. darin, dass

- die Durchführbarkeit eines Experiments am realen System *zu gefährlich* wäre;
- die *innere Struktur* eines Systems *unbekannt* ist und nachvollzogen werden soll;
- Untersuchungen am realen System zu *langwierig* oder zu *kostspielig* werden;
- ein reales System *noch nicht* oder *nicht mehr vollständig* oder *nur teilweise* existiert;
- die analytische Berechnung eines komplexen Systems zu *aufwändig* wäre oder
- das System aufgrund seiner Komplexität nur *schwer verständlich* ist.

[209] Siehe *Kapitel 2.1.1 ff.* und *Kapitel 2.2.1*.
[210] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[211] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3. Siehe *Kapitel 2.1.1*, *Kapitel 2.1.4* und *Kapitel 2.1.6*.
[212] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 35-39.

Laut *VDI-Richtlinie 3633-1* beinhaltet die Simulation selbst **keine Optimierung**.[213] „*Durch mathematische Optimierungsverfahren kann aber die systematische Parametervariation unterstützt und im Hinblick auf die Simulationsziele* [eine] *günstige Parameterkonfiguration ermittelt werden*.“ [214]

2.2.3 Abgrenzung simulationsfähiger Modelle

Um ein komplexes Systemverhalten zu simulieren, muss das Modell dynamische Eigenschaften besitzen bzw. über eine bestimmte Zeit hinweg „ausführbar“ sein.[215] Vom Modell wird abverlangt, dass es eine voranschreitende Zeit – die sog. ***Simulationszeit*** – berücksichtigen kann, um ein dynamisches Verhalten nachzubilden.[216]

Abbildung 2-15 zeigt eine Übersicht über verschiedene Modellarten. Demnach sind nicht alle Modelle für die *computergestützte Simulation* geeignet.

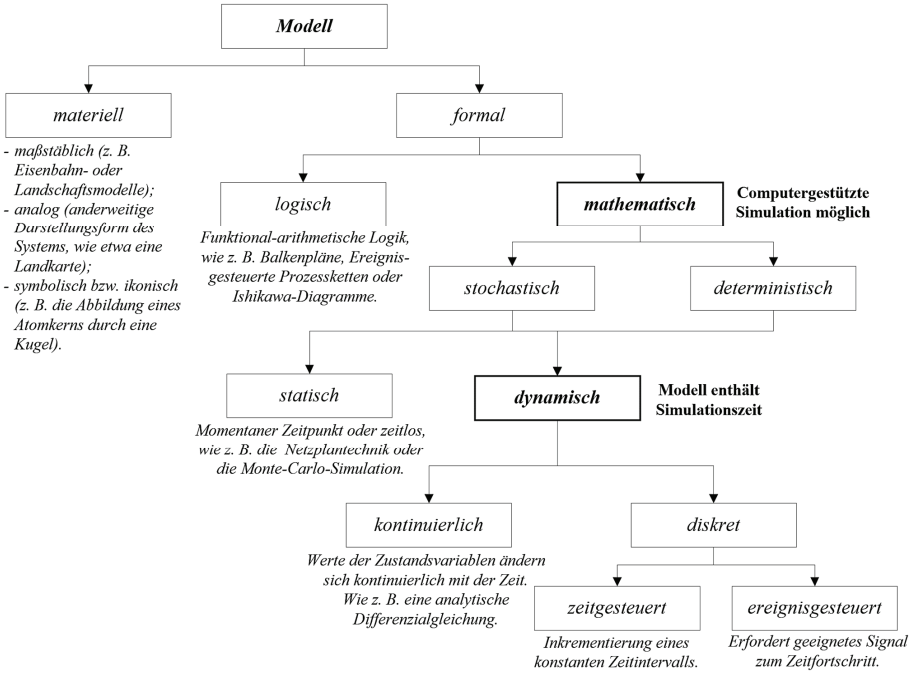


Abbildung 2-15: Modellarten für die Einsortierung der Simulationsmethoden[217]

---

[213] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[214] VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[215] Siehe „Simulation“ und „Simulationsmethode“ in *VDI-Richtlinie 3633*. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 28, 29 i. V. m. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3. Die statische Simulationsmethode ist eine Besonderheit, bei der das Simulationsmodell eine „sofortige Reaktion“ ohne Zeitentwicklung zeigt. Beispielsweise ist die *Monte-Carlo-Simulation* eine solche Simulation, die auch beim Versuchsaufbau mit den Würfeln verwendet wurde (siehe *Kapitel 2.1.4*).
[216] Siehe „Simulationsmethode“ und „Simulationszeit“ in *VDI-Richtlinie 3633*. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 29, 30.
[217] Eigene Darstellung.

Formale Modelle sind durch eine bildhafte Logik oder Mathematik charakterisiert.[218] Logische Modelle hingegen treten bspw. in Form von Ablaufplänen auf, wie zeitproportional entwickelte Balkenpläne.[219] Mathematische Modelle können als Berechnungsgrundlage für *computergestützte Simulationen* verwendet werden. Ihre vernetzten Modellstrukturen ermöglichen es, Berechnungen nach der Automatentheorie durchzuführen.[220] Für diese Aufgabe wird ein ***Simulator*** – eine Softwareanwendung – benötigt, der das Modell ausführt und sein Verhalten errechnet.[221]

Durch den Einsatz von Simulatoren können äußerst umfangreiche Datenstrukturen infolge von computergestützten Berechnungsschritten verarbeitet werden. Mathematische Modelle sind entweder stochastische oder deterministische Modelle. Mit stochastischen Modellen lassen sich für jeden Simulationslauf zufällige Zustandsveränderungen oder wahrscheinlichkeitsbehaftete Wirkbeziehungen zwischen den Elementen erzeugen.[222] Bei deterministischen Modellen finden dagegen keine zufälligen Veränderungen pro Simulationslauf statt, weshalb sich ein berechnetes Ergebnis bei Bedarf wiederholen lässt.[223] Stochastische oder deterministische Modelle lassen sich dynamisch oder statisch berechnen.

Statische Modelle können kein realitätsnahes Systemverhalten abbilden, da sie im Gegensatz zu dynamischen Modellen über keine im Modell hinterlegte Simulationszeit verfügen, die während einer voranschreitenden Berechnung eingerechnet wird. Die Netzplantechnik ist bspw. ein statisches Modell, das nicht ausführbar, sondern lediglich berechenbar ist. Darüber hinaus können BIM-Modelle zur Darstellung von 5D-Visualisierungen ebenfalls statische Modelle sein, solange sie über keine eigene Simulationszeit verfügen, die von einem Berechnungsalgorithmus situativ berücksichtigt wird.

Die Fortschreibung der Simulationszeit kann für dynamische Modelle kontinuierlich oder diskret erfolgen. Die Zeitfortschreibungen der kontinuierlichen Modelle lassen sich als Differentialgleichungen ermitteln,[224] während diskrete Zeitfortschreibungen in einzelnen Zeitschritten sprunghaft „weitergeschaltet“ werden.

Zeitgesteuerte Simulationen erhöhen die Simulationszeit fortwährend um eine konstante Dauer. Ereignisdiskrete Simulationszeiten schreiten hingegen nur voran, wenn nacheinander geschaltete Ereignisse eine etappenweise Zeitfortschreibung verursachen. Im Gegensatz zu zeitgesteuerten Simulationsmodellen können die Zeitabstände der ereignisgesteuerten Simulationsmodelle beim Weiterschalten unterschiedlich lange andauern.

[218] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 59.
[219] Vgl. Niemeyer, 1977: S. 59.
[220] Vgl. Anschütz, 1974: S. 93-105; Niemeyer, 1977: S. 71 ff.; Bossel, 2004: S. 22.
[221] Vgl. VDI-3633, 2018: S. 30.
[222] Vgl. Bossel, 2004: S. 21.
[223] Vgl. Bossel, 2004: S. 21.
[224] In realen Systemen ist ausschließlich eine *kontinuierliche Zeitentwicklung* vorhanden.

2.2.4 Simulationsstudien, Simulationsexperimente und Simulationsläufe

Die Simulation als Analyseverfahren setzt grundsätzlich eine vorherige Zieldefinition – also einen ***Simulationszweck*** – voraus, bevor sie eingesetzt wird.[225] Die Zielerreichung ist infolge einer ***Simulationsstudie***[226] zu erlangen. Eine Simulationsstudie umfasst iterative ***Simulationsexperimente***, bei denen vereinzelte ***Simulationsläufe*** durchzuführen sind.[227]

Die Hauptaufgabe einer Simulationsstudie liegt in der Nachbildung eines Systems als Modell, das zu einem Erkenntnisgewinn beitragen soll. In der Durchführung werden System- und Modellverhalten immer wieder miteinander verglichen. Auf diese Weise soll das Modell das System so genau wie möglich abbilden. Die *VDI-Richtlinie 3633-1* schlägt hierfür ein verfeinerndes Experimentieren bzw. eine gezielte „[…] *empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells* [und] *durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation*“[228] vor.

Es gibt unterschiedlich gestaltete Simulationsstudien, für deren Durchführung eigens grafische ***Vorgehensmodelle*** existieren.[229] Die Vorgehensmodelle sollen dafür sorgen, dass der Simulationszweck nach einer bestimmten Reihenfolge, eingeteilt in Phasen, erreicht wird. Die häufigsten Schritte bei der Durchführung einer Simulationsstudie gliedern *Rabe et al.* in

1. Aufgabenanalyse,
2. Modellformulierung,
3. Modellimplementierung,
4. Modellüberprüfung und
5. Modellanwendung.[230]

Hieraus leiteten sie das Vorgehensmodell ab, das in *Abbildung 2-16* zu sehen ist.

[225] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 6.
[226] Eine Simulationsstudie ist ein „*Projekt zur simulationsgestützten Untersuchung eines Systems*“. VDI-3633, 2018: S. 30.
[227] Vgl. VDI-3633, 2018: S. 30.
[228] VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 3.
[229] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 4.
[230] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 29.

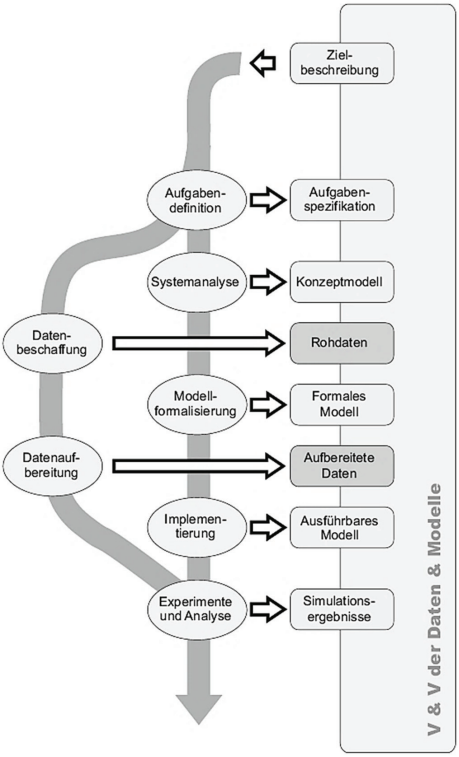


Abbildung 2-16: Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie nach Rabe et al.[231]

2.2.5 Verifizierung und Validierung

Ein komplexes Systemverhalten lässt sich oft nur schwer verstehen. Darum ist es nicht nur aus Beobachtungsgründen erforderlich, dass die Varietät der Modellteile auf ein ausreichend sinnvolles Maß reduziert wird. Durch die Wahl eines gröberen Detaillierungsgrads wird das Modell überschaubarer.[232] Eine Maßnahme, die ein „*Verfahren zur Reduzierung der Komplexität eines Problems durch Trennung der für bestimmte Aspekte der Problemlösung wichtigen und unwichtigen Details des Problems* […]"[233] umschreibt, wird in den Fachtermini

[231] I. A. a. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 5. „V & V" steht für ***Verifizierung*** und ***Validierung***. Diese sollte im Zuge einer Simulationsstudie durchgängig erbracht werden, um ein *realitätsnahes Modellverhalten* zu erreichen.

[232] Der Detaillierungsgrad der Elemente in einem Modell wird als „level of detail" bezeichnet. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 9. Die Bezeichnung ist nicht zu verwechseln mit „level of development" (LOD), worunter der geforderte Fertigstellungsgrad einer bestimmten Fachdisziplin, innerhalb eines BIM-Gebäudemodells, einer Leistungsphase verstanden wird. Vgl. Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: S. 87. Die *VDI-Richtlinie 2552-3* hat letztere Definition des *BIM-Leitfadens für Deutschland (2013)* bereits überarbeitet und die Fertigstellungsgrade unter der Bezeichnung „level of information" (LOI) definiert. Darin sind Unterkategorien enthalten. Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 4. Siehe auch VDI-2552, Blatt 2, 2018: S. 6.

[233] VDI-3633, 2018: S. 3. Weiter heißt es: „*Durch die Abstraktion bei der Modellierung wird ein auf das – bezüglich der Fragestellungen – Wesentliche beschränktes Abbild des Systems erreicht.*" VDI-3633, 2018: S. 3.

als ***Abstraktion*** bezeichnet. Die Komplexitätsreduzierung führt in aller Regel zu einem besseren Systemverständnis.[234] Dieser Aspekt ist gerade für die Modellierung hilfreich, da die erforderlichen Datenmengen, in denen die Informationen hinterlegt sind, verringert werden können, was wiederum zu einem geringeren Datenerhebungs-, Modellierungs-, Laufzeit- und Speicheraufwand führt.[235] Hierbei besteht die Gefahr, dass bei der Gegenüberstellung zwischen System- und Modellverhalten ungenaue Ergebnisse zustande kommen. Um genaue und glaubhafte Analyseergebnisse zu erzielen, sollte deshalb der Grad der Übereinstimmung immer hinterfragt werden.[236]

Für eine *möglichst fehlerfreie* Modellbildung ist einerseits eine regelmäßige ***Verifizierung*** durchzuführen. Anderseits sollte für ein *möglichst korrektes* Modellverhalten eine durchgängige ***Validierung*** stattfinden.[237] Verifizierung und Validierung tragen nicht nur zur Modellbildung, sondern auch zu einem besseren Verständnis über das System bei, da der Simulationsanwender sich iterativ an das vorab definierte Ziel annähert.

Rabe et al. beschreiben, dass, wenn Unstimmigkeiten infolge der Verifizierung und Validierung erkannt worden sind, noch *keine* eindeutige Aussage darüber getroffen werden sollte, *ob* ein Modell *falsch* oder *richtig* modelliert wurde.[238] Ebenso beschreiben sie, dass ein erwartetes Modellverhalten nicht ohne Weiteres eine korrekte Modellbildung voraussetzen muss.[239] Hierzu meint *Bossel*, dass die erforderliche Analyse des nachzubildenden Systems eine wesentliche Aufgabe für die Durchführung einer Simulation ist, da unterschiedliche Systemdefinitionen mit verschiedenen Strukturen im Sinne einer Korrelation ein vergleichbares Verhalten erzeugen können.[240] Demnach sollte bei der Modellierung berücksichtigt werden, dass die Systemstruktur im besonderen Maße für das Systemverhalten zuständig ist. Dieser wesentliche Grundsatz, der für die Modellierung gilt, lässt sich aber nicht umkehren, wonach das Systemverhalten auf eine eindeutige Systemstruktur hinweist.[241] Auch

---

[234] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 24. Die *VDI-Richtlinie 3633* unterteilt die „Abstraktion" in *Reduktion* (z. B. „nicht relevante Details werden von der Betrachtung ausgeschlossen") und in *Idealisierung* (z. B. „mehrere Teile werden als ein Teil zusammengefasst"). Vgl. VDI-3633, 2018: S. 3.

[235] Siehe „Abstraktion" in *VDI-Richtlinie 3633*. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 3.

[236] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 24, 38. Siehe „Abstraktion" in *VDI-Richtlinie 3633*. Vgl. VDI-3633, 2018: S. 3.

[237] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 14-15. Hierzu merken *Rabe et al*. an, dass hinsichtlich der Verifizierung keine vollständige Korrektheit eines Simulationsmodells gewährleistet werden kann, da sie eher theoretischer Natur ist. Hierbei zielen sie auf die Systembeobachtung und die Modellabstraktion ab. Zudem weisen sie darauf hin, dass in der allgemeinen Informatik unter Verifizierung (bzw. *Verifikation*) eine fehlerfreie bzw. formal-korrekte Überprüfung des Aufbaus von Modellen zu verstehen ist. Von dieser Definition distanzieren sie sich ausdrücklich. Die *VDI-Richtlinie 3633-1* zielt dagegen genau darauf ab und versteht unter Verifizierung eine vom Benutzer durchzuführende *formale Prüfung der Korrektheit* des Simulationsmodells, die eine Syntax-Überprüfung umfasst. Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 37. Grundsätzlich sollte das Modell ein hinreichend genaues Abbild des Systems darstellen, was wiederum den Ansichten von *Rabe et al*. entspricht. Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 19-20.

[238] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 16.

[239] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 16.

[240] Vgl. Bossel, 2004: S. 41; VDI-3633, 2018: S. 18.

[241] Vgl. Bossel, 2004: S. 41. Kritische Anmerkung zur Bildung eines Simulationssystems hinsichtlich der Wirkungszusammenhänge: „*Wenn es dagegen nur um die Darstellung von Systemverhalten geht, so können einfachere Systemdarstellungen ausreichen, um das Verhalten mit ausreichender Genauigkeit ‚nachzuäffen'. Solche Simulationen müssen allerdings versagen, wenn sie unter Bedingungen eingesetzt werden, die bei der Modellkonstruktion nicht berücksichtigt wurden. Modelle dieser Art ähneln einem Papagei, der zwar die oft gehörten Kraftausdrücke seines Besitzers täuschend echt nachahmen kann (ohne sie zu verstehen), sonst aber wenig mit ihm gemein hat.*" Bossel, 2004: S. 41.

Rabe et al. schreiben, dass mittels Verifizierung und Validierung es grundsätzlich nicht möglich ist, ein Simulationsmodell formal vollständig abzubilden.[242] Durch die Verifizierung und die Validierung kann „[…] *allerdings das Vertrauen* […] *in das erstellte Modell erhöht und damit dem Anwender und dem Simulationsexperten Sicherheit in Bezug auf die Modellnutzung gegeben werden.*“[243]

Die oben beschriebene Problematik wird jedoch komplett vernachlässigt, wenn die Modelle nicht ausführbar sind und dadurch kein prüfbares Modellverhalten besitzen. Derartiges trifft z. B. auf Netzplanmodelle zu.

Die *VDI-Richtlinie 3633-1* hebt hervor, dass die verwendeten Daten ebenfalls einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden sollten, was wiederum eine Aufgabe der Validierung ist.[244] Laut *Bossel* sind alle Daten am Realsystem messbar oder feststellbar. Dies gilt auch zur qualitativen Feststellung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins einer Wirkbeziehung, bis zur quantitativen Messung funktionaler Zusammenhänge.[245] Zwar sind zur Modellerstellung keine Zeitreihendaten des realen Systemverhaltens notwendig – „[…] *wohl aber für die Validierung* […].“[246]

Es gibt keine allgemeingültige Bewertungsmethode zur *Verifizierung* und *Validierung* aller Anwendungsfälle. Jeder Einzelfall ist daher angemessen zu betrachten, um ihn aussagekräftig zu bewerten. In einer umfangreichen Literaturrecherche stellen *Rabe et al*. wesentliche Kriterien auf, die bei der Durchführung einer Verifizierung und Validierung immer wieder genannt worden sind. In *Tabelle 2-3* sind diese nachzulesen.

[242] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 20.
[243] Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 20.
[244] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 38.
[245] Vgl. Bossel, 2004: S. 59.
[246] Bossel, 2004: S. 59.

Tabelle 2-3: Kriterien für die Verifizierung und Validierung im Zuge einer Simulationsstudie[247]

Kriterium	Fokus	Beispiele
Vollständigkeit	Korrektheit von Inhalt und Struktur	- strukturelle Überprüfung bezüglich fehlender Anforderungen und Informationen - Bestimmung des Grades der Übereinstimmung zwischen Anforderungen und Modell
Konsistenz	Korrektheit von Inhalt und Struktur	- Schlüssigkeit der semantischen Zusammenhänge - Schlüssigkeit der Struktur - Durchgängigkeit der Terminologie
Genauigkeit	Korrektheit von Inhalt und Struktur sowie Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung	- fehlerfreie, sorgfältige Modellierung - Wahl des angemessenen Detaillierungsgrades - richtige Granularität der Daten
Aktualität	Korrektheit von Inhalt und Struktur sowie Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung	- inhaltliche und zeitliche Gültigkeit der Informationen und Daten im Hinblick auf ihre Verwendung - Gültigkeit des Modells für die Aufgabenstellung
Plausibilität	Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung	- Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge - Schlüssigkeit der Ergebnisse
Verständlichkeit	Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung	- Nachvollziehbarkeit für Anwender - Transparenz in der Modellbildung - Eindeutigkeit in der Formulierung - Lesbarkeit
Machbarkeit	Durchführbarkeit	- technische Umsetzbarkeit der Anforderungen - Erreichbarkeit der geforderten Projektziele - Umsetzbarkeit der zeitlichen Projektplanung
Verfügbarkeit	Durchführbarkeit	- Möglichkeit des Zugriffs auf die notwendigen Daten und Dokumente - Glaubwürdigkeit der Informations- und Datenquellen

Rabe et al. stellen klar, dass die Durchführung der Verifizierung und Validierung immer mit einer *subjektiven* Einschätzung verbunden ist; eine gewisse Objektivität ließe sich nur durch das angewandte mathematische Verfahren erreichen.[248]

Die vorangegangenen Beschreibungen sollen verdeutlichen, dass die Simulation keine Planungs- oder Optimierungsmethode ist.[249] Sie kann allerdings optimierend unterstützen oder nützliche Erkenntnisse, z. B. für eine Planung, liefern.

2.3 Arten der Bauablaufsimulation

Bei der Bauablaufsimulation können Ausführungsprozesse auf der Baustelle, je nach Modellgestaltung und Parametrierung, in einer virtuellen Umgebung nachgebildet werden. Hiermit lassen sich verschiedene Ablaufvarianten testen und auswerten. In den Untersuchungen können ein geeigneter Ressourceneinsatz und/oder Bauverfahren unter Berücksichtigung logistischer sowie organisatorischer Aspekte in Erfahrung gebracht werden. Laut *Feine et al*. sind typische Anwendungsgebiete Standortplanungen, Dimensionierungen von Kränen oder Lagerflächen im Rahmen der Fertigungsplanung etc. (siehe *Kapitel 2.4*).[250]

[247] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 22-23.
[248] Vgl. Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: S. 115.
[249] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 6; Košturiak/Gregor, 1995: S. 16.
[250] Vgl. Feine/Smarsly/Bargstädt, 2016: S. 2.

2.3.1 Zyklische Flussnetzwerke

Die ersten Ansätze zur zeitlichen Nachbildung von Bauabläufen mithilfe von Simulationen reichen bis in die 1970er Jahre zurück. *Halpin* entwarf zu der Zeit den ereignisdiskreten Simulator *CYCLONE*, mit dem deterministische sowie stochastische Produktionsprozesse nachgebildet und anschließend analysiert werden können.[251] Durch die Modellierung eines grafischen Flussnetzwerks ist mit *CYCLONE* die dynamische Berechnung ineinandergreifender Vorgänge möglich.[252] Für die Modellierung lassen sich unterschiedlich geartete Knotentypen, wie Warteschlangen und Aktivitäten, mit Kanten verbinden. Die Kanten geben die Ressourceneinheiten in eine Flussrichtung an die Knoten weiter.

CYCLONE ist besonders für Vorgangsberechnungen sich wiederholender bzw. zyklischer Prozessabläufe geeignet, z. B. für Erdbauarbeiten. Laut *AbouRizk* sind Flussnetzwerke einfach zu verstehen und erfordern einen geringeren Modellierungsaufwand aufgrund der zyklischen Flusseinheiten, so dass sie gegenüber der *Netzplantechnik* besondere Modellierungsvorteile bieten.[253] Insgesamt wurde *CYCLONE* über mehrere Jahrzehnte in zahlreichen Forschungsansätzen[254] für Termin- und Kostenanalysen – insbesondere zur Arbeitsvorbereitung und Projektsteuerung – herangezogen, untersucht und weiterentwickelt.

2.3.2 Constraint-basierte Simulationsbausteine

Simulationsbausteine sind wiederverwendbare und ausführbare Komponenten, die miteinander für einen Informationsfluss verknüpft werden können. Sie ermöglichen innerhalb der *Siemens Plant Simulation*-Softwareumgebung[255] ereignisdiskrete Simulationen virtueller Prozesse mit In- und Output-Mengen und bieten verschiedene Darstellungsmöglichkeiten zum Auswerten.[256] Die Simulationsbausteine waren ursprünglich für die Modellierung lokaler Produktionsstätten in virtuellen Produktionslinien der stationären Industrie vorgesehen. *Beißert et al*. haben das darauf aufbauende Simulationsbausteinkastenprinzip *STS*[257] aus dem Schiffbau genutzt und erweiterten es um einen *constraint-basierten* Ansatz zur Simulation von Bauabläufen im Ausbau.[258] Die Entwicklungen fanden im Rahmen der Kooperation *SIMoFIT* zwischen dem Schiffbau und dem Bauingenieurwesen statt.[259]

Bei dem *constraint-basierten* Ansatz werden die Abhängigkeiten zwischen Simulationsbausteinen, den sog. *Hard-* und *Soft-Constraints*, unterschieden.[260] *Hard-Constraints* dienen zur Definition erforderlicher Abhängigkeiten, wie etwa technologische oder zeitliche Zusammenhänge.[261] *Soft-Constraints* werden zur Modellierung geeigneter Abhängigkeiten verwendet, wie strategische Zusammenhänge des Bauablaufs oder die situative Nutzung freier

---

[251] Vgl. Gareis/Halpin, 1979.
[252] Vgl. Gareis/Halpin, 1979: S. 11-22.
[253] Vgl. AbouRizk, 2010: S. 1142.
[254] Folgende Literatur nimmt Bezug auf die umfangreichen Entwicklungsschritte: Oloufa, 1993; Shi/AbouRizk, 1997; Martinez/Ioannou, 1999; Lu/Chan/Zhang/Cao, 2007; Zhang/Li/Lu, 2008; AbouRizk, 2010.
[255] Siehe www.plant-simulation.de [zuletzt abgerufen am 07.08.2018].
[256] Vgl. Horenburg, 2014: S. 113-115.
[257] Siehe www.plant-simulation.de/bausteine/schiffbau.html [zuletzt abgerufen am 07.08.2018].
[258] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 493-494; Voigtmann, 2014: S. 56-57 i. V. m. König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 5 ff.
[259] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 491.
[260] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 492; König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 3.
[261] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 492; König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 3.

Arbeitsflächen.[262] Der gesamte Ansatz ermöglicht dynamische Ablaufstrukturen.[263] Dazu werden die diskreten Ereignisse für die Vorgangsberechnung auf deren Bearbeitbarkeit anhand der *Hard-Constraints* hinsichtlich der Ressourcenverfügbarkeiten geprüft.[264] Sollten die Voraussetzungen dafür existieren, erfolgt eine weitere Auswahl für alle Vorgänge, die daraufhin mit *Soft-Constraints* ausgestattet sind.[265] Als Simulationsergebnis ergibt sich ein Bauablaufplan, bei dem u. a. der Materialfluss sowie der Kapazitätseinsatz aufgezeichnet werden.[266] Anschließend lassen sich Zeit, Kosten und Qualität analysieren.[267] Bevor ein Simulationslauf erfolgen kann, müssen alle *Hard-* sowie *Soft-Constraints* vorgegeben werden.[268]

2.3.3 System-Dynamics

In den 1950er Jahren führte *Forrester* mit System-Dynamics ein Modellierungskonzept zur computergestützten Simulation ein, mit dem sich zeitliche Verhaltensänderungen von Systemen nachvollziehen lassen.[269] System-Dynamics wird oftmals genutzt, um dynamische, kausale Rückkopplungs-Effekte bzw. Zyklen in der Ablaufstruktur von Systemen zu modellieren und zu analysieren.

In sog. kausalen Rückkopplungsdiagrammen werden (Teil-)Systeme als (Teil-)Modelle formalisiert. Die Wirkungen der Modelle lassen sich mithilfe von computergestützten Simulationen[270] durch iterativ in Reihe geschaltete Differentialgleichungen – mittels kontinuierlicher Übergangsfunktionen – fortentwickeln, wobei die Systemteile entsprechend situative Wechselwirkungen untereinander austauschen.[271] Der Grundgedanke von System-Dynamics liegt in der Analyse, inwieweit sich einzelne positive sowie negative Wirkungsanteile in ihrer Struktur auf das Gesamtmodell auswirken.[272] Aufgrund schrittweiser Berechnungen von interferierenden Wirkungsverzögerungen können die ermittelten Wirkungen schubweise (als „pumpen“) auftreten.[273]

---

[262] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 492-493; König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 3, 4.
[263] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 497.
[264] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 6.
[265] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 6.
[266] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 493-494.
[267] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 494, 496.
[268] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 492.
[269] Vgl. Sterman, 2001: S. 24.
[270] Zum Beispiel: www.iseesystems.com, www.powersim.com oder www.anylogic.com [zuletzt abgerufen am 06.07.2018].
[271] Vgl. Sterman, 2001: S. 20-21; Taylor/Ford, 2008: S. 423.
[272] Vgl. Sterman, 2001: S. 17 ff.
[273] In der englischsprachigen Literatur wird dieser Effekt als „ripple effect“ bezeichnet. Vgl. Jalili/Ford, 2016: S. 83.

2.3.4 Petri-Netze

Petri-Netze sind Graphen, mit denen die Dynamik zeitdiskreter Prozessreihenfolgen modelliert werden kann. Das Konzept von Petri-Netzen basiert auf einer Schaltlogik, das der Automatentheorie entspricht. Die Modellierung findet häufig formal – d. h. bildhaft oder mathematisch – statt.

Sie kann aber auch im Hintergrund einer Software durch unterstützende Algorithmen erfolgen.[274] Insgesamt stellen Petri-Netze formale grafische Modellierungswerkzeuge dar, die oft zum Modellieren von Kommunikationssystemen, Computer-Software und -Hardware, für Sicherheitsanalysen oder Fertigungsanalysen Einsatz finden.[275]

Bei der Ausführung eines Petri-Netz-Modells werden prinzipiell mehrere aufeinanderfolgende Schaltvorgänge abgearbeitet. Die Struktur des Petri-Netz-Modells gibt die Schaltreihenfolge vor. Nach jedem Schalten stellt sich ein neuer persistenter[276] Modellzustand ein. Er wird in den folgenden Schaltungen, je nach Vernetzung, mitberücksichtigt und erzeugt ein dynamisches Modellverhalten. Die Schaltregeln lassen sich in numerischen Mengen ausdrücken, weshalb Petri-Netze algebraisch formulierbar sind. In dieser Arbeit wird jedoch auf mathematische Definitionen verzichtet.

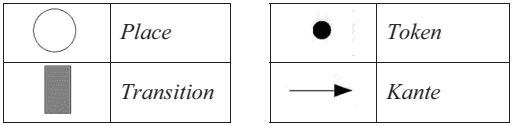


Abbildung 2-17: Elemente des Petri-Netzes[277]

Der grundtypische Aufbau von Petri-Netzen verfügt über zwei diskrete Knotentypen: die ***Places*** (passive Knoten) und die ***Transitionen*** (aktive Knoten). Sie sind jeweils abwechselnd mit ***Kanten*** in eine bestimmte Richtung vernetzt. In den Places können sich ***Token*** befinden. Sobald dies der Fall ist, kann eine darauffolgende Transition zum Schalten angeregt werden. Die Transition entnimmt dann alle Token aus den vorausgegangenen Places als Input und speichert neue Token in die darauffolgenden Places als Output.

Ein Place dient als temporärer Token-Speicherplatz. In einer grafischen Darstellung werden die Places i. d. R. durch Kreise und die Transitionen durch Kästchen (ggf. auch durch dicke Striche) abgebildet. Die Darstellung der Kanten erfolgt durch Pfeile, die in Schaltrichtung ausgerichtet sind. Token werden häufig als Punkte angezeigt (siehe *Abbildung 2-17*).

---

[274] Anschaulich hierzu führt *van der Alst* aus, dass „[…] *BPMN, EPKs, UML-Ads und viele andere Notationen für Geschäftsprozess-Modelle* […] *alle eine tokenbasierte Semantik* [verwenden]. *Daher gibt es eine Reihe von Techniken und Werkzeugen, die BPMN, EPKs und UML-Ads in Petrinetze und zurück übersetzen. Damit werden Petrinetze indirekt verwendet, beispielsweise um Modelle zu analysieren, auszuführen, oder ihre Semantik zu klären.*“ van der Alst, 2014: S. 197. Siehe auch Samkari, 2014: Dissertation.

[275] Vgl. Peterson, 1981: S. 31; Franz, 1989: S. 5; Wakefield/Sears, 1997: S. 105.

[276] Laut *Fischer und Hofer* ist die Persistenz synonym zu „dauerhaft existierend“. Persistenz lässt sich etwa bei einem Speichermedium zur Sicherung von Daten wiederfinden. Vgl. Fischer/Hofer, 2008: S. 622. Persistenz kann dazu beitragen, dass Ergebnisse wieder abrufbar und somit reproduzierbar sind.

[277] Eigene Darstellung.

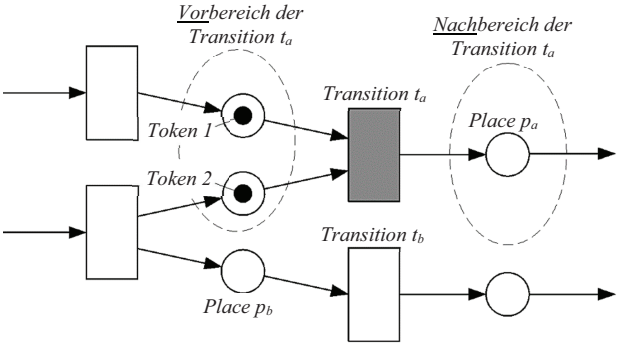


Abbildung 2-18: Ausschnitt aus einem Petri-Netz bei einer Schaltsituation[278]

Das Entfernen und Speichern der Token wird als ***Schalten*** bezeichnet. Während des Schaltens kann eine Übergangsfunktion berechnet werden, bspw. für Vorgangsberechnungen. Eine Transition kann allerdings nur schalten, wenn sie ***aktiviert*** wurde. Dafür müssen alle Places im Vorbereich von einer Transition mit Token belegt sein. *Abbildung 2-18* zeigt, dass die *Transition* t_b deaktiviert ist, da ihr Vorbereich (*Place* p_b) mit keinem Token belegt ist. Hingegen ist die *Transition* t_a aktiviert und kann schalten (die Aktivierung wird durch die dunklere Kästchendarstellung hervorgehoben grundsätzlich besteht kein Unterschied zwischen einer hier in schwarz oder weiß dargestellten Transition). Sobald sie schaltet, werden die Token aus dem Vorbereich (*Token 1* sowie *Token 2*) entnommen und ein neuer Token in den Nachbereich (*Place* p_a) gespeichert. Nach diesem Prinzip können die Token gleichermaßen ein größeres Petri-Netz durchlaufen. Hierbei lassen sich komplexe Kausalzusammenhänge dynamisch und zeitdiskret nachbilden.

Die Transitionen der Petri-Netze lassen sich in mehreren Ebenen hierarchisch gliedern.[279] In Makroebenen-Richtung ist die Modellierung eines größeren Abstraktionsniveaus und in Mikroebenen-Richtung eine detailliertere Modellbildung möglich. Petri-Netze bieten somit gute Möglichkeiten, um die Modelle wie Systeme zu strukturieren (siehe *Kapitel 2.1*).

Die Token lassen sich ***farbig*** gestalten. Das heißt, sie können verschiedene Eigenschaften beim Schalten mitführen, indem sie *parametrierbare Attribute*[280] bereitstellen.[281] In dieser Forschungsarbeit dienen die Token als Informationsträger im Sinne des *Kapitels 2.1.2*.[282] Mit ihren Attributwerten können elementare Zustände festgehalten und durch das Netz an die Transitionen weitergereicht werden. Beim Schalten entnehmen die aktivierten Transitionen die jeweiligen Informationen aus den Token und nutzen diese für diskrete Berechnungen der nachzubildenden Prozesse. Die errechneten Transitionen lassen sich daraufhin in die neuen Token des Nachbereichs speichern. Die Places dienen somit als lokaler Platzhalter für die in den Token gespeicherten Informationen. Letztere beinhalten die Zustände bzw. Wirkungspotentiale aller vorausgegangenen Prozesse. Mit dieser Abhandlung lässt sich die in

[278] Eigene Darstellung.
[279] Vgl. Peterson, 1981: S. 38. *Franz* zeigt anschauliche Beispiele. Vgl. Franz, 1989: S. 109-113.
[280] Siehe *Kapitel 2.2.1*.
[281] Vgl. Franz, 1989: S. 43 ff.
[282] Dieser Ansatz entspricht in weiten Teilen dem Simulationsprinzip von *Samkari*. Vgl. Samkari, 2014: Dissertation.

Kapitel 2.1.6 beschriebene *Autokorrelation* erzielen. Alle einzelnen Zustände im Modell bilden je nach Schaltvorgang einen gemeinsamen, *momentanen Modellzustand*, der als ***Markierung*** bezeichnet wird. In *Kapitel 6.1* wird auf dieses Prinzip nochmals näher eingegangen.

Die Vernetzung erfolgt in der Reihenfolge, in der die Prozesse abgearbeitet werden sollen. Generell lassen sich mit Petri-Netzen zyklische Prozessreihenfolgen (sog. *Schlingen*) abbilden. Im Gegensatz zur Automatentheorie können diese Zyklen theoretisch unbegrenzt fortgesetzt werden.

In dieser Arbeit wird stets eine gerichtete Prozessreihenfolge mithilfe der Petri-Netze abgebildet. Sie befindet sich zwischen einer ***Quelle*** als Anfang und einer ***Senke*** als Ende. Eine Quelle ist ein Place ohne Input und eine Senke ist ein Place ohne Output. Zudem werden ausschließlich Petri-Netze als ***Marked Graphen*** betrachtet, die keine Schlingen besitzen.[283] Die Places von Marked Graphen verfügen jeweils über einen Input und einen Output. Die Transitionen dürfen wiederum mehrere Inputs sowie Outputs besitzen. Marked Graphen basieren auf sog. Bedingungs-/Ereignis-Petri-Netzen. Die folgende Ablaufskizze der *Abbildung 2-19* verdeutlicht selbsterklärend das Schaltprinzip eines Marked Graphen.

[283] Vgl. Peterson, 1981: 208, 213 ff.

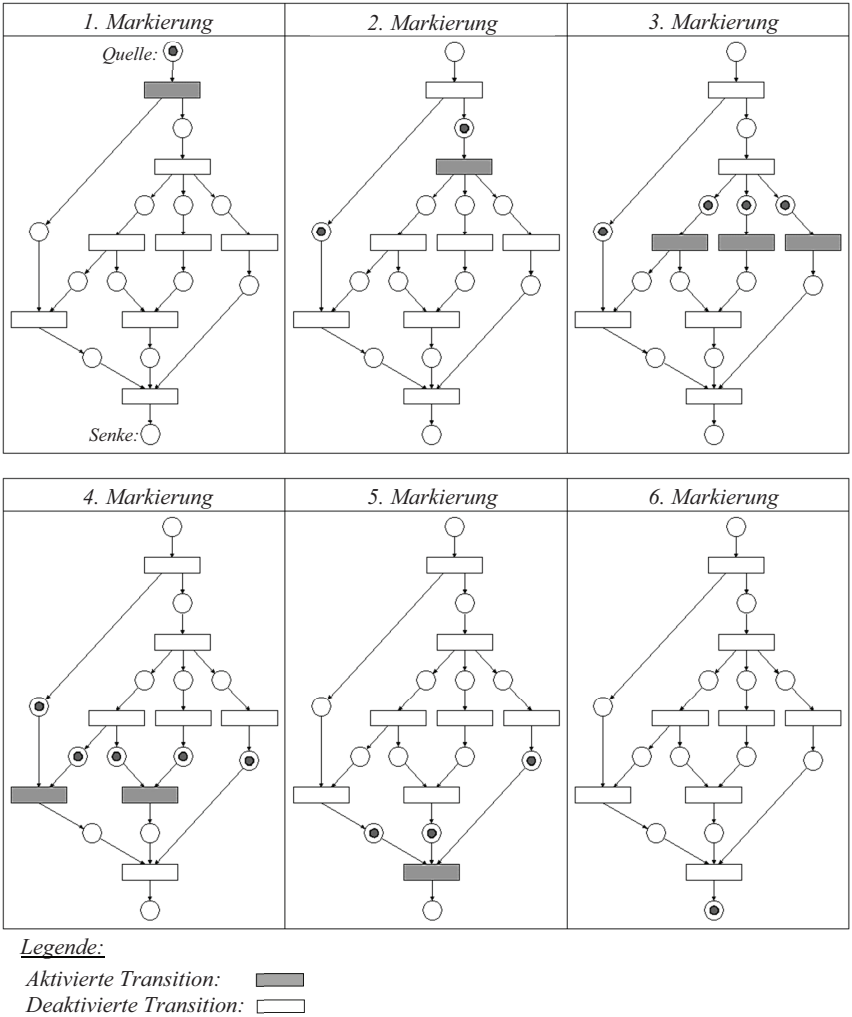


Abbildung 2-19: Ablaufskizze eines Petri-Netzes bzw. Marked Graphen[284]

Bei einer ***Rekonfiguration*** wird davon ausgegangen, dass die Struktur des Petri-Netzes während der Simulationszeit nicht statisch ist. Das heißt, sie ändert sich während eines Simulationslaufs und kann dadurch ein emergentes Systemverhalten nachbilden.[285] Anhand bestimmter Petri-Netz-Zustände werden z. B. Kanten, Places und Transitionen entfernt oder hinzugefügt. Mit den fließenden Token und der nicht statischen Struktur erreicht das Petri-Netz besondere dynamische Eigenschaften, die ein komplexes Modellverhalten simulieren können.

[284] Eigene Darstellung.
[285] Siehe *Kapitel 2.1.5*.

2.3.5 Agentenbasierte Simulation

Agenten sind verhaltensorientierte Programmeinheiten im Sinne eines selbstorganisierenden Teilsystems. In Modellen stellen sie einen aktiven Bestandteil dar und können unterschiedliche Aufgaben innerhalb einer Softwareanwendung ausführen.[286] Der Agentenbegriff ist vielseitig. In diesem Unterkapitel werden einerseits ***Software-Agenten*** und andererseits *Multiagentensysteme* behandelt.

Software-Agenten finden in Computernetzwerken Anwendung. Beispielsweise gibt es Software-Agenten als sog. „Bietersoftware" (oder „Auktionsmanager"). Sie geben eigenständig Preise im Internet für angebotene Waren anhand bestimmter Kriterien und Regeln ab. Der Software-Agent übernimmt somit die Arbeit des menschlichen Bieters. Die Agenten können bestimmte Strategien konsequent durchführen, z. B. kurzfristige Angebote vor Verkaufsschluss. Vergleichbare Software-Agenten werden auch beim Aktienhandel eingesetzt, die auf Grundlage bestimmter Daten vorgegebene Strategien verfolgen.

Bei Multiagentensystemen interagieren einzelne Agenten in einer gemeinsamen virtuellen Umwelt, die durch ein übergeordnetes Modell definiert wird.[287] Durch die Agenten lässt sich bspw. das Verhalten von Personen simulieren, die ihr Umfeld selbst wahrnehmen und daraufhin eigenständige Entscheidungen treffen.[288] Derartige Simulationen werden u. a. auch für Schwarmanalysen (Vogel- oder Fischschwärme, Fahrzeuge im Straßenverkehr o. Ä.) eingesetzt. In der Regel besitzen die Agenten eines Multiagentensystems nur eine eingeschränkte Sicht innerhalb ihrer Umwelt.[289] Zusammen mit den Umwelteinflüssen können sie aufeinander einwirken und daraus ein globales Modellverhalten mit vielen Wechselwirkungen erzeugen. *Watkins et al*. betonen, dass Multiagentensysteme geeignet sind, um ein emergentes Systemverhalten nachzubilden, da sie verteilte, dezentrale Interaktionen auf Mikroebene berücksichtigen.[290] Schon einfache Verhaltensregeln der Agenten können dabei ein sehr komplexes Modellverhalten erzeugen. Entsprechend ist diese Simulationsmethodik geeignet, wenn vordergründig die Nachbildung eines dynamischen Bewegungsverhaltens analysiert werden soll. Multiagentensysteme sollten vor allem dann Einsatz finden, wenn ihre Fähigkeiten durch eine ereignisdiskrete Simulation gar nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand nachgebildet werden können. In *Tabelle 2-4* sind verhaltenstypische Eigenschaften der Agenten nach *Klügl* aufgelistet.

[286] Vgl. Klügl, 2000: S. 63.
[287] Vgl. Klügl, 2000: S. 63.
[288] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 12.
[289] Vgl. Kugler, 2012: S. 42.
[290] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 658.

Tabelle 2-4: Verhaltenseigenschaften von Agenten nach Klügl[291]

Verhaltenseigenschaft	Beschreibung des Agentenverhaltens
situativ	Der Agent erfasst seine Umwelt über *Sensoren* und kann diese durch sein Verhalten *verändern*.
reaktiv	Der Agent erfasst *Veränderungen* innerhalb seiner Umwelt und passt sich dieser entsprechend an, indem er sein Verhalten *modifiziert*.
autonom	Der Agent bestimmt seine Aktionen *eigenständig* aus Erfahrungswerten, die er mithilfe seiner *Sensoren* gewinnen kann.
sozial	Der Agent besitzt die Fähigkeit, *mit anderen Agenten* innerhalb seiner Umwelt zu *interagieren*.
rational	Der Agent verfolgt eigenständig *vordefinierte Ziele* und kann selbst *Initiative* zeigen, um diese zu erreichen.
antropomorph	Der Agent verhält sich wie ein Individuum, das eigene Ziele und Wünsche verfolgt.[292]
glaubwürdig	Der Agent stellt dar, was er vorgibt zu sein. Für den Beobachter soll das Verhalten *plausibel* erscheinen.

Häufig werden die einzelnen Agenten dynamisch visualisiert, so dass sich deren Bewegung am Bildschirm verfolgen lässt. Das Verhalten der Agenten kann unterschiedlich ausgestaltet sein. *Klügl* merkt an: „*Welche Eigenschaften davon Agenten in der Multiagentensimulation besitzen, ist zum einen eine Frage des Abstraktionsniveaus des Modells und wird zum anderen davon bestimmt, welche Eigenschaften bei den Bestandteilen des im Modell abzubildenden Systems identifizierbar sind* […].“[293]

2.3.6 Differenzierung verschiedener Modellarten

Beim Einsatz von BIM-Modellen lassen sich die objektbezogenen Bauteilmodelle zur Vorgangsberechnung nutzen. Dazu können die jeweiligen Bauteilmengen abgefragt und mit virtuellen Ausführungsprozessen verknüpft werden.[294] Letztere erfordern, wie das Gebäudemodell, ebenfalls eine Modellierung. Aus den Simulationsergebnissen ist ggf. die Identifizierung von Vor- und Nachteilen möglich, z. B. wie sich alternative Bauabläufe unter bestimmten modellbezogenen Randbedingungen oder Parametergrößen verhalten würden. Dieses Prinzip kann zur Fortschreibung der Bauablaufmodelle genutzt werden.

In Anlehnung an *Kugler* wird für die Bauablaufsimulation zwischen mehreren Modellarten unterschieden.[295] Er beschreibt die Kombination zwischen einem ***Prozessmodell*** mit einem ***Geometriemodell*** bzw. *dreidimensionalen Gebäudemodell*, die zusammen ein simulationsfähiges ***Produktmodell*** bilden. *Abbildung 2-20* stellt den Zusammenhang dar.

[291] Vgl. Klügl, 2000: S. 10-12.
[292] I. A. a. Kugler, 2012: S. 40.
[293] Klügl, 2000: S. 12.
[294] Vgl. Tauscher/Smarsly/König/Beucke, 2014: 745-752; Lu/Olofsson, 2014: S. 73-83. Siehe *Kapitel 5.2.3*.
[295] Vgl. Kugler, 2012: S. 87.

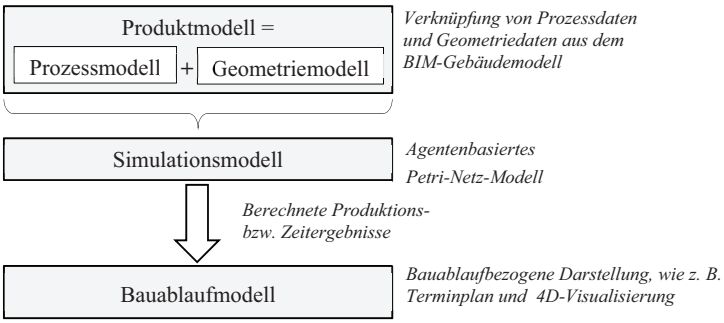


Abbildung 2-20: Übersicht verschiedener Modellarten[296]

Unter einem *Prozessmodell* versteht *Kugler* ein Modell, das die Arbeitsaufgaben der zu simulierenden Vorgänge ohne Geometrieanteile zusammenfasst. Darin werden ebenso die Arbeitsreihenfolgen sowie die dafür benötigten *Ressourcen*[297] festgelegt.[298] Aus dem *Geometriemodell* lassen sich die räumlichen Restriktoren und die zu bearbeitenden Bauteilmengen den Produktionsprozessen entnehmen. In diesem Fall eignet sich der Zugriff auf die Bauwerksgeometrie eines BIM-Gebäudemodells zur Entnahme topologischer Gebäudedaten.[299] *Rösch und Dresp* beschreiben, dass BIM-basierte Bauablaufsimulationen besonders geeignet sind, um „[…] *unterschiedliche Bauverfahren mit ihren Fertigungsvorgängen für eine Baustelle zu vergleichen. Gerade die Visualisierung der Auswirkungen auf die Bauteile, die Visualisierung ihrer Geometrie und ihrer Positionierung im Bauwerk ist hilfreich bei der Bewertung der Alternativen und damit einer Entscheidungsfindung* […]. [Die Modelle] *sind gewerkeübergreifend ausgeprägt. Sie orientieren sich an den ineinandergreifenden Fertigungsvorgängen, unabhängig von vertraglichen Regelungen mit den einzelnen Bauausführenden.*“[300]

In dem entwickelten Simulationsansatz der vorliegenden Arbeit wird das Produktmodell in ein ***Simulationsmodell*** überführt. Diese Vorgehensweise ist in weiten Teilen mit dem Ansatz von *Samkari* vergleichbar.[301]

2.4 Entwicklungsansätze aus der Praxis und der Forschung

Lang und Rasch benennen die Vorzüge der Simulation, indem sie deren Arbeitsweise für ein zielgerichtetes Experimentieren und Variieren mit deterministischen oder stochastischen Eingangsgrößen hervorheben.[302] Sie gehen auf die wirklichkeitsnahe Nachbildung des zu untersuchenden Bauablaufs und seine vorgangsbezogenen Auswirkungen ein, wie z. B. auf

[296] Eigene Darstellung.
[297] Wie z. B. Baumaterialien, Arbeitskräfte, Baugeräte (siehe *Kapitel 2.1.11*).
[298] Eine Vertiefung zu Produktmodellen findet in der vorliegenden Arbeit nicht statt. Es wird verwiesen auf *Kugler*, der ausführlich auf verschiedene Produktmodelle eingeht. Vgl. Kugler, 2012: S. 87-104.
[299] Vgl. Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 460-462.
[300] Rösch/Dresp, 2017: S. 258.
[301] Vgl. Samkari, 2014: S. 73 ff. In dieser Arbeit werden keine Anordnungsbeziehungen nach *DIN 69900* im Simulationsmodell berücksichtigt.
[302] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 293.

die Analyse bautechnischer Minderleistungen.[303] Laut ihren Aussagen baut die Simulation mit der Netzplantechnik auf „bekannte Hilfsmittel der Baubetriebslehre“ auf – hierzu erwähnen sie *MPM-Netzpläne* gem. *DIN 69900*.[304] Zweifellos treffen die genannten *Vorzüge der Simulation*[305] zu. Ein Verweis auf die *DIN 69900* ist in diesem Fall jedoch zu kritisieren. Die Gründe lassen sich in der dynamischen Nachbildung von Prozessabläufen wiederfinden,[306] bei denen Aspekte der Systemanalyse gem. *Kapitel 2.1* ausschlaggebend sind. Zwischen der Netzplantechnik und den Möglichkeiten der Simulation bestehen Unterschiede. Einzelheiten werden in *Kapitel 4.5* genannt. Nachstehend folgen Lösungsansätze aus der Praxis und Forschung über Bauablaufsimulationen.

2.4.1 Bauablaufsimulationen mit Flussnetzwerken

Für den Entwurf eines simulationsbasierten Planungs-Systems haben *Senior und Halpin* eine passende Schnittstelle für *CYCLONE* entwickelt (siehe *Kapitel 2.3.1*).[307] Dadurch können sie die Vorteile der Bauablaufsimulation auf *Netzpläne* anwenden. Die Simulation bezweckt in den *Netzplänen* zyklische Vorgangsberechnungen mit in Schleife geschalteten Ressourceneinheiten.[308] Laut *Senior und Halpin* sind dadurch komplexe Bauzeitanalysen für sehr kleine Netzpläne möglich.[309] Unter Berücksichtigung des Ressourceneinsatzes erlaubt ein zusätzlich integrierter Vorwärts- und Rückwärtsdurchlaufalgorithmus die Berechnung von Pufferzeiten.[310]

Zhang et al. stellen eine Methodik mit *CYCLONE*-Modellen vor, um die zyklischen Vorgangsberechnungen in Zeitfenstern von bestimmten Aktivitäten zu unterbrechen und später wieder fortzusetzen.[311] Mit diesem Ansatz lassen sich Pausen oder tägliche Arbeitszeiten modellieren.[312] Um dies zu erreichen, tastet ein spezieller Algorithmus die jeweiligen Aktivitäten ab.[313]

AbouRizk und Hajjar haben erkannt, dass Anwendungen für Bauablaufsimulationen auf die Baupraktiker zugeschnitten werden sollten.[314] Dies führte zur Entwicklung der domänenspezifischen Simulationsumgebung *SIMPHONY*, die auf *CYCLONE* basiert.[315] Zur Modellierung, Ausführung und Auswertung von Bauablaufsimulationen umfasst *SIMPHONY*

---

[303] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 294.
[304] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 295. Siehe *Kapitel 3.2.2*.
[305] Siehe *Kapitel 2.2.2*.
[306] Netzpläne sind spezialisierte Zustandsübergangsdiagramme. Mit ihnen können nur berechnete Zeitflüsse unter Berücksichtigung bestimmter Bedingungen betrachtet werden. Es findet keine ereignisdiskrete Markierung kausaler Informationsflüsse statt. Zudem fehlt eine Analysefunktion, mit der die Struktur der Elemente und ihre gegenseitige Beeinflussung dynamisch betrachtet werden könnte. Solche Anforderungen erfüllen Petri-Netze gem. *Kapitel 2.3.4*. Sie ermöglichen Simulationen dynamischer Informationsflüsse zwischen verschiedenen Modelleinheiten. Vgl. Peterson, 1977: S. 223 ff. Die Unterschiede werden bei der Nachbildung von Anordnungsbeziehungen *gem. DIN 69900* mit Petri-Netzen deutlich. Je nach Anordnungsbeziehung sind unterschiedlich viele Petri-Netz-Elemente erforderlich. Vgl. Samkari, 2014: S. 91.
[307] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 72.
[308] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 74-75.
[309] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 81.
[310] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 75-78.
[311] Vgl. Zhang/Li/Lu, 2008: S. 553.
[312] Vgl. Zhang/Li/Lu, 2008: S. 546.
[313] Vgl. Zhang/Li/Lu, 2008: S. 546-550.
[314] Vgl. AbouRizk/Hajjar, 1998: S. 604 ff.
[315] Vgl. Hajjar/AbouRizk, 1999: S. 1000.

verschiedene Standardwerkzeuge sowie Modellbausteine, die von einer Simulationsmodellierungssprache unterstützt und anwenderbezogen erweitert werden können.[316]

Xu und AbouRizk haben dreidimensionale *CAD*-Geometrien mit den Prozessmodellen von *SIMPHONY* verknüpft, um die Visualisierung der Simulationsergebnisse zu verbessern.[317] *Liu et al.* präsentieren eine Schnittstelle für den Informationsaustausch zwischen BIM-Gebäudemodellen und einem mit *SIMPHONY* erstellten Simulationsmodell.[318] Durch einen Informationsaustausch zwischen BIM-Gebäude- und ereignisdiskreten Simulationsmodellen ist nach *Liu et al.* eine verbesserte Modellierung der Ablauflogik möglich.[319] In den zugehörigen Simulationsberechnungen werden die Informationen des *BIM*-Gebäudemodells genutzt und auf vereinzelte Arbeitsbereiche übertragen, die innerhalb des Simulationsmodells durch spezielle Modellbausteine dargestellt werden.[320] Innerhalb einer Fallstudie haben sie die virtuelle Montage von Leichtbau-Paneelwänden betrachtet. Durch den Materialfluss der Leichtbau-Paneelwände über die Arbeitsbereiche zeichnet sich eine Fertigungsrichtung ab.[321]

Börkircher nutzt mit *OSim* einen ereignisdiskreten Ansatz zur Simulation alternativer Bauabläufe unter Störungseinflüssen im Rahmen von Sensitivitätsanalysen.[322] Der Ansatz sieht einen „Störungskatalog“ vor, der verschiedene Störfälle für die Simulationsmodellierung bereithält.[323] In späteren Simulationsstudien können die Störfälle erneut aufgerufen und somit für andere Bauzeitanalysen verwendet werden.[324] Sein Modellierungskonzept umfasst die Betrachtung von Zeitaufwandswerten sowie Material- und Personalbedarf mit stochastischen Abweichungen.[325] Geometrische Objekte, z. B. Arbeitsräume oder Bauteilgrößen, können jedoch nicht modelliert werden.[326]

2.4.2 Constraint-basierte Bauablaufsimulationen

König et al. betrachten Simulationsbausteine zur Produktionsplanung von Montageprozessen im Schiffs- und Tiefbau.[327] In ihren Untersuchungen stellen sie vergleichbare Produktionsbedingungen fest, wie z. B. Störungen der Ausführungsarbeiten, die sich u. a. in den Verfügbarkeiten der Ressourcen, der Freigabe von Raumnutzungen oder Änderungen von Transportwegen und Lieferterminen wiederfinden lassen.[328]

[316] Vgl. Hajjar/AbouRizk, 1999: S. 998-999.
[317] Vgl. Xu/AbouRizk, 1999: S. 971 ff.
[318] Vgl. Liu/Altaf/Lei/Al-Hussein, 2015: S. 048-2.
[319] Vgl. Liu/Altaf/Lei/Al-Hussein, 2015: S. 048-3.
[320] Vgl. Liu/Altaf/Lei/Al-Hussein, 2015: S. 048-3 ff.
[321] Vgl. Liu/Altaf/Lei/Al-Hussein, 2015: S. 048-6.
[322] Vgl. Börkircher, 2011: S. 17, 122-125, 146, 239-241.
[323] Vgl. Börkircher, 2011: S. 17, 157.
[324] Vgl. Börkircher, 2011: S. 239.
[325] Vgl. Börkircher, 2011: S. 77 ff.
[326] Vgl. Börkircher, 2011: S. 243.
[327] Vgl. König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 2, 5 ff.
[328] Vgl. König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: S. 1-2.

Beißert et al. simulieren mit der constraint-basierten Bauablaufsimulation virtuelle Ausbauarbeiten.[329] In ihren Untersuchungen haben sie die Produktionsprozesse von Leichtbauwänden mit mehreren Teilprozessen in Einzelschritten abgebildet.[330]

Voigtmann argumentiert, dass zur dynamischen Nachbildung von Ausbauarbeiten mit *CYCLONE* keine Wechselwirkungen zwischen den Produktionsprozessen und den Logistikabläufen simuliert werden können.[331] Daher verwendet sie die constraint-basierte Bauablaufsimulation.[332] Durch Parametrierungen des Ressourceneinsatzes, die innerhalb des Simulationsmodells in Form von Personal, Maschinen und Geräten, Material und kartesischen Räumlichkeiten betrachtet werden, lassen sich entsprechende Konfliktsituationen untersuchen.[333]

Berner et al. haben Ausbauarbeiten eines tatsächlich gebauten mehrgeschossigen Hotels mit der constraint-basierten Bauablaufsimulation rekonstruiert.[334] Nach *Berner et al*. sind Dokumente in Form von Bauwerks- und Terminplänen oder Bautagebüchern als Vergleichsgrößen zur Rekonstruktion der Baumaßnahme nur bedingt geeignet.[335] Erst durch die Befragung involvierter Bauleiter, die die verwendeten Zeitaufwandswerte plausibel einschätzten, waren mit ihren Untersuchungen realitätsnahe Ergebnisse möglich.[336]

Auch *Dori* nutzt einen constraint-basierten Simulationsansatz zur Berechnung von genaueren Pufferzeiten unter Berücksichtigung des Ressourceneinsatzes.[337] Wie bei der Netzplantechnik erfolgt eine Vor- und Rückwärts-Berechnung bzw. -Simulation.[338] Sein Ansatz verfügt zudem über einen Optimierungsalgorithmus[339] sowie über ein Dateneingabe-Tool, mit dem sich standardmäßige Bauverfahren gleichgearteter 3D-Bauteilmodelle anwenden lassen.[340] Im Rahmen seiner Untersuchungen hat er ein Brückenbauprojekt simuliert.[341]

2.4.3 Bauablaufsimulationen mit System-Dynamics

Khanzadi et al. stellen eine Vorgehensweise zur faktoriellen und assoziativen Ermittlung von Arbeitsproduktivitäten für Betonier-, Erdaushub-, Putz- und Stuckarbeiten unter Anwendung eines System-Dynamics-Modells vor.[342] Ihre Modellierung orientiert sich anhand der Dokumentation und Expertenbefragungen.[343] Als Ergebnis erzielen sie plausibilisierte Annahmen machbarer Arbeitsproduktivitäten.[344]

Chritamara et al. präsentieren einen Simulationsansatz mit System-Dynamics zur Risikobewertung möglicher Produktivitäten, um u. a. geplante Bauzeiten einhalten oder mögliche

[329] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 494 ff.
[330] Vgl. Beißert/König/Bargstädt, 2007: S. 494 ff.
[331] Vgl. Voigtmann, 2014: S. 23-24.
[332] Vgl. Voigtmann, 2014: S. 2-4, 16 ff., 56-57.
[333] Vgl. Voigtmann, 2014: S. 3, 34 ff.
[334] Vgl. Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 95.
[335] Vgl. Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 95.
[336] Vgl. Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 95.
[337] Vgl. Dori, 2015: S. 16-17, 21 ff., 85 ff.
[338] Vgl. Dori, 2015: S. 99-101.
[339] Vgl. Dori, 2015: S. 127 ff., 160 ff.
[340] Vgl. Dori, 2015: S. 96 ff.
[341] Vgl. Dori, 2015: S. 119 ff.
[342] Vgl. Khanzadi/Kaveh/Alipour/Mohammadi, 2017: S. 2684-2685, 2690-2692.
[343] Vgl. Khanzadi/Kaveh/Alipour/Mohammadi, 2017: S. 2689-2690.
[344] Vgl. Khanzadi/Kaveh/Alipour/Mohammadi, 2017: S. 2692-2693.

Lagerhaltungskosten reduzieren zu können.[345] Ihr Modellierungsvorschlag bezieht sich auf ein großes Infrastrukturprojekt.[346] Neben Expertenbefragungen und Annahmen der Fachliteratur bilden *Chritamara et al*. Untersuchungskriterien, woraus sie geeignete Parameter ableiten und eine Modellstruktur bestimmen.[347]

Jalil und Ford nutzen ein System-Dynamics-Modell zur Simulation zyklischer Nacharbeiten, die in der Arbeitsvorbereitung häufig durch geschätzte Vorgangsdauern oder geplante Pufferzeiten abgefangen werden (sollen).[348] In ihrem Beitrag stellen sie Simulationsexperimente für das Bauvorhaben eines Atomkraftwerks vor, das zuvor schon von *Taylor und Ford* betrachtet wurde.[349] Die Erkenntnisse nutzen *Jalil und Ford* zur Validierung des entwickelten Simulationsmodells.[350]

Han et al. führen mehrere bereits validierte System-Dynamics-Modelle aus der Fachliteratur zusammen und überprüfen ihre erzielten Simulationsergebnisse mit der tatsächlichen Ausführung eines größeren Bauprojekts an einer Hochschule.[351] In ihrer Fallstudie untersuchen sie Rückkopplungseffekte hinsichtlich (versteckter) Ausführungsfehler, die sie als Hauptursache für Nacharbeiten identifizieren.[352] Sie vergleichen die simulierten Prognosen mit den Erwartungen der Bauleitung über mögliche Projektverzögerungen.[353] Der Vergleich zeigt, dass die Simulation zuverlässigere Ergebnisse erzielen kann, als die zu optimistisch eingeschätzten Erwartungen der Bauleitung.[354] Anhand einer intensiv geführten Dokumentation validieren sie die Plausibilität ihrer Simulationsergebnisse.[355]

2.4.4 Agentenbasierte Bauablaufsimulationen

Kugler hat ein agentenbasiertes Simulationsmodell innerhalb eines CAD-Systems modelliert.[356] Dadurch lässt sich die Modellierungsphase kürzer und anwendungsfreundlicher gestalten.[357] Als Agenten definiert er Betriebsmittel-Agenten, Arbeitsgruppen-Agenten, arbeitende Agenten, Bauleitungs-Agenten, Materialaufzugs- und Personenaufzugs-Agenten.[358] Die Simulationsläufe erfolgen in einem externen Simulator.[359] Da die simulierten Ausführungsprozesse zusätzliche Agentenbewegungen berücksichtigen, sind die logistischen Anteile doppelt berücksichtigt.[360] Entsprechend ist zwischen Brutto- und Netto-Zeitaufwandswerten zu unterscheiden. Der Ansatz von *Kugler* bildet einen Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten.[361]

---

[345] Vgl. Chritamara/Ogunlana/Bach, 2002: S. 297-288.
[346] Vgl. Chritamara/Ogunlana/Bach, 2002: S. 269, 279.
[347] Vgl. Chritamara/Ogunlana/Bach, 2002: S. 274-279.
[348] Vgl. Jalili/Ford, 2016: S. 82, 88 ff.
[349] Vgl. Jalili/Ford, 2016: S. 83 i. V. m. Taylor/Ford, 2008: S. 423.
[350] Vgl. Jalili/Ford, 2016: S. 90-91.
[351] Vgl. Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2048-2049.
[352] Vgl. Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2046-2048.
[353] Vgl. Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2049-2052.
[354] Vgl. Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2051, 2052.
[355] Vgl. Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2049-2051.
[356] Vgl. Kugler, 2012: S. 217.
[357] Vgl. Kugler, 2012: S. 214.
[358] Vgl. Kugler, 2012: S. 138-139 ff.
[359] Vgl. Kugler, 2012: S. 105.
[360] Vgl. Kugler, 2012: S. 207 ff.
[361] Siehe Kordi, 2013: Dissertation; Samkari, 2014: Dissertation; Astour, 2015: Dissertation; Bleichert, 2015: Dissertation. Wobei *Kordi* das Produktmodell ohne (agentenbasierten) Simulationsansatz betrachtet.

Watkins et al. präsentieren eine agentenbasierte Simulationsmethode, um eine bestmögliche Arbeitsproduktivität unter Berücksichtigung von Arbeitsraumkonflikten zu untersuchen.[362] Die dort eingesetzten Agenten interagieren miteinander und nehmen Arbeitsräume als eine Ressource wahr.[363] Für die Bauablaufplanung wird ein Bauablauf in Form eines komplexen, emergenten Systemverhaltens simuliert.[364] Dafür verwenden *Watkins et al*. ein sehr einfaches 2D-Raster, um die Umwelt und Agenten abstrakt nachzubilden.[365] Eine Unterscheidung der Arbeitskräfte in verschiedene Gewerkegruppen entfällt.[366]

Kim und Kim haben einen agentenbasierten Ansatz zur Simulation von Erdbauarbeiten betrachtet.[367] Ihren Fokus richten sie auf die notwendige Taktung von Lkw-Fahrten zwischen Abtragungsort und Lagerstätte.[368] In dem Simulationsansatz sind Lkw-, Pkw- sowie Lader-Agenten vorgesehen.[369] Für Lkw-Fahrten können sie die Schaltungen von Lichtsignalanlagen unter variablen Verkehrsaufkommen testen.[370] Während der Simulation des Straßenverkehrs berücksichtigen die Lkw-Agenten verschiedene Verhaltensregeln, wie z. B. die Einhaltung von Fahrtabständen oder Spurwechseln.[371] Unter Berücksichtigung der Lkw-Fahrten sind Aussagen zur Maschinenauslastung und zu der Produktivität auf der Baustelle möglich.[372]

Ben-Alon und Sacks stellen die Implementierungsergebnisse eines agentenbasierten Simulationsmodells für Ausbauarbeiten vor.[373] Im Gegensatz zu anderen agentenbasierten Simulationsansätzen bilden sie ihre Bauablaufsimulation unter Zuhilfenahme eines BIM-Gebäudemodells ab.[374] In ihrer Studie analysieren sie ein emergentes Modellverhalten auf Basis simulierter Produktionsprozesse, die sich aus dem Zusammenspiel von Arbeitsgruppen und ihren „menschenähnlichen" Entscheidungen ergeben.[375] Sie betrachten unvorhersehbare Modellreaktionen in „Was-wäre-wenn"-Szenarien, in denen Interaktionen zwischen virtuellen Handwerkern stattfinden und variable Abhängigkeiten von Ressourcen sowie Produkt- und Prozessinformationen vorgenommen werden.[376] Die Simulation eines emergenten Modellverhaltens wird anhand mehrerer Szenarien mit unterschiedlichen Parameterwerten getestet.[377]

Raoufi und Robinson Fayek beschreiben einen Fuzzy-Agenten-Simulationsansatz. Sie nutzen mithilfe der Fuzzy-Methode linguistische Ausdrücke, wie „hoch", „mittelmäßig" oder „niedrig" motiviert, zur Quantifizierung von Verhaltensregeln der Agenten.[378] Über solche Restriktoren leiten sie u. a. subjektive Motivationen und Unsicherheiten ab, die sich auf die

[362] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 658.
[363] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 658-665.
[364] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 660-661.
[365] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 658 ff., 665.
[366] Vgl. Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: S. 665.
[367] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 867.
[368] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 868.
[369] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 870.
[370] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 871 ff.
[371] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 871-872.
[372] Vgl. Kim/Kim, 2010: S. 872-874.
[373] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 14 ff.
[374] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 14, 22 ff.
[375] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 16.
[376] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 12-13, 26-27.
[377] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 22 ff.
[378] Vgl. Raoufi/Robinson Fayek, 2018: S. 2.

simulierten Arbeitsproduktivitäten auswirken können.[379] Wenn z. B. die Arbeitsbedingungen der Agenten gut sind, ist ihre Motivation höher, so dass die Gesamtproduktivität der Arbeiterkolonne zunimmt.[380] Damit grenzen sich *Raoufi und Robinson Fayek* von anderen agentenbasierten Bauablaufsimulationen ab, die zumeist deterministische oder probabilistische Ansätze betrachten.[381] Das Modellverhalten verifizieren und validieren sie bezüglich einer dokumentierten Feldstudie.[382]

2.4.5 Bauablaufsimulationen mit Petri-Netzen

Zu Beginn der 1980er Jahre entwarf *Peterson* Ablaufreihenfolgen für den Bau eines Hauses mit der PERT-Methode und bildete dieselben Prozesse zum Vergleich mit einem Petri-Netz-Modell ab.[383] Das relativ einfache Modell enthält die Fertigstellungen verschiedener Gewerke, wie Erd-, Dachdecker-, Klempner-, Maler- oder Tischlerarbeiten.[384]

Franz hat die Eignung von Petri-Netzen zur Modellierung deutlich komplexerer Prozesse im Bauwesen untersucht.[385] Er betrachtet verschiedene Produktionsabläufe, z. B. die Herstellung von Betonpflastersteinen,[386] Arbeitsabläufe von Maurerarbeiten[387] oder Erdbauarbeiten, bei denen Reparatur- und Wartungszeiten berücksichtigt werden.[388] Aus mehreren Simulationsexperimenten über Betoneinbauarbeiten hat er Erkenntnisse für mögliche Zusammenstellungen von Arbeitsgruppen unter gleichzeitiger Betrachtung notwendiger Betonlieferungen gewonnen.[389]

Wakefield und Sears simulieren Bauabläufe mit farbigen Petri-Netzen. Durch das Schalten der Transitionen können Kranbewegungen oder Lkw-Fahrten zwischen einem Betonmischwerk und der Einbaustelle nachgebildet werden.[390] Ebenso simulieren sie mit dem Petri-Netz-Modell die Vorgangszeiten für Erdbauarbeiten eines Flughafens.[391] Zur Simulation von Produktivitäts-Schwankungen können in den Vorgangsberechnungen stochastische Werte einbezogen werden.[392]

Damrianant und Wakefield stellen Schalter-Funktionen vor, womit Verzögerungen und Unterbrechungen in zyklischen Petri-Netzen berücksichtigt werden.[393] Sie ergänzen die Petri-Netze um zusätzliche Modellierungselemente[394] zum Ein- und Ausschalten von Verzögerungsfaktoren.[395] Die Schalter-Funktion dient ebenso zur Simulation von

---

[379] Vgl. Raoufi/Robinson Fayek, 2018: S. 2, 7, 15.
[380] Vgl. Raoufi/Robinson Fayek, 2018: S. 11-13.
[381] Vgl. Raoufi/Robinson Fayek, 2018: S. 1-3.
[382] Vgl. Raoufi/Robinson Fayek, 2018: S. 13-15.
[383] Vgl. Peterson, 1981: S. 71-72.
[384] Vgl. Peterson, 1981: S. 71-72.
[385] Vgl. Franz, 1989: S. 5.
[386] Vgl. Franz, 1989: S. 34-37.
[387] Vgl. Franz, 1989: S. 51-53.
[388] Vgl. Franz, 1989: S. 99-102, 124.
[389] Vgl. Franz, 1989: S. 129-139.
[390] Zum Beispiel lassen sich verschiedene Materialien auf einer Baustelle durch farbige Token darstellen. Dadurch sind Unterscheidungen möglich, damit das Kran-Modell entsprechend reagiert. Vgl. Wakefield/Sears, 1997: S. 108.
[391] Vgl. Wakefield/Sears, 1997: S. 108-111.
[392] Vgl. Wakefield/Sears, 1997: S. 111.
[393] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 213.
[394] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 217 ff.
[395] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 217-222.

Unterbrechungen, sobald die als Token nachgebildeten Ressourcen in den Vorgangsberechnungen vorübergehend ignoriert werden.[396] Während eines Simulationslaufs lassen sich die Verzögerungsfaktoren und die Unterbrechungen für ein wahrscheinliches Schwanken der Ausführungsprozesse sowohl stochastisch als auch deterministisch gewichten.[397] Ihre Darstellungen verdeutlichen *Damrianant und Wakefield* mit der Simulation von Erdbau- und Betonierarbeiten.[398]

Schopbach simuliert Montageabläufe von Fertigteilen im Hochbau mit hierarchischen Petri-Netz-Modellen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Optimierungsmethoden.[399] In einem Basismodell fasst *Schopbach* die Aktivitäten einer Baustelle grob zusammen und gestaltet darin detailliertere Teilnetze zur Simulation von Kranaktivitäten oder Lkw-Fahrten.[400] In den Zeitberechnungen können Störzeiten durch stochastische Parameter vorgegeben werden.[401]

Chahrour betrachtet ein simulationsfähiges Produktmodell, das sich aus den Geometrie- und Betriebsmittel-Daten, aus CAD-Modellen und aus den Anordnungsbeziehungen von einer PPM-Software[402] zusammensetzt.[403] Das Produktmodell kann in einer Petri-Netz-basierten Simulationsumgebung zur Analyse von Erdarbeiten für Straßenbauprojekte ausgeführt werden.[404] Mit dem Simulationsmodell lassen sich Lagerstätten, Deponien und Baugruben etc. berücksichtigen, die durch Förderwege virtueller Lkw-Fahrten miteinander verbunden sind.[405] Mit dem Simulationsansatz kann *Chahrour* die Produktivitäten virtueller Baugeräte und die Wirtschaftlichkeit der Logistikprozesse experimentell untersuchen.[406]

Cheng et al. nutzen Petri-Netze zur Simulation von Erdbauarbeiten, um die Auslastung eines möglichen Geräteeinsatzes unter veränderlichen Baustellenbedingungen für ein Hochbauprojekt zu testen.[407] Mit einem probabilistischen Ansatz können sie Aussagen möglicher Produktivitäten und Kosteneinsparungen erzielen.[408] Dafür verwenden sie stochastische Faktoren, die mittels Fuzzy-Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Berechnungen berücksichtigt werden.[409] Hiermit bilden sie dynamische Änderungen der Ausführungsarbeiten sowie des Informationsflusses ab und betrachten darüber hinaus dynamische Abhängigkeitsbeziehungen zwischen unterschiedlich vielen Baugeräten innerhalb der virtuellen Baustellenumgebung.[410]

Samkari hat das Produktmodell von *Kugler* aufgegriffen. In seiner Arbeit definiert er nichtfunktionale Anforderungen für Simulationssysteme und entwirft einen Petri-Netz-

[396] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 223-228.
[397] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 220, 223-224.
[398] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 228-231.
[399] Vgl. Schopbach, 2001: S. 142, 148 ff.
[400] Vgl. Schopbach, 2001: S. 149-152.
[401] Vgl. Schopbach, 2001: S. 143-145, 146.
[402] In diesem Fall *MS-Project*.
[403] Vgl. Chahrour, 2007: S. 34-35, 115 ff.
[404] Vgl. Chahrour, 2007: S. 119.
[405] Vgl. Chahrour, 2007: S. 54-58, 90-91.
[406] Vgl. Chahrour, 2007: S. 141.
[407] Vgl. Cheng/Wang/Ling/Bai, 2011: S. 184.
[408] Vgl. Cheng/Wang/Ling/Bai, 2011: S. 187.
[409] Vgl. Cheng/Wang/Ling/Bai, 2011: S. 181-183.
[410] Vgl. Cheng/Wang/Ling/Bai, 2011: S. 182.

Simulator, der im Hintergrund eines BIM-Systems laufen könnte.[411] *Samkari* nutzt Produktmodelle, um sie in synchronen Ablaufvarianten mit einem agentenbasierten Petri-Netz-Simulator auszuführen.[412] Er zeigt, dass sich insbesondere Petri-Netze für schnelle und genaue Simulationsläufe eignen.[413] Durch seinen Ansatz lässt sich die eher aufwändige und komplizierte Petri-Netz-Modellierung innerhalb der CAD-Modellierungsumgebung verlagern – der Anwender wird somit von der eigentlichen Petri-Netz-Modellierung ferngehalten.[414]

In den beiden angerissenen Forschungsarbeiten, sowohl von *Kugler* als auch von *Samkari*, wird im Zuge der Validierung und Verifizierung ein „Vergleich mit aufgezeichneten Daten" vom Ist-Bauablauf eines Rohbaus durchgeführt, ohne Behinderungssachverhalte zu berücksichtigen.[415]

2.4.6 Weitere modellbasierte Ansätze

Zur Zerlegung von Grob- in Detailterminplänen untersucht *Dang* einen Simulationsansatz. Er geht auf parallel arbeitende Gewerke unter Berücksichtigung von vierdimensionalen Raum-Zeit-Abhängigkeiten und optimierten Ausführungsstrategien ein.[416] Dafür hat er einen Simulator innerhalb einer BIM-Modellierungsumgebung entwickelt, der verschiedene Abhängigkeiten unter Berücksichtigung von Störungen virtuell nachbilden kann.[417] Dazu lassen sich Vorgänge zeitlich nach hinten verschieben oder aussetzen, sobald Raum-Zeit- oder Ressourcen-Konflikte ein Weiterarbeiten verhindern würden.[418]

Lu und Olofsson führen aus, dass BIM-Modelle zur ereignisdiskreten Simulation geeignet sind.[419] Sie sehen in den strukturierten Bauteilmodellen gute Bedingungen für Informationsverknüpfungen.[420] Zur Berücksichtigung von Änderungen während der Ausführungsphase greifen *Lu und Olofsson* bei den Vorgangsberechnungen die Bauteilmengen ab.[421] Hierfür definieren sie in einer Datenbank ein Prozess-Modell, das mit den virtuellen Bauteilmengen zur Vorgangsberechnung verknüpft ist.[422]

Su et al. präsentieren eine Vorgehensweise, bei der die Ablaufstruktur eines 4D-BIM-Modells durch boolesche Operatoren mathematisch nachgebildet wird.[423] Ihre quantitative Darstellung erlaubt das Abbilden der Auswirkungen vorgangsbezogener Arbeitsbereiche und Arbeitswege mit ihren räumlichen und zeitlichen Abhängigkeiten zueinander.[424] Arbeitsbereiche werden durch begrenzte Räume definiert, die während einer Vorgangsdauer durch Arbeiter, Geräte

[411] Vgl. Samkari, 2014: S. 10, 52 ff., 194.
[412] Vgl. Samkari, 2014: S. 84 ff., 133 ff., 168-169.
[413] Vgl. Samkari, 2014: S. 174-176.
[414] Vgl. Samkari, 2014: S. 57-59, 113-115.
[415] Vgl. Samkari, 2014: S. 207-208, 174-176.
[416] Vgl. Dang, 2014: S. 44 ff.
[417] Vgl. Dang, 2014: S. 35 ff., 87 ff.
[418] Vgl. Dang, 2014: S. 84-101.
[419] Vgl. Lu/Olofsson, 2014: S. 81-82.
[420] Vgl. Lu/Olofsson, 2014: S. 76.
[421] Vgl. Lu/Olofsson, 2014: S. 75-76.
[422] Vgl. Lu/Olofsson, 2014: S. 79.
[423] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 3, 8-9.
[424] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 3 ff.

oder Materialien blockiert sind.[425] Laut *Su et al*. besteht ein weiterer Forschungsbedarf zur Integration temporärer Ressourcen, z. B. Kräne, Materiallager oder Gerüste.[426]

Sigalov und König haben einen automatisierten Ansatz zur Mustererkennung von Prozessvorlagen entworfen, die sich als vordefinierte und wiederverwendbare Prozessstrukturen darstellen.[427] Sie stellen zudem einen Algorithmus vor, mit dem gleichgeartete Teil-Bauablaufstrukturen zu einem robusten Gesamtbauablaufplan zusammengefügt werden können.[428] Dazu werden topologische Informationen aus BIM-Bauteilmodellen herangezogen und als Graphen extrahiert.[429] Als notwendige Voraussetzung zur Erkennung von Prozessmustern nennen sie eine modellinterne 4D-Verknüpfung zwischen einem Ablaufplan und den BIM-Bauteilmodellen.[430] Weitere Literatur zum Gebrauch und Umgang mit Prozessvorlagen ist u. a. bei *Samkari* nachzulesen.[431]

2.4.7 Ansätze zur digitalen Baufortschrittskontrolle

Ailland hat ein Konzept untersucht, mit dem Ist-Daten in ein Simulationsmodell überführt werden.[432] Im Fokus steht die Erfassung von Daten für ereignisorientierte Simulationsmodelle.[433] Mit dem Erfassungskonzept wird eine vorbereitende Maßnahme zur Strukturierung der Daten angestrebt. Infolgedessen soll die tägliche Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts durch Simulationsexperimente unterstützt werden.[434] Zur Bewertung und Beschreibung von Ereignissen definiert sie u. a. Informationsstützstellen,[435] die Informationen zu bestimmten Zeitpunkten über den erfassten Ist-Zustand abbilden.[436] Insbesondere strebt *Ailland* einen hohen Automatisierungsgrad bei der Datenerfassung an, wobei neben RFID-Transpondern[437] und Barcodes[438] auch bewährte Dokumentationsmittel, wie etwa das Bautagebuch, nicht vernachlässigt werden.[439]

Die automatische Erfassung von Ist-Daten zur kontinuierlichen Weiterentwicklung des Baufortschritts wird in zahlreichen Forschungsarbeiten mit oder ohne Simulationsansätzen betrachtet. Unter anderem werden Datenerfassungsmethoden durch Laserscans[440], Bildanalysen[441], GPS-Lokalisierungen[442] und Indoor-Lokalisierungen[443] oder Daten aus Wettermessstationen[444] untersucht. In einigen Ansätzen werden auf dieser Basis

[425] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 5.
[426] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 12.
[427] Vgl. Sigalov/König, 2017: S. 456 ff.
[428] Vgl. Sigalov/König, 2017: S. 461-466.
[429] Vgl. Sigalov/König, 2017: S. 457-458, 460.
[430] Vgl. Sigalov/König, 2017: S. 460.
[431] Vgl. Samkari, 2014: S. 38-40.
[432] Vgl. Ailland, 2013: S. 4, 20, 87 ff., 103 ff., 125.
[433] Vgl. Ailland, 2013: S. 6, 16, 32-33.
[434] Vgl. Ailland, 2013: S. 4, 39 ff.
[435] Vgl. Ailland, 2013: S. 39.
[436] Vgl. Ailland, 2013: S. 39 ff.
[437] Ebenso: Moon/Xu/Hou/Wu/Wang/Tam, 2017: S. 04017115 1-9; Dzeng/Lin/Hsiao, 2014: S. 68-83.
[438] Ebenso: Cheng/Chen, 2002: S. 23-33.
[439] Vgl. Ailland, 2013: S. 5, 126.
[440] Zum Beispiel: Behnam/Wickramasinghe/Ghaffar/Vu/Tang/Isa, 2016 S. 114-127.
[441] Zum Beispiel: Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 3-15; Fathi/Dai/Lourakis, 2015: S. 149-161.
[442] Zum Beispiel: Razavi/Haas, 2010: S. 1037-1046.
[443] Zum Beispiel: Razavi/Moselhi, 2012: S. 128-136.
[444] Vgl. Gelisen/Griffis, 2013: S. 7.

automatisierte Soll-Ist-Vergleiche inkl. Terminplanfortschreibung vorgenommen, die hauptsächlich der Baufortschrittskontrolle dienen soll.[445]

Entsprechend beschreibt *Horenburg* einen agentenbasierten und ereignisdiskreten Simulationsansatz für die Fortschreibung von Terminplänen.[446] Einen Fokus richtet er auf optimierte Ressourcendispositionen für Maschinen, Personal und Fläche auf Basis aktueller Baufortschritts-Informationen.[447] Zur schnellen Informationsübertragung berücksichtigt *Horenburg* eine Internet-Anbindung.[448] Nach Abschluss der Baumaßnahmen liegen mit dem Simulationsansatz sowohl ein Soll- als auch ein Ist-Terminplan für etwaige Gegenüberstellungen vor.[449]

Tuttas et al. untersuchen eine automatisierte Methode zur Überwachung des Baufortschritts mittels digitaler Methoden für Soll-Ist-Vergleiche von Rohbauten.[450] Von einem festen Standpunkt aus und mit einer Drohne erfassten sie den tatsächlichen Baufortschritt mittels aufeinanderfolgender Photographien.[451] Aus den Bildern leiten sie kontinuierlich erzeugte Punktwolken des tatsächlichen Leistungsgrades ab und nehmen einen Vergleich mit einem 4D-BIM-Modell vor.[452] Während die Punktwolken den Ist-Leistungsstand aus den Bildern repräsentieren, bildet das 4D-BIM-Modell den Soll-Leistungsstand ab.[453] *Tuttas et al*. verifizieren und validieren den Ansatz für zwei reale Baustellen.[454] Ungenaue Messungen existieren in ihren Untersuchungen nur bei kleinen Abweichungen, d. h. *1 cm* oder weniger.[455]

Gelisen und Griffis haben ein Scheduling-System entwickelt, um Produktivitätsverluste und die damit verbundenen Zeitverluste zu ermitteln.[456] Hierdurch kann eine fortwährende Entwicklung zur erzielten und noch ausstehenden Produktivität prognostiziert werden.[457] Die Ergebnisse lassen sich mit einer 4D-Visualisierungs-Software animieren.[458]

Die vorausgenannten Automatisierungsansätze sind auf vorgegebene Datensätze beschränkt, so dass etwaige Soll-Ist-Vergleiche nur auf Basis bestimmter Datentypen erfolgen.[459] Um mögliche Ungenauigkeiten während der Fortschreibung zu korrigieren, schlagen *Szczesny und König* den Entwurf einer reaktiven Fortschreibung eines Soll-Terminplans per constraint-basierter Simulation vor.[460] Diese reaktive Fortschreibung findet nur bei Überschreitung bestimmter Toleranzen statt.[461] Anhaltspunkte liefern Fuzzy-basierte Aussagen oder zeitliche

[445] Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 4; Szczesny/König, 2015: S. 2; Horenburg, 2014: S. 11; Gelisen/Griffis, 2013: S. 1-4.
[446] Vgl. Horenburg, 2014: S. 11.
[447] Vgl. Horenburg, 2014: S. 137-139, 161-163.
[448] Vgl. Horenburg, 2014: S. 140-141.
[449] Vgl. Horenburg, 2014: S. 12.
[450] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 4.
[451] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 3, 5.
[452] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 4, 6-7.
[453] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 4-5.
[454] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 9-13.
[455] Vgl. Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 14.
[456] Vgl. Gelisen/Griffis, 2013: S. 2, 9.
[457] Vgl. Gelisen/Griffis, 2013: S. 1-4.
[458] Vgl. Gelisen/Griffis, 2013: S. 6-9.
[459] Vgl. Fathi/Dai/Lourakis, 2015: S. 157.
[460] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 2-3.
[461] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 7.

Überschreitungen von Meilensteinen.[462] Im letzten Schritt lässt sich der geplante Soll- dem Ist-Terminplan für weitere Fortschreibungen angleichen.[463] Sobald Abweichungen infolge eines Soll-Ist-Vergleichs vorliegen, folgt die reaktive Fortschreibung per Simulation. Mit einem Optimierungsansatz soll die festgestellte Abweichung zwischen Soll- und Ist-Terminen möglichst gering gehalten werden.[464] Das Modell von *Szczesny und König* kann logistische Daten verarbeiten, wie z. B. aktuelle Informationen über verfügbare Materialien, Geräte, Arbeitskräfte, Lieferanten oder Daten, die den Zustand des Produktionsstandorts beschreiben.[465]

2.4.8 Zwischenbemerkung

Die in den vorausgegangenen Unterkapiteln genannten Forschungsarbeiten liefern lediglich einen (kleinen) Überblick, in denen Bauablaufsimulationen mit oder ohne BIM-Gebäudemodelle verwendet werden. Hauptsächlich sind die vorgestellten Simulationsansätze auf prognoseartige Planungen von Bauabläufen ausgerichtet.

Häufig ließ sich die Gültigkeit geeigneter Simulationsberechnungen in den oben beschriebenen Forschungsarbeiten durch den Abgleich mit einem tatsächlichen Ist-Bauablauf validieren. Diese Validierungen entsprechen Rekonstruktionen. Obwohl die Möglichkeit besteht, Bauabläufe nachträglich zu rekonstruieren, erfüllen die Simulationsansätze nicht die Anforderungen forensischer Bauzeitanalysen gem. *Kapitel 4*. So fehlt bspw. die Berücksichtigung menschlicher Absichten und Handlungsanweisungen während der Ausführungsarbeiten. Ebenso finden keine Bewertungen über machbare Produktivitäten oder juristische Betrachtungsweisen statt. Letztere betreffen z. B. Unterscheidungen zwischen den materiell-rechtlichen Ansprüchen, Aspekte zu den Vertragsauslegungen oder Tatsachenbehauptungen. Gemäß *Kapitel 3* und *Kapitel 4* sind dazu die erforderlichen Primärpflichten/Obliegenheiten aus dem Schuldverhältnis und die Vertragsbestandteile zu berücksichtigen.

Problematisch ist u. a., dass die aufgezählten Bauablaufsimulationen teilweise ganzheitliche Optimierungsansätze verwenden oder Wahrscheinlichkeiten betrachten. In aller Regel ist eine Optimierung immer auf einen bestimmten Zweck ausgerichtet.[466] Genau wie die Berücksichtigung ganzheitlicher Wahrscheinlichkeiten, können Optimierungsmethoden, je nach Zielfunktion, durchaus hypothetische Berechnungen mit einer Zeit-Kosten-Äquivalenz erzielen.

Grundsätzlich lassen sich mit Optimierungsansätzen Entscheidungsfindungen bei einer Rekonstruktion unterstützen. Dennoch gilt es in Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Sachverhalt abzuwägen, ob z. B. ein Schadensersatzanspruch gem. § 6 Abs. 6 VOB/B im Zusammenhang mit der *Schadensminderungspflicht* nach §§ 242, 254 BGB – hinsichtlich „Geld“ – und/oder einer Fristverlängerung gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B – hinsichtlich „Zeit“ – optimiert werden sollte.[467] Zwar mögen Optimierungs- und/oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen aus einer planerischen, baubetrieblichen Sicht angemessen erscheinen. Aus

[462] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 7-8.
[463] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 13-14.
[464] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 11-12.
[465] Vgl. Szczesny/König, 2015: S. 7, 14-15.
[466] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 2.
[467] Siehe „Schaden“ in *Kapitel 4.4.2*.

einer baurechtlichen Sicht könnten aber Vermischungen zwischen verschiedenen Argumentationslinien entstehen, bei denen sich der kausale Verlauf des Sachverhalts ggf. kaum mehr stichhaltig gem. *Kapitel 4.4.6* erklären ließe.[468] Zudem ist bei einer Optimierung eine vertretbare Durchführbarkeit zu beachten, die u. U. in den Berechnungsmethoden nicht vollumfänglich berücksichtigt wird. Aus diesem Grund sind derartige Methoden „mit Vorsicht zu genießen" und sicherheitshalber vorab juristisch zu prüfen.

Ebenso erfüllt eine baubegleitende Simulation nicht zwangsläufig die Anforderungen einer plausiblen Darlegung. Neben den oben genannten baurechtlichen Aspekten sind insbesondere solche Situationen kritisch anzusehen, bei denen ein plötzlicher Wegfall der Datenübertragung oder Verlust von bereits übertragenen Daten denkbar ist. Inkonsistente Fortschreibungspraktiken wären dann „leicht angreifbar". Aus diesem Grund sind die genannten Simulationsansätze aus *Kapitel 2.4.7* eher ein unterstützendes Werkzeug für eine baubegleitende Steuerung von Ausführungsarbeiten. Sie können einen wertvollen Beitrag zur Dokumentation des Ist-Bauablaufs und zur Rekonstruktion leisten. Hierzu beschreiben *Valavanoglou und Heck*, dass die in BIM-Modellen gespeicherten Daten alleine nicht ausreichen, um materiell-rechtliche Ansprüche darlegen zu können.[469] Stattdessen müssen die entscheidenden Daten für den Erwerb bestimmter Erkenntnisse sachlogisch aufgeschlüsselt werden.[470]

Aus diesen Gründen sind die folgenden Simulationsansätze von den vorausgegangenen Simulationsansätzen abzugrenzen. Im weiteren Text folgen Ansätze, bei denen Simulationen und/oder BIM-basierte Methoden für forensische Bauzeitanalysen Anwendung finden.

2.4.9 Digitale Ansätze zur baubetrieblichen Anspruchsbewertung

AbouRizk und Dozzy stellen einen Ansatz vor, bei dem Bauablaufsimulationen zur Analyse komplexer Produktionsprozesse eingesetzt werden, um Streitigkeiten in Mediationsverfahren[471], die sich aus Änderungen von Bauinhalten und -umständen ergeben, zu erklären und beizulegen.[472] Sie konzentrieren sich auf mögliche Produktivitätsverluste, die durch ein komplexes Ineinandergreifen verschiedener Arbeitsaufgaben entstehen können.[473] In ihrem Beitrag zeigen sie Möglichkeiten zur Rekonstruktion „passender" Produktivitätskennwerte, die sie mit einem Benchmarking geprüft haben. In sachlogischen „Was-wäre-wenn-Szenarien" betrachten sie Wechselwirkungen dynamischer Ressourcenverteilungen infolge von Entwurfsänderungen.[474] *AbouRizk und Dozzy* führen ihre Analysen mit zwei *CYCLONE*-Modellen für ein Brückenbauprojekt durch.[475] Der Zeitverbrauch geplanter und tatsächlicher Produktivitäten wird geschätzt. Dazu erfolgt für jede Arbeitsaufgabe die Festlegung einer optimistischen, einer pessimistischen sowie einer höchstwahrscheinlichen Vorgangsdauer

[468] Vgl. BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
[469] Vgl. Valavanoglou/Heck, 2016: S. 4.
[470] Grundsätzlich muss die Kausalität im Einzelnen nachgewiesen werden. In *Kapitel 4* wird darauf näher eingegangen.
[471] *Greenwald* untersucht darüber hinaus die Eignung von BIM-Modellen für den Einsatz in außergerichtlichen Streitbeilegungsverfahren. Vgl. Greenwald, 2013: S. 2-5.
[472] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 356-357.
[473] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 357.
[474] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 356.
[475] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 356-372.

durch die Befragung verschiedener Fachexperten.[476] Anhand der simulierten Bauzeiten kann der objektiv ermittelte Zeitaufwand für anfallende Mehrkosten ermittelt werden.[477] *Abdul-Malak et al*. bekräftigen die Sinnhaftigkeit des Simulationsansatzes, um die Bauablaufmodelle komplex und daher realitätsnäher zu rekonstruieren.[478]

Axelson stellt das Simulationswerkzeug *Delaymaster* vor, das ein simulationsbasiertes Analysewerkzeug zur Nachweisführung von Ansprüchen aus Bauablaufstörungen ist.[479] Der Simulator erzeugt einen Terminplan als gerichteten Graphen, der im Sinne einer „Salamitaktik" diskrete Ereignisse schneidet. Dadurch können einzelne Ereignisse des Projekts isoliert analysiert werden.[480] Als zeitliche Schnittpunkte nennt *Axelson* jeden möglichen Vorgangs-Startzeitpunkt und -Endzeitpunkt eines Projekts und weitere Schnittpunkte aus unabhängigen Ereignissen. Der Simulator führt zu jeder simulierten Stunde einen zusätzlichen Schnitt durch.[481] An den Schnittpunkten können Ereignisse oder analytische Berechnungselemente für kontinuierliche Zeitanalysen eingefügt werden, die zusammen eine quasikontinuierliche Simulationszeit ermöglichen.[482]

Williams et al. stellen eine Herangehensweise vor, um Ansprüche aus Projektstörungen mithilfe eines simulationsfähigen System-Dynamics-Modells nachzuweisen.[483] Sie betonen, dass System-Dynamics-Modelle zur Abbildung von Terminplänen mit variablen Ressourcen eingesetzt werden können und somit für Soll-Ist-Vergleiche geeignet sind. Ihr Ansatz basiert auf einem „cognitiv-mapping".[484] Hierunter ist ein Ansatz zu verstehen, bei dem zunächst eine Expertenbefragung mit den Projektbeteiligten durchgeführt wird, um eine Kausalitätsstruktur für Zeit- und Kostenfolgen abzuschätzen.[485] In ihr sind alle bekannten anspruchsauslösenden Ereignisse und Handlungsweisen in Form einer Kausalitätskarte enthalten.[486] *Williams et al.* beschreiben, dass die Kausalitätskarte sehr umfangreich ausfallen kann und daher bereits während der Befragungen durchgängig zu validieren und abstrahieren ist.[487] Die Kausalitätskarte dient als paralleler Entwurf des System-Dynamics-Modells, mit dem Sensitivitätsanalysen im Rahmen der Simulationsmodellierungen stattfinden.[488] Hierüber konnten fehlerhafte Annahmen im Entwurf der Kausalkarte identifiziert werden.[489] Um die Kausalkarte für Dritte übersichtlicher darzustellen, reduzieren *Williams et al*. das Modell auf „Schlüsselereignisse", die zur Anspruchsbegründung geeignet sind.[490] Dazu zählen Sachverhaltsschilderungen, die unumstritten sind und sich einem bestimmten Risikobereich

[476] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 370.
[477] Vgl. AbouRizk/Dozzy, 1993: S. 371-372.
[478] Vgl. Abdul-Malak/El-Saadi/Abou-Zeid, 2002: S. 88.
[479] Vgl. Axelson, St. 02.03.2017: S. 4.
[480] Vgl. Axelson, St. 02.03.2017: S. 6, 8.
[481] Vgl. Axelson, St. 02.03.2017: S. 6, 8.
[482] Vgl. Axelson, St. 02.03.2017: S. 6-9.
[483] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 1, 4.
[484] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 2.
[485] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 2-5.
[486] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 2-3.
[487] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 2.
[488] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 3-5.
[489] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 5.
[490] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 5-6.

zuordnen lassen. Eine Schwierigkeit besteht grundsätzlich darin, dass nicht ganz klar ist, wann ein System-Dynamics-Modell hinreichend genau abstrahiert und validiert ist.[491]

Laut *Rustom* gibt es in der Forschung spezielle Fallstudien, mit denen stochastische, produktivitätsbezogene Auswirkungen simuliert werden.[492] Diese Fähigkeit nutzt er zur Entwicklung einer Nachweismethodik, die auf drei zeitdiskreten Simulationsmodellen basiert. Als Ausgangssituation liegt ein Soll-Modell zugrunde, das anhand eines fortzuschreibenden Ist-Modells baubegleitend verifiziert und validiert wird.[493] Sobald die Simulationsergebnisse beider Modelle voneinander abweichen, erhält ein störungsmodifiziertes Modell einen Input aus den baubegleiteten Ist-Daten (z. B. einem Störungssachverhalt).[494] Hieraus können zwei verschiedene Vorgehensweisen entstehen:

- entweder ergeben sich Unstimmigkeiten zwischen zwei Vertragsparteien, die weiter bewertet werden müssen,
- oder es liegen keine Unstimmigkeiten vor, weil sich die Vertragsparteien auf ein Ergebnis einigen (in diesem Fall hätte das störungsmodifizierte Modell einen Status erreicht, der einen oder keinen Anspruch abbildet).[495]

Im Falle von Unstimmigkeiten wird das störungsmodifizierte Modell in ein stochastisches „Was-würde-passieren"-Modell überführt, mit dem sich schadensmindernde Aspekte infolge verschiedener Kombinationen von Eingangsparameter-Werten in mehreren Simulationsläufen prüfen lassen.[496] *Rustom* geht von der Existenz eines geeigneten Szenarios aus, das den Anspruch am ehesten darlegen kann.[497] Sobald eine Einigung vorliegt, dient das störungsmodifizierte Modell bis zum Zeitpunkt der Störung als Ist-Modell. Dieses kann nach einem Störungseintritt den weiteren Soll-Bauablauf abbilden.[498]

Ibbs und Liu präsentieren ein Analyseverfahren zur Begründung eines Anspruchs aus gestörten Bauabläufen auf Basis eines System-Dynamics-Modells.[499] Den Einsatz des Verfahrens erklären sie anhand von Ausbauarbeiten, mit denen sie komplexe Zusammenhänge zwischen vier Gewerken in drei Räumen beschreiben, die durch verspätete Entscheidungen seitens des Auftraggebers behindert werden.[500] Als Wirkungsgrößen werden „Koeffizientenwerte" gebildet, die in Form von Faktoren, wie z. B. aus Arbeitsplatzwechsel, Arbeitszeiten, Verfahrensart, Kolonnenstärke und -zusammensetzung u. v. m., auf Nachfolgevorgänge einwirken.[501] Die Koeffizienten beschreiben ebenfalls die Wirkung eines Störungssachverhalts. Durch die iterativen Berechnungsschritte ist es möglich, dass der Anwender der Modellierungstechnik ein selbstorganisatorisches Systemverhalten zur Weiterführung der Montage berücksichtigt. Der vorgestellte Ansatz wird durchweg gedanklich entwickelt; eine computergestützte Simulation ist dennoch nicht auszuschließen.

---

[491] Vgl. Williams/Ackermann/Eden, 2001: S. 4-6.
[492] Vgl. Rustom, 2006: S. 1.
[493] Vgl. Rustom, 2006: S. 11-18.
[494] Vgl. Rustom, 2006: S. 32.
[495] Vgl. Rustom, 2006: S. 12.
[496] Vgl. Rustom, 2006: S. 12.
[497] Vgl. Rustom, 2006: S. 12.
[498] Ein baubegleitender Nachweis könnte sich laut *Rustom* sehr aufwändig gestalten. Vgl. Rustom, 2006: S. 30.
[499] Vgl. Ibbs/Liu, 2005: S. 13.
[500] Vgl. Ibbs/Liu, 2005: S. 13.
[501] Vgl. Ibbs/Liu, 2005: S. 14.

Die Vorgehensweise zur Erstellung eines System-Dynamics-Modells beschreiben sie in den folgenden acht Schritten:[502]

1. Ermittlung der einzelnen Bautätigkeiten.
2. Ermittlung der einzelnen Arbeitsstunden.
3. Vernetzung der Bautätigkeiten untereinander.
4. Identifikation der Kausalbeziehungen zwischen den Bautätigkeiten inkl. Festlegung der Wirkungsintensität durch die Höhe des Koeffizientenwerts.
5. Berechnung der beschleunigten, verzögerten oder gestörten Arbeitsstunden einer Bautätigkeit, indem die aus dem Vorgänger resultierenden Koeffizientenwerte mit den Arbeitsstunden des Nachfolgers multipliziert werden.
6. Zusammenfügen aller Gesamtstunden für alle Bautätigkeiten nach einem Iterationsschritt.
7. Wiederholen des *6. Punkts*, bis der Untersuchungsgegenstand zufriedenstellend iteriert wurde.
8. Bildung einer Summe aus allen Iterationsschritten von allen Bautätigkeiten.

Eden et al. stellen ein Prozess-Benchmarking vor, das auf einer System-Dynamics-Modellierung mit anschließender computergestützter Simulation beruht.[503] Eine konkrete Vorgehensweise zur Durchführung der Simulation wird nicht vorgestellt. Vielmehr beschreiben sie, dass das Modell die Wirkungsabläufe je Arbeitstag untersucht und die Simulation genauere Ergebnisse liefern kann als eine konventionelle Nachweismethode (*measured-mile-Approach*), mit der sich Ansprüche aus Produktivitätsverlusten analysieren lassen.[504] Sie verweisen auf Literaturen, in der ereignisdiskrete Simulationsmethoden beschrieben werden, deren Zusammenhänge im Einzelnen speziell zu modellieren sind.[505] Der Ansatz soll laut *Eden et al*. umfangreiche Untersuchungen erfordern, um die jeweiligen Ereignisse zu identifizieren, die die Produktionsprozesse stören und/oder verzögern.[506]

Bei den vorausgegangenen Forschungsansätzen wird keine Verwendung von BIM-Modellen oder der Einsatz von selbstorganisierenden Kapazitäten vorgenommen. Obwohl *Guévremont und Hammad* den Begriff „4D-Simulation“ häufiger verwenden, beschäftigen sie sich eher mit der Verbindung zwischen einem BIM-Gebäudemodell und einem mit einem Netzplan erstellten Terminplan.[507] Entsprechend zeigen sie die Vorteile einer 4D-Visualisierung mithilfe eines 4D-BIM-Modells zur Darlegung von Raum-Zeit-Konflikten beim Bau eines Wasserkraftwerks.[508]

Chou und Yang beschreiben, dass bisher zwar viele BIM-Methoden zur Analyse von Zeitverzögerungen entwickelt wurden, doch Ansätze zur Analyse gestörter Bauabläufe im Rahmen rechtlicher Streitigkeiten nur marginale Beachtung finden.[509] Sie gehen davon aus, dass die meisten der in diesem Bereich bestehenden Problemstellungen durch den Einsatz

[502] Vgl. Ibbs/Liu, 2005: S. 12.
[503] Vgl. Eden/Williams/Ackermann, 2005: S. 135-139.
[504] Vgl. Eden/Williams/Ackermann, 2005: S. 136-138. Siehe auch *Kapitel 8.3.4*.
[505] Vgl. Eden/Williams/Ackermann, 2005: S. 137.
[506] Vgl. Eden/Williams/Ackermann, 2005: S. 138.
[507] Vgl. Guévremont/Hammad, 2018: S. 3-6.
[508] Vgl. Guévremont/Hammad, 2018: S. 4-7.
[509] Vgl. Chou/Yang, 2017: S. 4-5.

BIM-basierter Methoden vorteilhaft unterstützt werden könnten.[510] Somit beschreiben sie eine Forschungslücke für Bauzeitanalysen, die sich mit einer BIM-basierten Simulation zur Nachweisführung materiell-rechtlicher Ansprüche wegen Bauzeitverzögerungen schließen ließe.[511] Sie halten einen Ansatz für geeignet, bei dem Informationen in einem BIM-Modell zusammen mit einer PPM-Software termingerecht verwaltet werden können.[512] Konkrete Lösungsvorschläge nennen sie jedoch nicht.

Laut *Valavanoglou und Heck* eignen sich BIM-basierte Bauablaufsimulationen zur plausiblen Darlegung von Ansprüchen aus gestörten Bauabläufen.[513] Zur Erstellung simulationsfähiger 4D-BIM-Modelle gehen sie auf das notwendige Expertenwissen ein.[514] Gutachter müssen besonders ein Verständnis für die zweckmäßige Verwendung der Simulationsdaten aufbringen, damit sich die für den Anspruch relevanten Tatsachen nachvollziehbar darlegen lassen.[515] Sie sprechen sich für eine automatisierte Lösung zur Generierung von 4D-Modellen aus. Sobald sich die Ablauflogik der Terminpläne ändert, könnten mit einem solchen Ansatz die eingesetzten Ressourcen oder Pläne usw. aktualisiert werden.[516] Neben *Valavanoglou und Heck* verweisen auch *Koc und Skaik* auf Simulationstechniken zur Berechnung und Analyse erforderlicher Prozessabläufe.[517]

Die Gutachter müssen für ihre Darlegungen alle relevanten Tatsachen aus den Datenmengen, die in ein Modell gespeichert und durch die Simulation verarbeitet wurden, in einen plausiblen Zusammenhang bringen.[518] *Valavanoglou et al*. gehen darauf ein, dass die verfügbaren Informationen häufig in unstrukturierter oder unvollständiger Form vorliegen.[519] Darum beabsichtigen sie, bereits zu der Bauausführung die Informationen in einem BIM-Modell chronologisch einzubinden.[520]

Gibbs et al. gehen ebenfalls auf die Thematik ein, inwieweit sich 4D-Visualisierungen für den Einsatz in Gerichtsverfahren zur nachträglichen Darlegung von Ansprüchen aus Bauablaufstörungen eignen.[521] Um die Unterschiede herauszuarbeiten, haben sie ein komplexes Bauvorhaben mit parallelen und seriellen Aufgaben untersucht.[522] Sie kommen zu dem Ergebnis, dass computergestützte Visualisierungstechniken die Ansprüche aus Bauablaufstörungen erst verbessern, wenn sie zu einer verständlicheren Kommunikation beitragen.[523] Dazu sollten BIM-Modelle mit zusätzlichen Projektinformationen zeit- sowie bauteilbezogen verknüpft werden.[524] In einem späteren Aufsatz gehen *Gibbs et al*. darauf ein, dass es nur wenige Forschungsansätze gibt, wie ex-post durchgeführte Bauzeitanalysen verständlicher ausgearbeitet werden können, um die Kausalzusammenhänge zwischen

[510] Vgl. Chou/Yang, 2017: S. 1.
[511] Vgl. Chou/Yang, 2017: S. 4.
[512] Vgl. Chou/Yang, 2017: S. 4.
[513] Vgl. Valavanoglou/Heck, 2016: S. 1.
[514] Vgl. Valavanoglou/Heck, 2016: S. 3-5.
[515] Vgl. Valavanoglou/Heck, 2016: S. 3-4.
[516] Vgl. Valavanoglou/Heck, 2016: S. 4.
[517] Vgl. Koc/Skaik, 2014 (im Hinblick auf Azhar, 2011: S. 243).
[518] Vgl. Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: S. 392-394.
[519] Vgl. Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: S. 391-392.
[520] Vgl. Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: S. 391, 395-396.
[521] Vgl. Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2013: S. 2, 8-9.
[522] Vgl. Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2013: S. 5.
[523] Vgl. Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2013: S. 9-10.
[524] Vgl. Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2013: S. 9. Siehe auch Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2012: S. 36-44.

Ursache und Wirkung darzulegen.[525] Um die Eignung digitaler Techniken wie 4D-BIM zu testen haben *Gibbs et al*. einen Workshop mit *50* Richtern durchgeführt, die praktische Erfahrungen in Baustreitigkeiten besitzen.[526] Für den Workshop verknüpften sie ein 4D-Modell mit zusätzlichen Informationen wie Fotos, Videos, Grafiken usw., die über Schaltflächen durch die Workshop-Teilnehmer aufgerufen werden konnten.[527] Sie wurden in den Vergleichen zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Baufortschritt eingearbeitet.[528] Zur visuellen Ausgabe erstellten sie Videofilme, in denen die Sachverhalte durch Erzählungen und prägnante Textzeilen erklärt wurden.[529] Im Großen und Ganzen konnten sich die Teilnehmer interaktiv durch die Bauzeitanalyse „durchklicken". Die Mehrheit der Teilnehmer hat erklärt, dass eine Darstellung des Grundsachverhalts entscheidend sei, da die Richter i. d. R. nur wenig Zeit aufwenden können, um die strittigen Punkte zu verstehen.[530] Andere Teilnehmer äußerten Zweifel, ob die in der Visualisierung dargestellten Tatsachen korrekt, d. h. ohne Manipulationen, dargestellt werden.[531] Unter Berücksichtigung der vorausgenannten Punkte äußerten alle Richter, dass der von *Gibbs et al*. erarbeitete Ansatz ein geeignetes Mittel in der Gerichtspraxis sein kann.[532]

Soltani et al. sehen Vorteile in BIM-Modellen, um Informationszusammenhänge verständlicher darzulegen.[533] Sie stellen fest, dass BIM in der Fachliteratur hauptsächlich zur Entwurfsplanung oder als unterstützendes Werkzeug für die Kommunikation im Bau- und Gebäudemanagement betrachtet wird.[534] Allerdings lassen sich kaum Forschungsarbeiten über die Eignung von BIM-Modellen zur plausiblen Darlegung vertragsrechtlicher Ansprüche wiederfinden. *Soltani et al*. schätzen, dass die Zahl der Forschungsprojekte in diesem Bereich auf deutlich weniger als ein Dutzend beschränkt ist.[535] In ihrer Studie haben sie zwölf Experteninterviews mit Baurechtsanwälten und Gutachtern durchgeführt, um herauszufinden, warum BIM-Modelle trotz ihres anerkannten Potentials *nicht* zur Beschreibung von Tatsachenbehauptungen in Gerichtssälen verwendet werden.[536] Schon allein die Modellierung eines 3D-Modells wird als sehr zeitaufwändig und kostspielig angesehen.[537] Ein Teil der Befragten betrachtet BIM als ein Entwurfswerkzeug für Architekten.[538] Wie in der oben genannten Studie von *Gibbs et al*. befürchten einige der Workshop-Teilnehmer ebenfalls Manipulationsmöglichkeiten im Hintergrund der digitalen Darstellungen.[539]

[525] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 2-3.
[526] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 10.
[527] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 4-10.
[528] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 6.
[529] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 6.
[530] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 6-7.
[531] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 6.
[532] Vgl. Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: S. 10-11.
[533] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 771-772.
[534] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 773.
[535] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 773.
[536] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 774.
[537] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 774.
[538] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 774.
[539] Vgl. Soltani/Anderson/Kang, 2017: S. 774.

Forderungen der deutschen Fachliteratur:

Nach Auffassung von *Wotschke und Kindermann* verdeutlicht eine 4D-Visualisierung „[…] *die Auswirkungen von konkreten Störungssachverhalten überzeugend* […]. *Durch eine einzelfallbezogene Darstellung wird* [es] *möglich, die Störwirkungen auf den Bauablauf in Varianten zu untersuchen und damit verschiedene Szenarien zu simulieren*."[540] Eine solche Vorgehensweise soll nach Meinung der Autoren weiter erforscht werden, „[…] *um bspw. Bauzeitverlängerungsansprüche erfolgreich formulieren und durchsetzen zu können* […]."[541] Laut *Wotschke und Kindermann* lassen sich Störauswirkungen unter Zuhilfenahme von 4D-Visualisierungen besonders gut erkennen.[542] Weiterhin erwähnt *Hohmann* in einem Beitrag, in dem die Netzplantechnik mit der Simulationsmethode verglichen wird, „[…] *die Notwendigkeit, nachträglich einen bereits abgeschlossenen Bauablauf zu beurteilen, um Forderungen, welche z. B. durch Störungen des Bauablaufes hervorgerufen wurden, zu begründen oder abzuweisen.*"[543] Dabei ist „[…] *der Informationsgehalt der Netzplantechnik eindeutig geringer gegenüber der Simulation. So lassen sich Fragen nach der Produktivität von Einsatzmitteln, Leistungsreserven bzw. Ursachen von Leistungsminderungen mit der Netzplantechnik kaum beantworten*."[544] Ein Lösungsvorschlag wird allerdings nicht gezeigt. *Krause und Popescu* würden einen entsprechenden Einsatz von BIM begrüßen: „*Hierdurch bieten sich wertvolle Chancen zur Ursachenklärung von Bauablaufstörungen sowie zur Schaffung von Rechtsklarheit im Umgang mit baubetrieblichen Nachträgen an*."[545]

Ohne explizit den Einsatz einer Simulation für den Nachweis oder die Abwehr auftragnehmerseitiger Ansprüche aus Bauablaufstörungen zu benennen, bemängelt *Zeiß*, dass in den netzplanbasierten Nachweismethoden keine kybernetische Systembetrachtung mit all ihren wechselseitigen Rückkopplungen stattfindet.[546] Demnach kann nur ein belastbarer Nachweis erbracht werden, wenn das angewandte Verfahren „[…] *alle relevanten Ereignisse beurteilt, die jeweiligen Folgen als gemessene Abweichung von den definierten drei Grunddaten mit allen Verflechtungen als geschlossene Kausalkette darstellt*."[547] Als Lösungsansatz formuliert er eine detaillierte Soll-Produktionsplanung, die hinsichtlich ihrer Plausibilität wirklichkeitsnah für einen Soll-Ist-Vergleich anzupassen ist.[548] *Zeiß* schlägt entsprechende Arbeitspakete für jeden Teilprozess vor, die seiner Meinung nach bestenfalls einer sukzessiven Machbarkeitskontrolle unterliegen.[549] Gemäß einer systemtheoretischen Betrachtung sollten die Arbeitspakete mit den „drei Leitparametern" abgebildet werden, wodurch ein Soll-Ist-Vergleich in „schmerzlicher Kleinarbeit" durchführbar wird.[550] Die Leitparameter des Produktionsplans bestehen laut *Zeiß* aus den folgenden drei Punkten.[551]

[540] Wotschke/Kindermann, 2011: S. 107.
[541] Wotschke/Kindermann, 2011: S. 107.
[542] Vgl. Wotschke/Kindermann, 2011: S. 108.
[543] Hohmann, 1997: S. 1.
[544] Hohmann, 1997: S. 1-2.
[545] Krause/Popescu, 2017: S. 8.
[546] Vgl. Zeiß, 2009: S. 1.
[547] Zeiß, 2009: S. 11.
[548] Vgl. Zeiß, 2009: S. 1.
[549] Vgl. Zeiß, 2009: S. 10-13.
[550] Vgl. Zeiß, 2009: S. 10.
[551] Vgl. Zeiß, 2009: S. 10.

1. Soll-Leistungsmenge eines Arbeitspakets (bzw. einer Arbeitsaufgabe);
2. Soll-Arbeitszeit pro Leistungsmenge;
3. Anhand der Termine abzuleitende Soll-Arbeitskräfte je Arbeitspaket.

Mit seinem systemtheoretischen Ansatz beschreibt *Zeiß* typische Anforderungen, die durch den Einsatz eines Simulationsmodells erbracht werden könnten.

Eschenbruch und Gerstberger gehen darauf ein, dass zukünftig simulationsfähige BIM-Modelle in baubetrieblichen Gutachten Einsatz finden.[552] Insbesondere sollen digitale Methoden neben Geometrieänderungen auch terminliche Verlagerungen von Ausführungsgewerken ermöglichen.[553] So nennen sie Prüfalgorithmen, worüber „[…] *sich in der Zukunft nicht nur Mengen und Kosten von Geometrieanpassungen, sondern auch die terminlichen Folgen von Ablaufstörungen überprüfen lassen. Auch die Auswirkungen von Behinderungen werden mit Hilfe von Simulationstechniken besser einschätzbar. Es wird nicht lange dauern, bis derartige Simulationen Gegenstand gerichtlicher Auseinandersetzungen werden*.“[554] Laut *Eschenbruch und Gerstberger* eignen sich digitale Methoden für transparentere Bauzeitanalysen.[555] „*Nur so wird in der Zukunft den Anforderungen der Rechtsprechung an die tatsächliche Rückkoppelung der Modelle zu den realen Bauabläufen und sachgerechten Schätzungsgrundlagen für Sekundärstörungen und Auswirkungen von Behinderungsfolgen der Höhe nach Rechnung getragen werden können*.“[556] Die Visualisierungstechniken sollen Balkenpläne signifikant verbessern. *Eschenbruch und Gerstberger* berichten, dass „[…] *der Arbeitskreis Ia des Baugerichtstages in seiner Arbeitssitzung am 14.02.2018 empfohlen* [hat], *digitale Werkzeuge, soweit möglich, auch bei der Erstellung baubetrieblicher Gutachten zu nutzen*.“[557]

Darüber hinaus hat der *Arbeitskreis X des 7. Deutschen Baugerichtstags* einen Leitfaden zur Festlegung von differenzierten Bewertungsmodellen für die Durchführung erforderlicher Kausalitätsnachweise vorgeschlagen.[558] Ein Vorbild für diesen Vorschlag ist sicherlich das britische *SCL-Protocol*, in dem bereits mit *System-Dynamics* eine Simulationsmethode sowie der Einsatz von *BIM* Erwähnung finden.[559]

Grundsätzlich sind plausiblere Bauzeitanalysen zur Anspruchsbegründung bereits möglich, wenn allein die Bauteilmodelle eines BIM-Gebäudemodells für Vorgangsberechnungen verwendet werden.[560] Einen weiteren Vorteil sieht *Tiesler* darin, verschiedene Ablaufvarianten mit simulationsfähigen BIM-Modellen zu generieren und untereinander zu vergleichen.[561]

Zusammenfassend kann der Einsatz simulationsfähiger BIM-Modelle zur Analyse zeitabhängiger Ansprüche aus Bauablaufstörungen helfen, um Komplexitätsfragen zu

[552] Vgl. Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 52-53.
[553] Vgl. Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 52-53.
[554] Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 53.
[555] Vgl. Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 53.
[556] Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 53.
[557] Eschenbruch/Gerstberger, 2018: S. 53.
[558] Vgl. Arbeitskreis X, 2018: S. 62. Einen Leitfaden könnte bereits *Tiesler* liefern: Vgl. Tiesler, 2018.
[559] Vgl. SCL-Protocol, 2017.
[560] Vgl. Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 462.
[561] Vgl. Tiesler, 2018: S. 218.

verstehen. Dies ist darin begründet, dass die Daten digital erfasst und verwaltet werden können und die Simulation ohnehin ein Werkzeug zur Analyse komplexer Systeme darstellt.[562]

2.5 Forschungslücke

Die aktuelle nationale Praxis und Forschung bieten keine Lösungsansätze für den Einsatz BIM-basierter Bauablaufsimulationen zur Erstellung baubetrieblicher Gutachten. In der internationalen Literatur finden jedoch erste Überlegungen und Untersuchungen statt. Allerdings liefert der Großteil der Arbeiten eher konzeptionelle anstatt konkrete technische Lösungsansätze. Der Einsatz digitaler Methoden für Bauzeitanalysen fand unter Berücksichtigung des deutschen Baurechts in den letzten Jahren vermehrten Zuspruch. *Tabelle 2-5* liefert einen Überblick:

Tabelle 2-5: Digitale Bauzeitanalysen der internationalen und nationalen Fachliteratur[563]

Autoren	Simulationsmethode	BIM-basierter Einsatz	Baurecht
AbouRizk/Dozzy (1993) *Rustom (2006)* *Axelson (St. 02.03.2017)*	ereignisdiskrete Simulation	-	Ausland
Williams et al. (2001) *Ibbs/Liu (2005)* *Eden et al. (2005)*	System-Dynamics	-	
Valavanoglou/Heck (2016)	Verweis auf *Dang (2014)*	empfohlen	
Koc/Skaik (2014) *Gibbs et al. (2013)* *Gibbs et al. (2017)*	empfohlen	BIM	
SCL-Protocol (2017) *Chou/Yang (2017)* *Soltani et al. (2017)*	empfohlen	empfohlen	
Valavanoglou et al. (2017)	-	4D-BIM	
Guévremont/Hammad (2018)	-	4D-Visualisierung	
Hohmann (1997) *Zeiß (2009)*	empfohlen	-	Deutschland
Wotschke/Kindermann (2011)	indirekt empfohlen	4D-Visualisierung	
Krause/Popescu (2017)	-	empfohlen	
Gnerlich (2017) *Eschenbruch/Gerstberger (2018)* *Tiesler (2018)*	empfohlen	empfohlen	
Gnerlich et al. (2018)	empfohlen	4D-BIM	

Wie *Tabelle 2-5* zeigt, besteht die Forschungslücke in der Ausarbeitung einer BIM-basierten Bauablaufsimulation zur Nachweisführung von *zeitabhängigen Ansprüchen* wegen gestörter Bauabläufe. Die dafür erforderlichen Anforderungen sind in *Kapitel 3* i. V. m. *Kapitel 4* nachzulesen.

[562] Vgl. Gnerlich, 2017: 86.
[563] Eigene Darstellung.

3 Baubetriebliche Grundlagen

3.1 Bau-Soll

In der Baupraxis kann das Prinzip der Vertragsbildung in drei groben Schritten erfasst werden:

1. Der Auftraggeber beschreibt das gewünschte *Werk* als *Leistung*.
2. Der Auftragnehmer bietet einen entsprechenden *Preis* als *Gegenleistung*.
3. Sind sich beide Parteien über ihre jeweiligen Absichten einig, kann ein Werkvertrag vereinbart werden, so dass das *Schuldverhältnis* gem. *Kapitel 4.1.1* beginnt.

Welche Bauleistungen der Auftragnehmer dem Auftraggeber unter welchen Umständen schuldet, ist in den *Vertragsbestandteilen* enthalten und wird in einer ***Leistungsbeschreibung*** als ***Bau-Soll*** zusammengefasst.[564] Das Äquivalent zum Bau-Soll ist das ***Vergütungs-Soll***, das der „verpreisten" Gegenleistung entspricht.[565] Letzteres ist ein Geldbetrag, den der Auftraggeber dem Auftragnehmer für die vereinbarte Bauleistung schuldet.

Das Bau-Soll besteht aus *allen* vereinbarten Vertragsbestandteilen, woraus sich die Art und der Umfang der geschuldeten auszuführenden Bauleistungen ergeben.[566] *Würfele* stellt folgende Vertragsbestandteile als verschiedene Elemente zur Leistungsbeschreibung vor:

- ***konkrete Leistungsbeschreibungselemente:*** Hiermit wird jedes Bauprojekt individuell beschrieben und strukturiert. Neben Planungsleistungen ist damit die Ausführung der Bauleistung definiert; z. B. mit technischen sowie zeitbezogenen Plänen, Gutachten oder mit beigelegten Vertragstexten, wie etwa einem Leistungsverzeichnis, einem Leistungsprogramm, einer Baubeschreibung oder Vorbemerkungen.
- ***standardisierte Leistungsbeschreibungselemente:*** Diese sind Rechtsnormen (z. B. Landesbauordnungen), allgemeine Geschäftsbedingungen (etwa die VOB/B) oder Normen (bspw. VOB/C, ZTV).[567]

Die konkreten Leistungsbeschreibungselemente werden prognoseartig (ex-ante) ermittelt. Mit ihnen sind die geplanten Bautätigkeiten, die in der Zukunft liegen, möglichst umfassend zu beschreiben, um dem Unternehmer eine zuverlässige Preisbildung zu ermöglichen. Doch aufgrund des Unikatcharakters und der häufig mit einhergehenden Komplexität der Bau-

[564] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 2 i. V. m. Reister, 2014: S. 8 ff. *Kapellmann et al*. unterscheiden weiterhin in *Bauinhalt* („was soll gebaut werden?") und in *Bauumstände* („wie soll gebaut werden?"). Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 2. Regelungen zur Leistungsbeschreibung sind in §§ 7, 7a, 7b VOB/A sowie in §§ 1, 2 Abs. 1 VOB/B zu finden.

[565] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 21 ff.; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 2.

[566] Vgl. *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 1, Rdn. 3; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 26, 64. „Art und Umfang der Leistung" entspricht dem Wortlaut nach § 1 VOB/B.

[567] *Würfele* sieht auch im Werkerfolg ein Leistungsbeschreibungselement. Vgl. *Würfele in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 7-9, 22-24. Siehe auch *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 394-407; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 26; *Voit in* BeckOK, St. 01.05.2018: BGB § 650a, Rdn. 14. Für *standardisierte Leistungsbeschreibungselemente* siehe insbesondere § 1 Abs. 2 VOB/B.

projekte existiert keine absolute Sicherheit, dass die Leistung vor Ausführungsbeginn „vollständig" ausformuliert wird.[568] Hingegen soll mit den standardisierten Leistungsbeschreibungselementen ein Großteil der nicht erfassten „Lücken" durch allgemeingültige Bestimmungen geschlossen werden.

Die Gestaltung der konkreten Leistungsbeschreibung hängt außerdem von der Vertragsart ab. Laut § 2 Abs. 2 VOB/B ist die Vergütung auf Basis von Einheitspreisen auszulegen, solange keine andere Berechnungsart zugrunde liegt.

Beim ***Einheitspreisvertrag*** wird die Bauleistung technisch und wirtschaftlich in einheitliche Teilleistungen vom Auftraggeber in einer Leistungsbeschreibung aufgeführt. In einem Leistungsverzeichnis sind einzelne Positionen mit Ordnungszahlen strukturiert. Jede Position erhält einen ***Mengenvordersatz*** als Zahlenwert – stellvertretend für den voraussichtlichen Umfang der jeweiligen *Bautätigkeiten*. Der Mengenvordersatz ist an eine Leistungseinheit gekoppelt (z. B. Länge, Fläche, Volumen, Stückzahl, Gewicht usw.) und dient als Bezugsgröße für die auftragnehmerseitige Kalkulation. Auf dieser Basis erstellt der potentielle Auftragnehmer in einem Wettbewerbsverfahren ein Angebot, indem er dem Auftraggeber Einheitspreise zu einzelnen Leistungspositionen anbietet. Aus diesen Einheitspreisen bildet sich die Gesamtangebotssumme.

Dafür werden zunächst *Einzelkosten der Teilleistungen* (EKT) erfasst. Sie lassen sich den jeweiligen Leistungspositionen direkt zuweisen und können verschiedene Kostenarten enthalten, wie Lohn-, Material-, Geräte-, Fremdleistungskosten und/oder sonstige Kosten. In der Regel sind in den Verträgen *Produktivitätskennzahlen* zur Kalkulation von Leistungspositionen mit lohn- und maschinenintensiven Arbeiten enthalten. Sie sind von den jeweiligen Leistungseinheiten abhängig und z. B. durch Kostenkennwerte oder Leistungs- bzw. Zeitaufwandswerte definiert. Gleichzeitig stellen sie ein Angebot für den erwarteten Aufwand pro Teilleistung dar. Nach Auftragserteilung sind sie ein vereinbarter Vertragsbestandteil. Projekt- und Unternehmenskosten werden den einzelnen Leistungspositionen zugewiesen. Dies erfolgt durch fixe und zeitabhängige *Baustellengemeinkosten* (BGK) sowie durch *Allgemeine Geschäftskosten* (AGK). Abschließend wird ein Zuschlag für *Wagnis und Gewinn* (WuG) auf alle Leistungspositionen umgelegt. Dadurch lassen sich das unternehmerische Risiko zur Durchführung des Bauprojekts berücksichtigen und ein Preis für die Leistungspositionen bilden.

Die Abrechnungssumme resultiert im Wesentlichen aus § 2 Abs. 2 Satz 1 VOB/B. Sie zielt auf die tatsächlich geleisteten Mengen – die Leistungsmengen – und die angebotenen Einheitspreise unter Berücksichtigung etwaiger Vergütungsanpassungen oder -vereinbarungen (bspw. gem. § 2 Abs. 3, 5, 6 VOB/B) ab.

[568] Vgl. Reister, 2014: S. 10.

Reister zählt folgende Möglichkeiten auf, wie eine Leistungsfeststellung zustande kommen kann:

- Abrechnungspläne (Rückgriff auf Zeichnungen und/oder Verzeichnisse);
- gemeinsames Aufmaß auf der Baustelle;
- Begutachtung des Leistungszustandes (selbstständiges Beweisverfahren);
- Begutachtung des Leistungszustandes (Privatgutachten, Schiedsgutachten etc.).[569]

Nach dem Einreichen eines Angebots folgen teilweise mehrere Auftragsverhandlungen, in denen die Inhalte der Angebotskalkulation(en) ggf. ergänzt und geändert werden. Bei privaten Auftraggebern können durchaus Preisanpassungen stattfinden.[570] Die letzte Angebotskalkulation ist häufig die ***Auftragskalkulation*** und beinhaltet die vertraglich vereinbarte Preisbildung.[571] Nach gängiger Praxis wird sie in einem versiegelten Briefkuvert beim Auftraggeber hinterlegt. Diese Vorgehensweise soll den Parteiwillen der vereinbarten Preisabsprache sicherstellen. Die versiegelte Auftragskalkulation wird als ***Urkalkulation*** bezeichnet.[572]

Oftmals bleibt eine vollständige Erfassung des Bau-Solls aus, da es sich um eine in der Zukunft liegende, idealisierte Zustandsbeschreibung handelt. Daher werden u. a. unvollständige oder widersprüchliche Formulierungen sowie nicht notwendige Inhalte vertraglich vereinbart.[573] „*Der Auftragnehmer darf sich dann nicht darauf beschränken, die Leistungsbeschreibung abzuarbeiten*."[574]

Vielmehr muss er ein funktionales, mangelfreies und vollständiges Werk als ***Werkerfolg*** herstellen.[575] Dazu zählen insbesondere die „[…] *im Vertrag vereinbarten Leistungspflichten unter Einbeziehung der einschlägigen technischen Regelwerke* […]."[576] Die Anforderungen an das vom Auftragnehmer zu erstellende Werk gelten auch dann, wenn die

---

[569] Vgl. Reister, 2014: S. 201-204. Laut *ATV* ist die Leistung „[…] *aus Zeichnungen zu ermitteln, soweit die ausgeführte Leistung diesen Zeichnungen entspricht. Sind solche Zeichnungen nicht vorhanden, ist die Leistung aufzumessen*." DIN 18299, 2016: S. 15.

[570] Vgl. Reister, 2014: S. 76.

[571] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 440.

[572] Vgl. OLG Düsseldorf, Urteil vom 21.11.2014 – Az. I-22 U 37/14, BeckRS 2015: 226; Reister, 2014: S. 76.

[573] Vgl. *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 1, Rdn. 3; *Wieseler in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: § 1 Abs. 2, Rdn. 5-8.

[574] *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 1, Rdn. 3.

[575] Vgl. *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 1, Rdn. 3, 28; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 4; Kiedrowski, NJW 2017: 3484. Unter ***erfolgsorientiert*** wird die Erstellung eines *mangelfreien* sowie *funktionstüchtigen* Werks gem. § 633 BGB verstanden. *Busche in* MüKoBGB, 2018: BGB § 631, Rdn. 60-62; *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 1, 394-395, 442 ff. Darüber hinaus ist beim Wohnungsbau auch die optische Beschaffenheit in „ästhetischer Funktionalität" herzustellen. Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 1, Rdn. 31. Siehe auch BGH, Urteil vom 11.11.1999 – Az. VII ZR 403/98, IBRRS 2000: 0774. Laut *Jansen und von Rinteln* gibt es einen vertraglich geschuldeten Erfolg und ein vertraglich vereinbartes Leistungssoll. „*Der vertraglich geschuldete Erfolg besteht grundsätzlich darin, ein funktionstaugliches und zweckentsprechendes Werk herzustellen. Dieser Erfolg ist nicht identisch mit dem Leistungssoll, das als Äquivalent für die geschuldete Vergütung verlangt wird* […]". *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 810. Siehe *Kapitel 4.1.1*.

[576] *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 1, Rdn. 28. Die Aussagekraft des Zitats wurde inhaltlich begrenzt. *Jansen* beschreibt, dass der Begriff der Leistungsbeschreibung häufig unterschiedlich verstanden wird. Teilweise wird der *Werkerfolg* als ein Teil der Leistungsbeschreibung angesehen, andererseits wiederum nicht. In der vorliegenden Arbeit wird von der im Text genannten Definition ausgegangen.

Angaben in der Leistungsbeschreibung unvollständig oder ungeeignet sind, um den vereinbarten Erfolg herbeizuführen.[577] Jedoch ist der werkvertragliche Erfolg auf das „versprochene Werk" begrenzt.[578]

Somit können die auftragnehmerseitigen Leistungspflichten sogar über die Inhalte der Leistungsbeschreibung hinausgehen. Begrenzt wird das Ausmaß der Leistungsverpflichtung durch den Parteiwillen, der sich aus dem Vertrag ergibt.[579] Der Auftraggeber trägt die Verantwortung für seine gemachten Angaben.[580] Treten Unstimmigkeiten auf, muss der Vertrag u. U. *nach Verkehrssitte*[581] ausgelegt[582] werden, so dass der Parteiwille zwischen beiden Vertragspartnern berücksichtigt wird. Derweil ist u. a. zu klären, welche konkreten Leistungen zwischen den Vertragsparteien in der Leistungsbeschreibung vereinbart wurden, welche Absprachen stattfanden und ob der Auftragnehmer evtl. eine längere Leistungszeit und/oder eine zusätzliche Vergütung zur Leistungserbringung benötigt. Zudem sind Qualitätsstandards (z. B. anerkannte Regeln der Technik) sowie rechtliche Auslegungsregeln (z. B. Frist- und Terminbestimmungen gem. §§ 186 ff. BGB, siehe *Kapitel 3.3.2*) zu beachten.

Die Leistungsbeschreibungen sollten daher vor Beginn der Ausführungen im Sinne von § 7 VOB/A möglichst eindeutig und erschöpfend sein, damit bestenfalls keine Unstimmigkeiten zwischen Leistung und Gegenleistung entstehen.[583] *Reister* beschreibt, dass je klarer und eindeutiger das Bau-Soll definiert ist, desto geringer ist das sich hieraus ergebende Nachtragspotential mit seinen möglichen Streitigkeiten.[584]

Daher geht er u. a. auf die Wichtigkeit der im Bau-Soll verfassten Vertragsunterlagen ein, die eindeutige Angaben darüber enthalten sollten, wie ein bestimmtes Bauwerk unter welchen Bedingungen und in welcher Bauzeit herzustellen ist.[585]

Folgende Abgrenzung wird getroffen – das Bau-Soll setzt sich zusammen aus dem

- ***Bauinhalt:*** Zum Beispiel die Art und Eigenschaft des Werks, festgehalten im Leistungsverzeichnis sowie in der dem Vertrag als Anlage beigefügten Planung, und den
- ***Bauumständen:*** Zum Beispiel das gewünschte Bauverfahren, der Herstellungszeitraum, der Fertigstellungszeitpunkt, die Beschaffenheit der geforderten Leistung, Erfüllungsort und Auftragsumfang inkl. der erforderlichen Nebenleistungen; festgehalten u. a. in Terminplänen, Baufeldbeschreibungen oder durch den Auftraggeber vorgegebenen Rahmenbedingungen.[586]

Die Bauumstände umfassen damit die vertraglich vorgesehene ***Bauzeit***.

---

[577] Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 202.
[578] Vgl. Kapellmann, NJW 2005: 183.
[579] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2 Rdn. 28.
[580] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2 Rdn. 105-108.
[581] Auf die Auslegung wird hinsichtlich der Bauzeit in *Kapitel 4.1.4* eingegangen.
[582] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2 Rdn. 105-108.
[583] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 143.
[584] Vgl. Reister, 2014: S. 26.
[585] Vgl. Reister, 2014: S. 3.
[586] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 2; *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 1, 394-395; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 26-28.

3.2 Bauablauf- und Terminplanung

3.2.1 Baubetriebliche Aspekte

Bauablauf- und Terminplanung sind Methoden der ***Bauzeitplanung***. Mit ihnen lassen sich Bauabläufe anhand des Leistungsumfangs bzw. der Leistungsbeschreibung in Form eines sachlogischen Modells i. S. v. *Kapitel 2.1* prognostizieren und bestimmen. *Roquette et al*. schreiben, dass „[…] *jede Darstellung eines Bauablaufs ein Modell* [ist], *für das der tatsächliche Bauablauf zu einem gewissen Grad abstrahiert, vereinfacht und auf die Bedürfnisse des Anwenders ausgerichtet wurde.*“[587]

Mithilfe der *Bauzeitplanung* sollen einerseits die Termin- und Kostenentwicklung geplant sowie andererseits die Bauleistungen möglichst zielführend überwacht und gesteuert werden. Die Bauzeitplanung ist im Wesentlichen eine kognitive Aufgabe im Sinne einer Systemanalyse, die das Sortieren und Strukturieren von Informationen erfordert. Im Fokus der Betrachtungen stehen kausale Wirkungsbeziehungen der Ausführungsprozesse, unter Berücksichtigung vertraglicher Rahmenbedingungen, die zur Produktion von Bauwerken notwendig sind.

In der Bauablaufplanung wird die Abfolge des Bauablaufs ermittelt und in einem Bauablaufmodell, dem sog. ***Bauablaufplan***, festgehalten. Bei der Gliederung des Bauablaufplans kommt es auf die Wahl eines geeigneten Detaillierungsgrads der verschiedenen Tätigkeiten und Vereinbarungen an. Dies umfasst die Wahl eines geeigneten ***Bauverfahrens***[588] oder die Berücksichtigung auftraggeberseitiger Mitwirkungshandlungen.

In Bauablaufplänen lassen sich beliebige Vorgänge als ***Arbeitspakete***[589] zusammenfassen und müssen „[…] *logisch, räumlich oder zeitlich gegliedert werden. Technische Prozesse folgen i. d. R. technologischen Abläufen. Diese Abläufe werden wiederum in Ablaufabschnitte, also räumlich oder geometrisch, unterteilt.*“[590] Dazu wird i. d. R. ein ***Projektstrukturplan*** ausgearbeitet, der die Aufbau- sowie die Ablaufstruktur vorab in Teilmodelle gliedert. Mögliche Gliederungen des Projektstrukturplans sind:

- aufgabenbezogen (z. B. nach einem Bauarbeitsschlüssel),
- objektbezogen (z. B. im Sinne der DIN 276),
- aufgaben- und objektbezogen als Mischform.

Ein Hauptaugenmerk bei der Ermittlung der Vorgänge liegt in den jeweiligen Prozessdauern und ihren Reihenfolgen. Die Herausforderung besteht darin, dass die Ausführungsprozesse aufeinander aufbauen und sich am Fertigungsort gegenseitig beeinträchtigen können. Die

---

[587] Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 561.

[588] Ein Bauverfahren „[…] *ist die Technologie, die zur Erstellung einzelner Teile eines Bauwerkes oder des Gesamtbauwerkes angewendet wird.*“ Brüssel, 2007: S. 68.

[589] Nach *DIN 69001-5* ist ein Arbeitspaket eine „[…] *in sich geschlossene Aufgabenstellung innerhalb eines Projekts, die bis zu einem festgelegten Zeitpunkt mit definiertem Ergebnis und Aufwand vollbracht werden kann.* […] *Ein Arbeitspaket kann allerdings zur besseren Strukturierung und bei der Erstellung des Ablaufplans in Vorgänge aufgegliedert werden, die dabei untereinander in Beziehung gesetzt werden.*“ DIN 69001-5, 2009: S. 7 (unter Vernachlässigung der ANMERKUNG 1, wonach ein Arbeitspaket das kleinste Element eines Strukturplans darstellt).

[590] Bauch/Bargstädt, 2017: S. 415.

Reihenfolgen der Vorgänge sind in technologische und kapazitive Abhängigkeiten zu unterscheiden.[591]

Technologische Abhängigkeiten lassen sich gliedern in:

- ***zwingende Abhängigkeiten*** für konstruktive und ggf. vertragsrechtliche Reihenfolgen, wie z. B. erst die tragenden und dann die aufliegenden Bauteile – etwa: „Stuck- und Putzarbeiten vor Tapezierarbeiten" oder „Estricharbeiten vor Bodenbelagsarbeiten", und
- ***zweckmäßige Abhängigkeiten*** für strategische und beschädigungsarme Reihenfolgen, wie z. B. „großflächige vor kleinflächigen Arbeiten", „schmutzige vor sauberen Arbeiten" oder „nasse vor trockenen Arbeiten".[592]

Hingegen bestehen die ***kapazitiven Abhängigkeiten*** aus den verfügbaren ***Ressourcen*** und deren Disposition. Die Ressourcen unterscheiden sich in:

- ***Produktionsfaktoren:***
  - Arbeitskräfte,
  - Baugeräte (Krane, Lastenaufzüge, Pumpen etc.),
  - Betriebsmittel (Gerüste, Schalungen etc.),
  - Betriebsstoffe (Strom, Wasser, Telekommunikation etc.),
  - Baumaterialien (Steine, Farben, Türen etc.).
- ***Produktionsbedingungen:***
  - Steh- und Lagerflächen sowie
  - verfügbare und wahlweise Zeitdauern (u. a. versteckte Pufferzeiten).

Um die Kosten gering zu halten, sind die Bauleistungen in möglichst kurzen Ausführungszeiten zu realisieren, in denen aber bestimmte Qualitätsanforderungen einzuhalten sind. Die Bauwerksgeometrie größerer Bauprojekte sollte in ***Abschnitte*** unterteilt werden, so dass mehrere Fertigungsorte mit einem vergleichbaren Arbeitsumfang entstehen. Dies hat den Vorteil, dass die Ausführungsprozesse im Sinne einer Fließfertigung aufeinander eingetaktet werden und nebenläufige Tätigkeiten zeitgleich in anderen Gebäudeteilen stattfinden können.

Abschnitte lassen sich über den Grundriss oder geschossweise wählen. Bei Ausbauarbeiten ist eine raumweise Gliederung möglich. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die gesamte Ausführungszeit in einem gleichmäßigen Arbeitsfluss mit einer konstanten Kapazitätsanzahl zu verkürzen. Über eine ***Fertigungsrichtung*** können die Ressourcen die Abschnitte erreichen und dort die Ausführungsprozesse erledigen.

---

[591] Vgl. Racky, 1997: S. 39-40. Ähnlich: *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 557; Kugler, 2012: S. 70-72.

[592] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 49 ff.; Racky, 1997: S. 39-40; Bauch/Bargstädt, 2017: S. 172-173.

Laut *Nagel et al*. wird die Fertigungsrichtung von Ausführungsprozessen im Ausbau bedingt durch:

- den Typ sowie die Geometrie und Struktur des Bauwerks,
- die technologische Gesamtkonzeption des Gebäudes,
- die Reihenfolge der vorausgegangenen Fertigstellung,
- die zur Verfügung stehende Bauzeit,
- die Fertigungsreihenfolgen unterschiedlicher Arbeitsabschnitte und deren Größen.[593]

In der folgenden *Abbildung 3-1* werden Fertigungsrichtungen exemplarisch illustriert.

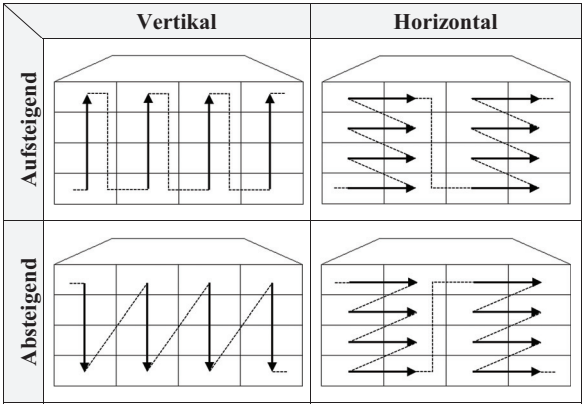


Abbildung 3-1: Mögliche Fertigungsrichtung für Ausbauarbeiten in Gebäudeansicht[594]

Kapazitive und zweckmäßige Abhängigkeiten können *priorisiert* werden, damit sich möglichst optimierte Ausführungsarbeiten einstellen. Neben den verfügbaren und geeigneten Ressourcen sind i. d. R. unterschiedliche Interessen, Absprachen oder Absichten der am Bauprojekt beteiligten Interessengruppen zu berücksichtigen und zeitlich aufeinander abzustimmen. Außerdem müssen die Anfangs- und Endtermine der Planungs- und Ausführungsleistungen folgerichtig sowie realistisch mit ihren unterschiedlichen Geschwindigkeiten ineinandergreifen und sollten sich möglichst ohne gegenseitige Beeinträchtigungen überlappen.[595]

Beim gewählten Ressourceneinsatz sind die produktionstechnische Ausführung, die Arbeitszeiten und die vertragsrechtlichen Bedingungen zu beachten. Dazu werden Vorgänge an Termine gekoppelt und orientieren sich ggf. an *Fristen*[596]. Dafür wird ein Bauablaufplan kalendermäßig angepasst und in einen ***Terminplan*** überführt. Dieser berücksichtigt Werk- und Feiertage; er lässt sich durchaus auch gröber, z. B. in Kalenderwochen, gliedern. Insgesamt hat das „[…] *Erstellen des Terminplans* […] *den Zweck, die Zeitpunkte für Beginn und Ende der Vorgänge zu berechnen und den Basisterminplan* [= Bauzeitenplan]

[593] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 47.
[594] Abgeändert i. A. a. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 48.
[595] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 415. Siehe *Nebenläufigkeit* in *Kapitel 2.1.5*.
[596] Siehe *Kapitel 3.3.2*.

festzulegen. […] *Der Terminplan bietet ein Mittel zur Beurteilung des tatsächlichen Fortschritts im Zeitverlauf anhand einer vorgegebenen objektiven Leistungsmessung.*“[597]

Bei der Erstellung eines Terminplans eignen sich folgende Darstellungsmethoden:

- Terminlisten,
- Linien-Diagramm (z. B. Weg-Zeit-Diagramm),
- Balkenplan bzw. Gantt-Diagramm (vernetzt oder unvernetzt),
- Netzplan.

Von den Darstellungsmethoden wird der ***Balkenplan*** am häufigsten verwendet. Er wird auch in § 34 LPH 8, d) HOAI zum Aufstellen, Fortschreiben und Überwachen als Grundleistung genannt. Die *DIN 69900* definiert, dass bei einem Balkenplan die Vorgangsdauern durch zeitproportionale ***Vorgangsbalken*** – stellvertretend für die Prozessdauer – über eine Zeitachse darzustellen sind.[598] Jeder eingezeichnete Balken entspricht der Dauer eines Ablaufabschnitts nach *REFA-Methodenlehre*[599] und verkörpert ein *Element der Systemtheorie*[600]. Bedarfsweise ist eine farbige Gestaltung der Vorgangsbalken möglich, damit sich verschiedene Vorgänge voneinander abheben, was zu mehr Übersicht führen kann. Vorgänge, bei denen es nicht auf die Dauer ankommt, lassen sich in Balkenplänen als zeitdiskrete Ereignisse darstellen. Diese werden als ***Meilensteine*** bezeichnet. Meilensteine können fällige Mitwirkungspflichten kennzeichnen, wie z. B. terminierte Plan- sowie Materiallieferungen. Bei Bedarf ist auch die Einarbeitung zeitproportionaler Personalbedarfskurven möglich, die im Verhältnis zu den Vorgängen gezeigt werden. Mit Sammelvorgängen lassen sich zudem Vorgänge im Sinne von Teilsystemen gruppieren. *Abbildung 3-2* zeigt einen exemplarischen Balkenplan.

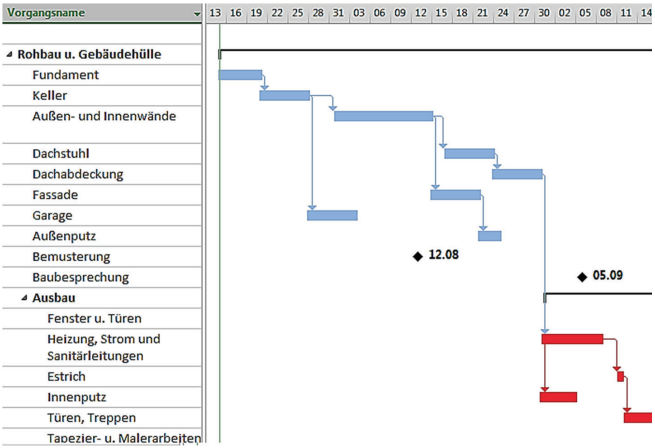


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines vernetzten Balkenplans[601]

[597] DIN ISO 21500, 2016: S. 32.
[598] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 17, 27.
[599] Siehe *Kapitel 2.1.11*.
[600] Siehe *Kapitel 2.1.1*.
[601] Eigene Darstellung.

Balken und Meilensteine können durch Anordnungsbeziehungen miteinander verknüpft werden. Sobald eine Verknüpfung vorliegt, handelt es sich um einen ***vernetzten Balkenplan***. Zur Erstellung des Balkenplans stehen aus technischer Sicht die Berechnung der Vorgangsdauer und/oder deren Zeitreserven im Vordergrund. Nach dem Stand der Praxis werden dafür i. d. R. PPM-Softwarelösungen eingesetzt. Eine PPM-Software nutzt üblicherweise die ***Netzplantechnik*** als Hintergrundberechnung zur Erstellung vernetzter Balkenpläne.[602]

3.2.2 Netzplantechnik

Hauptsächlich wird derzeit die Netzplantechnik eingesetzt, um gestörte Bauabläufe zu berechnen und zu analysieren. Sie basiert auf der Graphentheorie und bildet *logische Modelle*[603] ab. Mit ihr lassen sich zeitliche Wirkungszusammenhänge zwischen den Vorgängen (als Kästchen oder Kreise) eines Bauablaufs oder andere Prozessreihenfolgen planen. Diese werden durch Pfeile dargestellt und als Anordnungsbeziehungen bezeichnet. Laut *DIN 69900* gibt es folgende Netzplanmethoden:

- ***Vorgangsknoten-Netzplan*** (MPM),
- ***Vorgangspfeil-Netzplan*** (CPM) und
- ***Ereignisknoten-Netzplan*** (PERT).[604]

Gemäß der *DIN 69900* werden gegenwärtig von den drei Netzplanmethoden nur noch Vorgangsknoten-Netzpläne verwendet.[605] Auch die internationale Fachliteratur schreibt regelmäßig über CPM-Netzpläne, die jedoch in ihrer Anwendung eher den Vorgangsknoten-Netzplänen entsprechen. Aufgrund der Umstände und teilweise uneinheitlichen Termini wird in der weiteren Arbeit grundsätzlich von Vorgangsknoten-Netzplänen (MPM) ausgegangen – die anderen Methoden werden nicht weiter erläutert.

In den Kästchen, die Vorgangsknoten darstellen, können Informationen hinterlegt werden. Neben Informationen über verfügbare Vorgangsbezeichnungen, Ressourcen usw. lassen sich insbesondere zeitbezogene Berechnungsgrundlagen (Termine, Vorgangsdauern, Pufferzeiten, Zeitabstände und geplante sowie errechnete Zeitpunkte) in die Vorgänge eintragen.[606] Dafür erhält ein Vorgangsknoten ein Schriftfeld, das häufig wie eine Tabelle ausgestaltet ist.

Als weitere zeitbezogene Berechnungsgrundlagen dienen die Anordnungsbeziehungen, die die Vorgangsknoten in eine bestimmte Richtung verknüpfen und damit die Berechnungsreihenfolgen festlegen. *Abbildung 3-3* zeigt die folgenden Anordnungsbeziehungen:

- ***Normalfolge*** (Anfang-Ende-Folge; zwei Vorgänge sollen direkt aufeinander folgen),
- ***Anfangsfolge*** (Anfang-Anfang-Folge; zwei Vorgänge sollen gleichzeitig beginnen),
- ***Endfolge*** (Ende-Ende-Folge; zwei Vorgänge sollen gleichzeitig enden),
- ***Sprungfolge*** (Anfang-Ende-Folge; sie ist eine rückwärtsgerichtete Normalfolge).

---

[602] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 27.
[603] Siehe *Kapitel 2.2.3*.
[604] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 10.
[605] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 17.
[606] Vgl. DIN 69900, 2009: S. 19 ff.

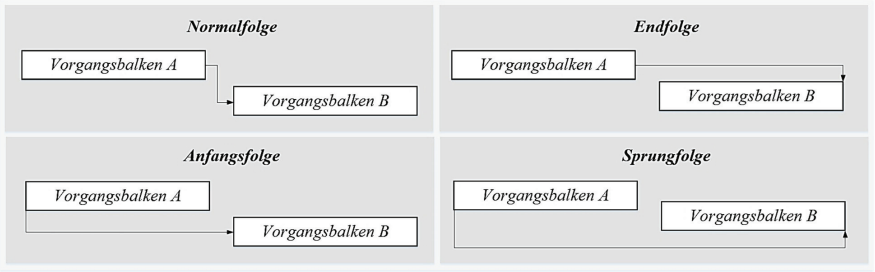


Abbildung 3-3: Anordnungsbeziehungen dargestellt als Vorgangsbalken[607]

Unter Zuhilfenahme der zeitbezogenen Daten und Berücksichtigung verfügbarer Ressourcen erfolgt mit einer *Vorwärts- sowie einer Rückwärtsberechnung* die Ermittlung der Zeitreserven. Aus der Gegenüberstellung zwischen verschiedenen End- und Anfangszeiten können ***Pufferzeiten*** und der ***kritische Weg*** berechnet werden.

Der kritische Weg ist eine Verknüpfungsreihenfolge im Bauablaufplan für die kürzeste Projektdurchlaufzeit. Er beschreibt den zeitlichen Rahmen, der eingehalten werden muss, damit das Gesamtprojekt sich nicht verzögert.

Alle Vorgänge auf dem kritischen Weg besitzen *keine Pufferzeit*; ihre frühesten und spätesten Anfangszeiten liegen zeitgleich aufeinander. Beispielsweise befinden sich in einem Bauablaufplan immer der erste sowie der letzte Vorgang bzw. Meilenstein des Projekts auf dem kritischen Weg. Zugleich können weitere Vorgänge auf dem kritischen Weg liegen und entsprechend „zeitkritisch" sein – siehe *Abbildung 3-4*. Sollten sich ihre Vorgangsdauern verlängern, verschiebt sich der angepeilte Endtermin des Projekts zeitlich nach hinten.

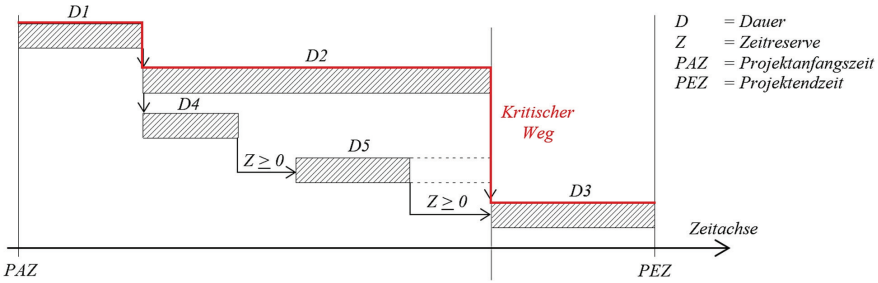


Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung des kritischen Wegs[608]

Innerhalb eines Bauprojekts können Teilprojekte existieren, die relativ zum gesamten Bauablaufplan teilkritische Wege abzeichnen. Alle Vorgänge, die nicht auf einem kritischen Weg liegen, sind innerhalb der *Pufferzeit* zeitlich verschieb- oder verlängerbar. Jede

[607] Eigene Darstellung.
[608] Eigene Darstellung.

Pufferzeit ist ein Zeitvorrat, der über den geplanten Verbrauch hinaus durch die Vorgänge „aufgezehrt“ werden kann.[609]

In der Vorwärts- und Rückwärtsrechnung werden zur Bestimmung der Pufferzeiten, neben den Anordnungsbeziehungen, auch die ***zeitlichen Lagen*** der Vorgänger- und Nachfolger-Vorgänge berücksichtigt. *Abbildung 3-5* veranschaulicht die Zusammenhänge. Darüber hinaus kann die vorgangsbezogene Detaillierungstiefe einen Einfluss auf die Berechnung und Größe der Zeitreserven nehmen.[610]

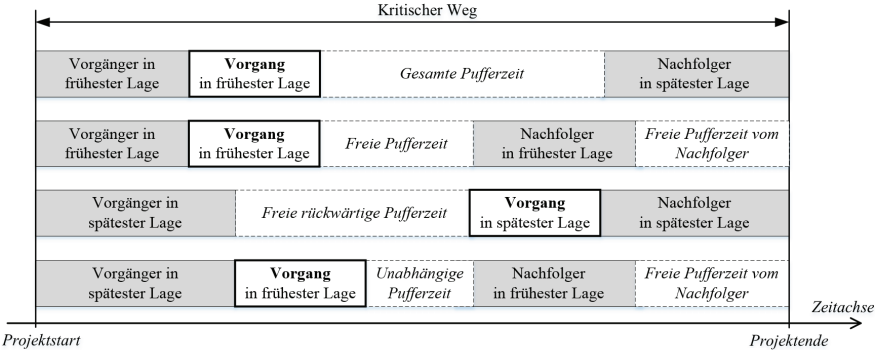


Abbildung 3-5: Unterscheidung der Pufferzeiten in verschiedenen Zeitlagen[611]

Pufferzeiten sind auch anderweitig bestimmbar. Es besteht die Möglichkeit, dass Vorgänge extra für Pufferzeiten in den Netzplan eingearbeitet, Meilensteine als „Rasterpunkte“ vorgesehen oder Anordnungsbeziehungen mit Zeitabständen ausgearbeitet werden.[612]

Eine versteckte Verrechnung von Pufferzeiten in den Vorgängen ist möglich. Das kann beispielsweise durch die Verrechnung konstanter Zeitdauern oder bewusst niedrig gewählter Ressourcen in der Bauablaufplanung erfolgen, damit die Ausführungsdauer länger anhält.[613] Neben solchen ***geplanten Pufferzeiten*** können ebenso ***ungeplante Pufferzeiten*** in den Vorgängen „versteckt“ sein. Letztere entstehen aus falschen Annahmen über die tatsächlich erforderlichen Produktivitäten. Sollten beispielsweise bestimmte Ausführungsarbeiten schneller als geplant voranschreiten, bleiben ursprünglich geplante Pufferzeiten übrig.[614] Diesen Effekt kann ebenso ein paralleles Arbeiten hervorrufen, das vorab nicht geplant war.[615] Auch die nachträgliche Änderung von Anordnungsbeziehungen, ohne Umstellung des Bauablaufs, kann Pufferzeiten entstehen lassen.[616]

[609] Vgl. DIN 69900, 2009: S 12.
[610] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 128; Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 457 ff.
[611] Eigene Darstellung.
[612] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 129-602.
[613] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 128.
[614] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 130.
[615] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 130.
[616] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 130.

3.2.3 Berechnung von Vorgangsdauern

Die Ermittlung der Vorgangsdauern sind Schätzungen. Mit ihnen wird ein zeitlicher Rahmen zur Ausführung der Leistungen vorgegeben. Zur Berechnung der Vorgangsdauern kommen oftmals numerische *Produktivitätskennzahlen* über die Prozessgeschwindigkeiten der ausstehenden Arbeitsaufgaben zum Einsatz. Im Allgemeinen sind dies Verhältniszahlen zur *Arbeitsproduktivität*, die als ***Leistungswerte*** bezeichnet werden und in reziproker Form ***Zeitaufwandswerte*** darstellen.[617] In diesen Werten sind bestimmte Baustellensituationen enthalten, die üblicherweise hypothetisch auf andere Bauausführungsprozesse mit annähernd vergleichbaren Baustellensituationen übertragen werden.

In der baubetrieblichen Fachliteratur werden Leistungswerte eher für maschinenintensive Arbeitsaufgaben verrechnet. Demgegenüber sind Zeitaufwandswerte für Berechnungen lohnintensiver bzw. händischer Arbeitsaufgaben vorgesehen. Sie lassen sich gewinnen aus:

- vergleichbaren Tätigkeiten vorausgegangener Projekte (Nachkalkulation),
- erfahrungsbasierten Einschätzungen,
- gezielten Arbeitsstudien (REFA-Zeitaufnahmen),
- Zeitrichtwerten aus der Literatur (ARH-Tafeln),
- Empfehlungen von involvierten Unternehmen (z. B. Geräte- oder Materialhersteller).

Die Formel zur Berechnung der Vorgangsdauer lautet:

Vorgangsdauer je Arbeiterkolonne (in Kolonnen-Stunden ohne tägliche Arbeitszeiten):

$$Dauer\ je\ Kolonne = Ad_{Kol} = \frac{Aw \cdot Am}{|M_{AK}|}$$

Anzahl der Arbeitskräfte pro Kolonne:

$$M_{AK} = \{AK \mid AK\ je\ Arbeitskraft\ pro\ Kolonne\};$$

$$|M_{AK}| = Anzahl\ aller\ Arbeitskräfte\ der\ Kolonne$$

Legende:

Ad_{Kol} = *Arbeitsdauer der Kolonne*
AK = *Arbeitskraft*
Am = *Ausführungsmenge*
Aw = *Zeitaufwandswert der Arbeitsaufgabe*
M_{AK} = *Kolonne als Menge aller Arbeitskräfte*

Objektiv bewertet erzielen alle Arbeitskräfte in der vorausgegangenen Berechnung identische Zeitaufwandswerte. Es handelt sich um eine lineare Funktion, bei der die Vorgangsdauer disproportional zur Anzahl der Arbeitskräfte zu- oder abnimmt. Diese Vorgehensweise ist dahingehend problematisch, da die *Zeitaufwandswerte* durchaus mehrere Arbeitsaufgaben unscharf bzw. pauschal zusammenfassen.[618] In der Realität sind Ausführungsgeschwindigkeiten alles andere als konstant. Beispielsweise können u. a.

[617] Vgl. Hofstadler, 2014: S. 1, 11, 13-14. Die *Arbeitsproduktivität* bildet sich durch das Verhältnis von Menge pro Zeit und entspricht damit einem Leistungswert – siehe *Kapitel 2.1.7*.
[618] Vgl. Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 455-462.

Umwelteinflüsse (wie der Grundriss des Bauwerks sowie Licht- und Temperaturverhältnisse etc.) oder der *Einarbeitungseffekt* dazu beitragen, dass tatsächlich *nichtlineare* Ausführungsgeschwindigkeiten erreicht werden. *Hofstadler* argumentiert, dass die in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Produktivitätsermittlung teilweise schon mehrere Jahrzehnte alt sind und zwischenzeitlich erzielte Rationalisierungseffekte und sonstige Entwicklungen nicht mehr berücksichtigen.[619] Solche Umstände sollten bei der Vorgangsberechnung beachtet werden.

Daneben können Zeitvorgaben für Vorgangsdauern direkt festgelegt werden. Dies erfolgt bspw. bei der Gewährung von Vorlauffristen gem. § 6 Abs. 4 VOB/B durch erwartete Trocknungs- oder Aushärtezeiten von verarbeiteten Baustoffen.

Weiterhin bietet die PERT-Methode (Ereignis-Knoten-Netzplan) eine „Zwischenlösung" an. Hier werden erwartete Vorgangsdauern mit einer gewichteten Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt. Zunächst sind Einschätzungen vorzunehmen, wie lange ein Vorgang im:

- Normalfall (erwartete Vorgangsdauer),
- ungünstigsten Fall (pessimistische Vorgangsdauer) und
- günstigsten Fall (optimistische Vorgangsdauer)

anhält. Die ermittelte Vorgangsdauer lässt sich durch ein gewichtetes arithmetisches Mittel bilden. Dabei wird die *erwartete Vorgangsdauer* mit einem vierfachen Faktor beaufschlagt.

3.3 Die Bauzeit als Vertragsbestandteil

3.3.1 Bauzeitenplan

Die Bauzeit ist aus der Sicht des Auftraggebers sowie des Auftragnehmers von besonderer Bedeutung. Für Auftragnehmer stellt sie eine Kalkulationsgröße dar. Über die geplante Ausführungsdauer sollen die eingeplanten Erlöse erwirtschaftet werden, damit möglichst ein Gewinn vom Umsatz übrig bleibt. Wenn der Auftraggeber als Generalunternehmer tätig ist, hat er einen vergleichbaren Blick auf die Bauzeit. Sollte er aber als Bauträger aufgestellt sein, wird er ebenfalls eine fristgerechte Fertigstellung des Bauwerks anstreben, damit er keine Konventionalstrafe zahlen muss. Ist er ein Bauherr, kann ein Interesse darin bestehen, dass er das Bauwerk zeitgerecht in Gebrauch nimmt, damit er mit ihm planmäßig wirtschaften kann.

Die Nichteinhaltung eines vereinbarten Fertigstellungstermins kann, je nach Situation, Vermögensverluste bei beiden Vertragsparteien verursachen.[620] Aus rechtlicher Sicht lässt sich hieraus ggf. ein finanzieller Nachteil herleiten, der entweder von einer Vertragspartei getragen werden muss oder möglicherweise sogar beide betrifft. Falls keine einvernehmliche Lösung zustande kommt, ist die Höhe des finanziellen Nachteils anhand vertragsrechtlicher Regeln gem. *Kapitel 4.4* nachzuweisen.

Damit beide Vertragsparteien die im Bau-Soll definierte Bauzeit richtig überblicken und bewerten können, wird diese in eine zeitbezogene Darstellung des Bauvorhabens überführt. Dies geschieht in Form eines ***Bauzeitenplans***, in dem bestenfalls alle vertragsrelevanten

[619] Vgl. Hofstadler, 2014: S. 2.
[620] Vgl. Reister, 2014: S. 40.

Bedingungen eindeutig zu hinterlegen sind.[621] Der Begriff „Bauzeitenplan" wird in § 9 VOB/A sowie in § 5 VOB/B verwendet. Dieser ist „[…] *ein Terminplan, den die Parteien ausdrücklich oder stillschweigend als* [sog.] *Vertragsterminplan (anfänglich oder nachträglich) dem Bauvertrag zugrunde gelegt haben und der für die vom Auftragnehmer zu erbringenden Leistungen, ggf. aber auch für die auftraggeberseitigen Mitwirkungshandlungen, verbindliche Fristen (Vertragsfristen) enthält, darüber hinaus aber auch unverbindliche Kontrollfristen für Teile der Leistung enthalten kann*."[622] Ein Bauzeitenplan hat vertragsrechtliche Relevanz und ist ein verbindlicher Vertragsbestandteil. Er ist nicht mit einem für die interne *Ablaufplanung* oder *-steuerung* erstellten Terminplan zu verwechseln.[623] Prinzipiell kann die Bildung des Bauzeitenplans durch den Auftraggeber, den Auftragnehmer oder durch beide Parteien erfolgen.[624]

Der vereinbarte Bauzeitenplan wird während der Bauausführung zur Terminkontrolle herangezogen und bildet u. a. eine „[…] *graphische Grundlage zur Darstellung und Geltendmachung von Ansprüchen aus Bauzeitverzögerung und Leistungsänderung*."[625] Laut *Lang und Rasch* sollte er dafür im Idealfall sein:

- ***glaubhaft*** – er sollte belegen können, ob der geplante Bauablauf realistisch erstellt wurde und entsprechend technisch sowie logistisch abgewickelt werden kann;
- ***aussagekräftig*** – die Struktur des geplanten Bauablaufs sollte aussagekräftig gegliedert und als *Terminplan* ausgestaltet sein, damit eine produktionstechnische Fertigungsreihenfolge ersichtlich wird („[…] *Arbeitsabschnitte als logische Einheit* […]"[626]);
- ***vollständig*** – der Informationsgehalt des geplanten Bauablaufs sollte aufzeigen können, wie sämtliche erforderlichen Ausführungs- und Planungsprozesse bzw. -termine in einer realitätsnahen Ablauflogik aufeinander aufbauen;
- ***rechenbar*** – die Zusammenhänge sollten reproduzierbar und mathematisch prüfbar festgehalten werden (*Lang und Rasch* gehen auf die Ergänzung fehlender Anordnungsbeziehungen ein[627]);
- ***verbindlich*** – der Bauzeitenplan ist ein Vertragsbestandteil.[628]

Zusätzlich ist es sinnvoll, wenn die gewählten Planungsentscheidungen, die zum gewählten Bauablauf führten, in den Bauzeitenplan eingearbeitet werden.[629] Beispielsweise lassen sich neben den Vorgängen auch die verknüpfenden Anordnungsbeziehungen mit erklärenden

---

[621] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 21 i. V. m. Reister, 2014: S. 3, 43.
[622] *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 17. *Schneider* bezieht sich auf § 9 Abs. 2 Nr. 2 VOB/A und § 5 Abs. 1 VOB/B (die Hintergründe werden in *Kapitel 3.3.1*, *Kapitel 4.1.3* und *Kapitel 4.2.2* aufgegriffen).
[623] Vgl. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 17; *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 33; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 246.
[624] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 33.
[625] Reister, 2014: S. 43.
[626] *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 21.
[627] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 22.
[628] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 18-22.
[629] Vgl. Samkari/Gnerlich/Franz, 2013: S. 1-8. Das hat den Vorteil, dass die kausalen Verknüpfungen inhaltlich beschrieben sind und damit nachvollziehbar werden. Denn ohne solche Informationen entsteht eine *Informationslücke*. Es ist *nicht* sinnvoll Abhängigkeitsbeziehungen *ausschließlich* über die Vorgänge zu beschreiben.

Informationen anreichern.[630] Darum sollten die Abhängigkeitsbeziehungen in einem Bauzeitenplan ***erklärend*** gestaltet werden.

In erster Linie wird ein Bauzeitenplan durch Vereinbarung zwischen den Vertragsparteien zum Vertragsbestandteil. Allerdings kann ein Bauzeitenplan nicht nur ausdrücklich, sondern auch konkludent vereinbart werden.[631] Dazu muss der Auftraggeber durch sein Verhalten (Zustimmung oder Schweigen) zum Ausdruck bringen, dass er mit dem vom Auftragnehmer teilweise oder vollständig erstellten Terminplan einverstanden ist.[632] Zum Beispiel beschreiben *Roquette et al*. das Problem, dass nach Vertragsschluss oftmals noch kein ausreichend detaillierter Bauzeitenplan vorliegt.[633] Sobald jedoch ein Auftragnehmer dem Auftraggeber nachträglich (d. h. nach Vertragsschluss) einen ausgearbeiteten Terminplan zusendet und dieser damit einverstanden ist, gilt dieser, im Sinne einer übereinstimmenden Willenserklärung zwischen beiden Parteien, als verbindlicher Vertragsterminplan.[634] Aus diesem Grund sollte regelmäßig hinterfragt werden, ob ein nachträglich eingereichter Terminplan als Bauzeitenplan zu bewerten ist.[635]

3.3.2 Termine und Fristen mit dem Schwerpunkt der VOB

Termine und ***Fristen*** erlauben das Festhalten und Strukturieren der Bauzeit in einem Bauzeitenplan als zeitmäßiges Ordnungsmuster. Somit können baurechtliche Pflichten zeitlich festgehalten, bestimmt und veranschaulicht werden. Zudem lässt sich der Bauzeitenplan für eine baubetriebliche Disposition heranziehen, um produktionsorientierte Aufgaben bis zur Fertigstellung des Bauprojekts vorausschauend zu planen – siehe *Kapitel 3.2*.

In der Fachliteratur sowie in der VOB/B werden die Begriffe *Termin* und *Frist* teilweise synonym verwendet.[636] Im Folgenden wird auf die Unterschiede beider Begriffe eingegangen.

Ein *Termin* ist eine bestimmte Zeitangabe, die auf einen einzelnen Zeitpunkt (i. d. R. ein Datum) abzielt. Zu einem Termin könnte etwas rechtlich Relevantes geschehen, bspw. eine Mitwirkungshandlung. Das muss aber nicht zwangsläufig der Fall sein. Im Gegensatz dazu stellt eine *Frist* eine zeitbezogene Bedingung dar, die immer an die Dauer einer vertragsrelevanten Aufgabe gekoppelt ist, bei der ein Handeln (z. B. die Ausführungsfrist einer Bauleistung) oder Abwarten (z. B. eine Ausschalfrist) stattfinden soll.[637] Im Gegensatz zu *nicht vertraglich vereinbarten* Terminen werden mit der Festlegung von Fristen durchaus Verbindlichkeiten vereinbart, deren Nichteinhaltung ggf. Ansprüche der jeweils anderen Partei auslösen – siehe *Kapitel 4.1.1*.[638]

---

[630] Vgl. Samkari, 2014: S. 150-154.
[631] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 33-34.
[632] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 34.
[633] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 249.
[634] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 250.
[635] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 250.
[636] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 10.
[637] Vgl. *Fervers in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 186, Rdn. 28-29.
[638] Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 8, Rdn. 45-46.

Eine *Frist* kann demgegenüber *an einen bestimmten* oder *an einen bestimmbaren Termin* anknüpfen.[639] Beispielsweise ist die Aussage – *Gemeinsame Zustandsfeststellung am 19.04.2017* – ein kalendermäßig bestimmter Termin, während die Aussage – *Spätestens bis zum 19.04.2017 müssen die Ausführungsarbeiten beginnen* – auf eine kalendermäßig bestimmte Frist hindeutet. Ein bestimmbarer Termin wäre die Aussage – *Die Fertigstellung der Ausführungsarbeiten erfolgte am 19.04.2017*. Hingegen deutet die Aussage – *Fünf Werktage nach Beginn müssen die Ausführungsarbeiten erledigt sein* – auf eine bestimmbare Frist hin.

Grundsätzlich ist eine Frist durch einen Anfangstermin, einen Endtermin oder durch einen Anfangs- und Endtermin zu definieren. Ergänzend lassen sich Zwischentermine befristen. Die Auslegungsregeln für Fristen sind in §§ 186 ff. BGB enthalten. Grundsätzlich kann gem. § 187 BGB der Beginn einer Frist entweder eine ***Ereignisfrist*** oder eine ***Beginnfrist*** (auch: *Terminfrist*) sein:

- Die *Ereignisfrist* setzt den Eintritt eines fristauslösenden Ereignisses im Verlaufe eines Tages voraus. Für diesen Fall sieht das BGB bei der Fristbestimmung eine „Verweildauer" vor, die dafür sorgt, dass die Fristdauer erst am Folgetag um 0:00 Uhr beginnt.
- Demgegenüber erfordert eine *Beginnfrist* die Vorgabe eines bestimmten Termins, der mit in die Fristdauer einzurechnen ist.

Anhand dieser Fallunterscheidungen ist mit § 188 Abs. 2 BGB das ***Fristende*** zu bestimmen. Es tritt generell nach Ablauf der Fristdauer um 24:00 Uhr[640] ein. *Abbildung 3-6* illustriert die Auslegungsregeln für nach Tagen bestimmte Fristen, die analog für wöchentliche oder monatliche Fristen, unter Berücksichtigung des täglichen Fristbeginns, auszulegen sind.

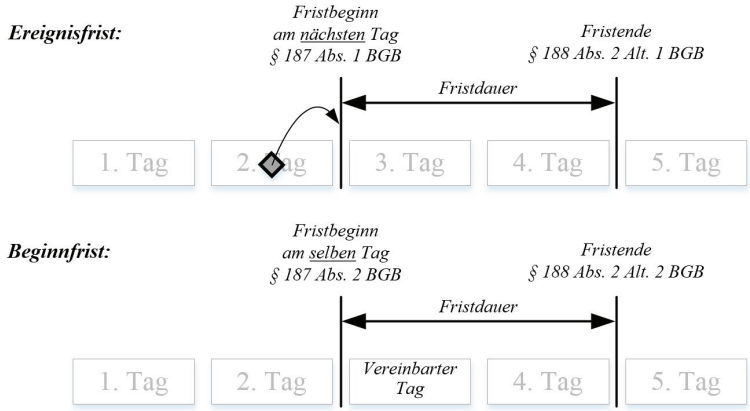


Abbildung 3-6: Illustration der Auslegungsregeln für Fristen gem. §§ 187, 188 BGB[641]

[639] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 10; *Fervers in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 186, Rdn. 38.
[640] Bei der Bestimmung von *Fristen* werden die zugehörigen Tage durch die sog. „juristische Sekunde" voneinander *abgegrenzt*. Aus diesem Grund erfolgt eine Differenzierung zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr.
[641] Eigene Darstellung.

§ 191 BGB sieht für einen Monat *30 Tage* und für ein Jahr *365 Tage* vor, solange diese einzeln betrachtet werden und nicht zusammenhängend verlaufen. Sollte jedoch der maßgebende Tag für das Fristende einer nach Monaten bestimmten Frist fehlen, endet diese mit dem Ablauf des letzten Tages vom letzten Monat gem. § 188 Abs. 3 BGB. Fristverlängerungen sind laut § 190 BGB nach dem Ablauf der ursprünglichen Frist zu berechnen. Grundsätzlich kann eine Frist gem. § 193 BGB aber nicht an einem Samstag, Sonn- oder Feiertag enden, so dass *der nächste Werktag*, in Abhängigkeit von dem jeweiligen Bundesland, maßgeblich wird.

Im Gegensatz zur *Leistungszeit gem. § 271 BGB*[642] benennt die VOB verschiedene Arten von Fristen und umfasst BGB-konforme Regelungen. Das Rechtsverständnis zur Unterscheidung der Fristarten lässt sich hingegen aus § 9 Abs. 2 VOB/A und aus § 5 Abs. 1 Satz 1 VOB/B entnehmen.[643] Als Oberbegriff verwendet die VOB die Bezeichnung ***Ausführungsfrist***. Demnach sind ***Einzelfristen*** Ausführungsfristen, die entsprechende Teilleistungen oder Leistungsabschnitte gliedern. Einzelfristen werden als *Kontrollfristen* oder ***Zwischenfristen*** bezeichnet, solange sie *unverbindliche Fristen* darstellen.[644] Sie sollen das zeitgerechte Ineinandergreifen der Leistungen von verschiedenen Auftragnehmern unterstützen und dem Auftraggeber bei seinen Koordinationspflichten behilflich sein.[645]

Vertragsfristen hingegen sind jene Ausführungsfristen, die eine Gesamtleistung zeitlich begrenzen oder separat als Vertragsbestandteil vereinbart wurden.[646] Zum Beispiel können die Vertragsparteien verbindliche Fristen zur Fertigstellung bestimmter Bauleistungen oder die Lieferung von Bauplänen vereinbaren. Sobald diese ausdrücklich ein Bestandteil des Vertrags sind, handelt es sich um Vertragsfristen. Die schuldhafte Nichteinhaltung dieser Vertragsfristen führt zur Pflichtverletzung und kann, sobald die Zusammenhänge adäquat kausal nachgewiesen werden, Schadensersatzansprüche auslösen.[647] Sobald keine vereinbarte Frist zwischen den Vertragspartnern besteht, ist es durchaus erforderlich, dass der Termin für eine rechtzeitige Erbringung der Bauleistung, gemäß einer Auslegung der Vertragsinhalte, zu ermitteln ist.[648] Termine, die eine Frist definieren, werden in dieser Arbeit als ***Vertragstermine*** bezeichnet.

Kniffka weist darauf hin, dass vertraglich vereinbarte Zeiten ihre Verbindlichkeit verlieren können, sobald der gesamte Bauablauf gestört ist.[649] Hierzu schreibt *Sacher*: „*Vertragsfristen können nicht nur bei Abschluss des Bauvertrags vereinbart werden, sondern auch noch danach, insbesondere also während der Bauausführung. Heißt es im Bauvertrag beispielsweise „Die Ausführungsfristen werden später vereinbart", dann können diese später vereinbarten Fristen ebenso wie die ursprünglich vereinbarten Fristen*

---

[642] Siehe *Kapitel 4.1.3*.
[643] Vgl. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 16.
[644] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: S. 80, Rdn. 247. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 16.
[645] Vgl. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 16.; *Althaus in* Beck´scher VOB/B-Kommentar 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 14.
[646] Vgl. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 16.; *Preussner in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: § 5, Rdn. 7, 15.
[647] Siehe *Kapitel 4.4.2*.
[648] *Vygen und Joussen* nennen Hintergründe. Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 22 ff., 43 ff., 96-103. Siehe auch *Kapitel 4.1.3*, *Kapitel 4.1.4* und *Kapitel 4.2.2*.
[649] Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 8, Rdn. 46.

verbindlich als Vertragsfristen vereinbart werden."[650] Die damit einhergehenden Herausforderungen werden in *Kapitel 4.3 ff.* thematisiert.

3.3.3 Detaillierungsgrade von Bauzeitenplänen

Hinsichtlich der Terminplanung muss zwischen auftraggeber- und auftragnehmerseitigen Interessen unterschieden werden. Möglicherweise beauftragt ein Auftraggeber mehrere Bauunternehmen, die zusammen das Bauwerk erstellen sollen. Unter dieser Voraussetzung ist der Auftraggeber danach bestrebt, die jeweiligen Ausführungsarbeiten der verschiedenen Bauunternehmen in einem zeitlichen und ***projektbezogenen*** Rahmen zu planen, damit die unterschiedlichen Arbeitsschritte aufeinander abgestimmt sind.[651] Dieser Terminplan wird oftmals zur Unterstützung des Auftraggebers für die Steuerung seiner beauftragten Bauunternehmer verwendet.[652] Des Weiteren sollten u. a. neben Vor- und Nachleistungen anderer Bauunternehmer ebenso Planvorlauffristen in Terminplänen berücksichtigt werden.[653] So sind für den Auftraggeber i. d. R. Meilensteine relevant, solange er keine produktionsabhängigen Informationen von seinem Auftragnehmer für obliegende Mitwirkungs-handlungen benötigt oder andere Interessen seiner Koordinationspflichten verfolgt.

Jeder Auftragnehmer hat innerhalb solcher Leistungszeiten sein Werk zu erbringen. Dafür kann er im Zuge seiner Dispositionsfreiheit i. S. v. § 4 Abs. 2 VOB/B die Ausführung der Arbeitsaufgaben ***produktionsbezogen***, mithilfe seiner betriebsinternen Produktionsfaktoren, planen.[654] Nach *allgemeinem Rechtsverständnis* wird davon ausgegangen, dass der Auftragnehmer einen solchen Terminplan theoretisch erstellt, um seine Bauleistung in den vom Auftraggeber vorgegebenen Fristen zum angebotenen Preis realisierbar einzuhalten (*Auskömmlichkeit* der Preisbildung).[655] „*In dem produktionsbezogenen Terminplan müssen daher alle relevanten Produktionsschritte so genau bedacht werden, dass die vorgenannten baubetrieblichen Planungen verlässlich sind*."[656] Im Gegensatz zum projektbezogenen Terminplan steht hier die Art und Weise der Umsetzung der Ziele im Vordergrund.

Da der Auftragnehmer seine Bauleistung als Vorarbeiten für Folgegewerke fristgerecht herzustellen hat, darf er seinen Bauablauf nicht von vornherein so planen, dass er die vertraglich vereinbarten Fristen überschreitet.[657] Folglich können die auftraggeber- und auftragnehmerseitigen Terminpläne inhaltlich voneinander abweichen, wobei sie dennoch aufeinander abgestimmt sein sollten.

Die Detaillierungstiefe von Bauablauf- und Terminplänen nimmt in voranschreitenden Projektphasen zu. Nach gängiger Praxis werden hierzu Bauablauf- sowie Terminpläne in unterschiedlichen Detaillierungsgraden in *Terminplanebenen* (vergleichbar mit *System-*

---

[650] *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 15.
[651] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 5, 23; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 63-64; Schiffers, 1998: S. 275-276. Digitale Ansätze: VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 35.
[652] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 5, 23.
[653] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 28; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, S. 506-508, Rdn. 25-28.
[654] *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 5, 24 i. V. m. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 63-64, 197; Schiffers, 1998: S. 275-276.
[655] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 24; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 82-83; Drittler, 2017: Rdn. 4:220. Digitale Ansätze: VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 35.
[656] *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 24.
[657] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 25.

ebenen gem. *Kapitel 2.1.1*) ausgearbeitet und während der Projektentwicklung verfeinert. Die Fachliteratur verwendet für diese Terminplanebenen uneinheitliche Begriffe.[658]

Am Anfang eines Projekts plant neben dem Bauherrn ein Projektsteuerer oder ein Objektplaner die Projektstruktur (§ 34 HOAI, LPH 1). Im Übergang zur Vorplanung (§ 34 HOAI, LPH 2) lässt sich daraus ein ***Rahmenterminplan*** entwickeln, der die wichtigsten Projekttermine und Vorüberlegungen als Meilensteine enthält.[659] Dadurch sollen die Planungs- und Bauausführungsleistungen sowie die jeweiligen Gesamtzusammenhänge strukturiert werden.[660] Der Rahmenterminplan kann zwischen *20* und *30 Arbeitsaufgaben* abgrenzen, wodurch ein Konzept für eine *projektbezogene* Bauzeitplanung vorliegt.[661]

Auf Basis des Rahmenterminplans wird der ***Generalterminplan*** entwickelt. Dieser verfeinert die im Rahmenterminplan enthaltenen Überlegungen, indem *projektbezogene* Abläufe in Form von Vorgängen und Meilensteinen für Gewerkegruppen und Planungsaufgaben beschrieben werden.[662] Dies ist möglich, da die ersten Vorentwürfe im Verlauf der LPH 3, § 34 HOAI bereits existieren.[663] Der Generalterminplan dient oftmals als Orientierungshilfe für die Ausschreibung und Vergabe, damit er entsprechend der Vergabestrategie ausgerichtet sowie weiterentwickelt werden kann.[664] *Roquette et al*. merken an, dass daher alle notwendigen Vertragstermine, z. B. für Vorlaufzeiten, Fertigungs- und Lieferfristen, sowie alle Zeitangaben zur Werk- und Montageplanung im Generalterminplan festgehalten werden sollten.[665]

In der weiteren Projektdurchführung orientiert sich die Projektleitung regelmäßig an Generalterminplänen, die ebenso zur Projektsteuerung verwendet und sukzessiv aktualisiert werden.[666] Die Verfeinerung des Generalterminplans führt zum ***Grobterminplan*** für die Ausführungsplanung gem. § 34 HOAI, LPH 5. Aus dem Generalterminplan werden oft mehrere Grobterminpläne abgeleitet, so dass die Planungsleistungen und die jeweiligen Ausführungsleistungen voneinander getrennt in den unterschiedlichen Vergabeunterlagen beigelegt werden.[667] Der Grobterminplan ist eine Übergangsform von einem *projektbezogenen* zu einen *produktionsbezogenen Terminplan*.[668] Daher wird er teilweise auftraggeber- oder auftragnehmerseitig ausgearbeitet.[669] Für die Ausführungsarbeiten können solche Terminpläne ihrerseits zwischen *100* und *150 Vorgänge* aufweisen.[670] Inhaltlich enthalten sie alle erforderlichen Vorgangsdauern mit ihren Ressourcen und

[658] Vgl. Möhring, 2012: S. 37.
[659] Vgl. *Bielefeld/Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 496-497; Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434.
[660] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 18 i. V. m. *Bielefeld/Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 497.
[661] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 18.
[662] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 76-77; Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434-435.
[663] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434.
[664] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 76.
[665] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 77.
[666] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434.
[667] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434-437; Reister, 2014: S. 55.
[668] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 78-80, 86. *Roquette et al*. verwenden den Begriff „Steuerungsterminplan" für einen *Grobterminplan*. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 79-80. Sie weichen daher von *Reister's* Definition ab, der in einem Steuerungsterminplan einen Detailterminplan sieht. Vgl. Reister, 2014: S. 56.
[669] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 86.
[670] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 434.

Verantwortungsbereichen.[671] Somit umfassen Grobterminpläne bereits fixierte Ausführungsfristen.[672]

Ein Grobterminplan bildet hauptsächlich einzelne Fertigungsabschnitte der Gewerke ab; nicht jedoch die detaillierteren Produktionsprozesse.[673] Im Regelfall erfolgt erst nach Auftragserteilung die Erstellung eines Detailterminplans in der Arbeitsvorbereitung, der oftmals zur auftragnehmerseitigen Bauüberwachung (§ 34 HOAI, LPH 8) herangezogen und fortgeschrieben wird.[674] Ein Detailterminplan stellt die Vorgänge „vollständig" dar, um die eingesetzten Produktionsfaktoren möglichst präzise zu erkennen.[675] In ihm lassen sich technologische Anordnungsbeziehungen und ggf. *produktionsbezogene* Leistungsstände festhalten,[676] damit Entscheidungsalternativen im Zuge der Ausführung sichtbar werden.[677]

Üblicherweise lässt sich nicht genau sagen, in welcher Terminplanebene ein Bauzeitenplan vereinbart wird. Jeder Bauzeitenplan ist ein individueller sowie projektspezifischer Vertragsbestandteil und kann dementsprechend in unterschiedlicher Form vorliegen. Vielmehr kommt es auf den Parteiwillen an, der darüber entscheidet, was Inhalt des Vertrags wird.[678] Oftmals sind aber Bauzeitenpläne wie Grobterminpläne oder wie Rahmenterminpläne ausgearbeitet.[679] Der verfügbare Detaillierungsgrad zur Geltendmachung zeitabhängiger Ansprüche wegen Bauzeitverlängerungen gem. *Kapitel 4.3* kann aufgrund des Bauzeitenplans unterschiedliche Ausgangsinformationen liefern.

Die folgende *Abbildung 3-7* stellt die oben genannten Zusammenhänge grafisch dar. In der Mitte der Abbildung ist ein grauer Kasten eingezeichnet, der die Darstellungsform potentieller Bauzeitenpläne einschließt. Diese Bauzeitenpläne werden als Arbeitsgrundlage der Bau-Soll-Umstände in den weiteren Simulationsstudien angesehen.

[671] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 79.
[672] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 437; Reister, 2014: S. 56.
[673] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 79.
[674] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 437.
[675] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 18 i. V. m. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 83.
[676] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 437, 439.
[677] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 441-442.
[678] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 31.
[679] Vgl. Reister, 2014: S. 57; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 51.

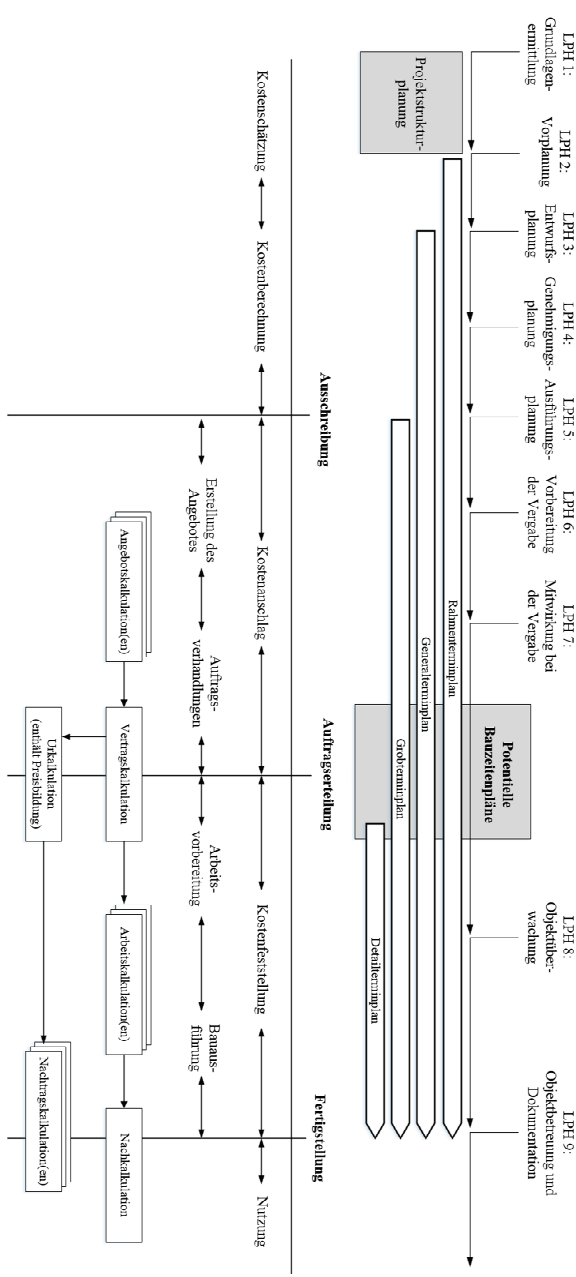


Abbildung 3-7: Potentielle Bauzeitenpläne (nach Anlage 10 HOAI)[680]

[680] Eigene Darstellung.

3.4 Bau-Ist

3.4.1 Aspekte der Dokumentation

Das ***Bau-Ist*** umschreibt alles, was vom geplanten und vertraglich vereinbarten Bau-Soll nach der Leistungserbringung tatsächlich umgesetzt wird. Analog zum Bau-Soll setzt sich das Bau-Ist aus *Bauinhalten* und *Bauumständen* zusammen. Das heißt, alle tatsächlich durchgeführten Inhalte und Umstände, wie:

- eingehaltene und nicht eingehaltene Fristen,
- ausgeführte Bautätigkeiten,
- veränderte Ablaufreihenfolgen,
- verwendete Bauverfahren,
- geleistete Arbeitszeiten,
- eingereichte Pläne,
- geführte Absprachen,
- äußere sowie innere Einwirkungen u. v. m.,

die Zeit- und Kostenanteile der Bauleistung bedingt haben, sind jeweils ein Teil vom Bau-Ist. Daher ist eine vom Auftraggeber unterlassene Mitwirkung ebenso ein Teil vom Bau-Ist, wie eine mangelhafte Bauausführung des Auftragnehmers, die nachträglich korrigiert werden muss.

Theoretisch setzt sich das gesamte Bau-Ist idealerweise aus der Summe von mehreren realistisch geplanten (auskömmlichen) Bau-Soll-Anteilen und verschiedenen, ermittelbaren Störungsanteilen zusammen. Im Gegensatz zum vertraglichen Bau-Soll resultiert der komplette Bauablauf vom Bau-Ist aus einer stichpunktartigen Dokumentation des Leistungsfortschritts. Neben der monetären Dokumentation kommt es ebenso auf die Erfassung der zeitlichen Rahmenbedingungen an.

Kapellmann et al. äußern, „[…] *dass bei der Dokumentation nicht nur Phänomene, sondern möglichst auch Ursachen und Kostenauswirkungen wirklichkeitsnaher erfasst und belegt werden. Die Dokumentation ist also besonders wichtig für die substantiierte Darlegung und Beweisbarkeit einzelner Behauptungen*."[681] Die Dokumentation schafft nachprüfbare Belege, die der Glaubwürdigkeit und ggf. der Beweisbarkeit im Streitfall dienlich sind.[682] Sie kann ebenso Informationen zur Durchführung aussagekräftiger Plausibilitätsprüfungen liefern.[683]

Eine Dokumentation könnte Antworten auf folgende Fragestellungen nach *Tabelle 3-1* über den Ist-Bauablauf geben.

[681] Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 6.
[682] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 6.
[683] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 6.

Tabelle 3-1: Fragestellungen für die Dokumentation des Ist-Bauablaufs[684]

Zu dokumentierende Fragen	Weiterführende Fragestellungen
Wann konnten die Arbeiten beginnen?	Wurden die Vorleistungen der Vorgewerke beendet? Waren die nötigen Pläne rechtzeitig verfügbar? Welche Wetterverhältnisse lagen vor?
Ist die Qualität der Vorarbeiten für die bevorstehenden Folgegewerke angemessen hergestellt worden?	Gab es in den Vorleistungen Baumängel? Waren die Pläne aktuell und fehlerfrei?
Wo konnten die Ausführungsarbeiten beginnen?	Welche Fertigungsrichtung wurde gewählt? Gab es Abweichungen zur ursprünglich geplanten Vorgehensweise?
Lassen die Bauinhalte und Bauumstände das ursprünglich geplante Bauverfahren zu?	Welche Bauverfahren waren ursprünglich geplant? Reichen die eingesetzten Ressourcen aus?
Sind die ursprünglich vereinbarten Pläne noch aktuell?	Gab es bereits vor dem Beginn der Bauleistungen Entwurfsänderungen oder sind fertigungstechnisch neue Anforderungen hinzugekommen? Welche Pläne sind aktuell?
Welche am Bauprojekt Beteiligten arbeiten zeitgleich auf der Baustelle?	Sind diese Arbeiten in einer projektbezogenen Betrachtung bereits verspätet? Welche Arbeiten stehen noch aus? Sind Beeinträchtigungen möglich? Gab es Streitigkeiten?
Welche Absprachen fanden mit den Vertragspartnern statt?	Gab es Änderungen zur ursprünglichen Herangehensweise? Gab es auftraggeberseitige Anordnungen? Haben deren Auswirkungen die Bauleistungen beeinflusst? Welche Inhalte wurden wann besprochen? Welche Leistungen sind davon betroffen? Liegen Bedenkenanzeigen oder Gutachten vor?
Konnten die täglichen Ziele erreicht werden oder gab es während der Ausführungsarbeiten Abweichungen vom geplanten Bauablauf?	Wer war ursächlich für diese Abweichungen? Was hat wann stattgefunden? Welche Gegenmaßnahmen wurden ergriffen? Mussten Bauverfahren und Ressourcen ggf. anderweitig eingesetzt werden? Wie wurde weitergearbeitet? In welcher Form wurde der Vertragspartner darüber informiert (Mahnung, Anordnung, Behinderungsanzeige, Bedenkenanzeige, Mehrkostenanzeige)? Mit welchen zeitlichen sowie monetären Auswirkungen war zu diesem Zeitpunkt für die weiteren Ausführungsarbeiten zu rechnen? Wurden ursächliche Ereignisse der Abweichungen (rechtzeitig) erkannt – falls nein, wann und worin hatten diese ihren Ursprung? Besteht die Möglichkeit Pufferzeiten zu nutzen? Bestehen werkvertragliche Ansprüche?
Liegt ein bereits bekannter hindernder Umstand vor?	Wurde der Vertragspartner über diesen hindernden Umstand benachrichtigt? Wie wurde auf diesen Umstand reagiert? Ist der hindernde Umstand bereits beendet? Wurde der Vertragspartner über den Beginn oder das Ende des hindernden Umstands benachrichtigt? Wie wurde er benachrichtigt? Vermischen sich hindernde Umstände – falls ja, welche Umstände liegen zeitgleich vor und welches Handeln oder Ereignis war dafür ursächlich?

[684] Eigene Darstellung.

Wurden Abweichungen vom geplanten Bauablauf selbst verursacht?	Waren genug Ressourcen auf der Baustelle? Wer hat wann gearbeitet? Welches Material oder welche Bauteile waren vorhanden oder sollten geliefert werden? Liegen zeitgleich anderweitige Umstände vor, die zu einer Abweichung führten?
Welcher tägliche Leistungsstand wurde erreicht?	Können die geplanten Ziele zeitgerecht in der erforderlichen Qualität erreicht werden? Welche Arbeiten stehen noch aus? Gibt es Schwierigkeiten in der Umsetzung? Welcher Arbeitsaufwand ist zur Zielerreichung noch erforderlich?
Wann konnten die Arbeiten abgeschlossen werden?	Konnten die Fristen termingerecht eingehalten werden? Kam es zu einer Abnahme?
Wie und wann wurde dokumentiert?	Bautagesberichte, Schriftverkehr, Zeichnungen, Skizzen, Terminpläne, Anzeigen, Arbeitskalkulationen, Aufmaße, Gutachten, Bautagebuch, Besprechungsprotokolle, Bautenstandsaufnahmen, Fotos etc. In welcher Form wurde der Vertragspartner benachrichtigt? Wie reagierte er darauf?
Änderte sich der Vertragsinhalt? (Bestimmung neues Bau-Soll)	Fand eine Fortschreibung des Soll-Terminplans statt? Liegen neue Vertragsunterlagen vor? Wie und inwieweit bildet die Arbeitskalkulation die geplanten Bauabläufe ab?

Aus den in *Tabelle 3-1* verfassten Fragestellungen lassen sich u. a. ***dokumentierte Daten*** ableiten, die den tatsächlichen Bauablauf zeitdiskret – bzw. stichprobenartig – wiedergeben. In Bezug auf *Kapitel 2.1.4* beschreibt das Bau-Soll eine *gewollte Ordnung*, während das Bau-Ist eine *gegenwärtige Ordnung* darstellt, die infolge einer Störung in eine *Unordnung* übergeht.[685]

Der Einsatz von BIM kann viele Möglichkeiten zur Dokumentation bieten, die es erlauben, mehrere Daten zu verschiedenen Terminen und Gebäudeteilen zeitschnell zu erfassen und einander zuzuordnen. Es ist damit zu rechnen, dass sich künftig durch den Einsatz von BIM die Quantität sowie die Qualität der erfassbaren Daten für das Baustellenberichtswesen verändern wird.[686] Die Bedeutung sowie die Möglichkeiten zur Durchführung der Dokumentation werden u. a. von *Roquette et al*. oder *Lang und Rasch* anschaulich beschrieben.[687] Zudem hat *Tiesler* einen Leitfaden für die Dokumentation entwickelt, in dem die aktuellen Anforderungen der jüngeren Rechtsprechung berücksichtigt werden.[688] Da bereits eine große Anzahl von BIM-Lösungen zur Dokumentation von Bauabläufen existiert und umfangreiche Überlegungen in der baubetrieblichen sowie baurechtlichen Literatur verfasst worden sind, werden die verschiedenen Dokumentationskonzepte nicht weiter vertieft.

Die Baupraxis zeigt, dass die Dokumentation oftmals „lückenhaft" geführt wird. Bei einem baubetrieblichen Gutachten über gestörte Bauabläufe müssen die verfügbaren Informationen der Dokumentation in einen verständlichen Zusammenhang gebracht werden. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Forschungsarbeit *nicht* geklärt werden, welche Informationen aus der Dokumentation für die Simulation bereitstehen müssen. Vielmehr ist der

[685] Siehe *Kapitel 2.1.4*.
[686] Vgl. Gnerlich/Tiesler/Möhring/Franz, 2018: S. 50-53. Siehe *Kapitel 1.1*.
[687] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 122-160; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 193 ff.
[688] Vgl. Tiesler, 2018: Dissertation.

Simulationszweck in der „Entschlüsselung“ der bereitgestellten Informationen zu finden. Alle vorhandenen „Lücken“ sind, soweit möglich, mit baubetrieblichem Fachwissen plausibel zu schließen.

Insgesamt gilt der Grundsatz, je mehr (realitätsnahe) Informationen vom Bau-Ist dokumentiert werden, desto wahrscheinlicher lassen sich im Nachhinein die Auswirkungen einer Bauablaufstörung verstehen. Im folgenden Unterkapitel werden Bauablaufstörungen auf Grundlage der vorgestellten systemtheoretischen und baubetrieblichen Ansätze definiert.

3.4.2 Definition Bauablaufstörung

Eine ***Bauablaufstörung*** ist ein *baubetrieblicher Begriff*, der analog der Störung gem. der Systemtheorie zu verstehen ist (siehe *Kapitel 2.1.8*).[689] Übertragen auf einen Bauablauf liegt dann eine Bauablaufstörung vor, sobald die tatsächliche Bauausführung von der geplanten Bauausführung abweicht. Jede Bauablaufstörung setzt eine Ursache – als Wirkung(!) – voraus, die im Risikobereich des Auftraggebers, des Auftragnehmers oder anteilig bei beiden liegen kann. Die Feststellung einer Bauablaufstörung sagt zunächst nichts über den Verursacher aus.[690]

Aus systemtheoretischer Sichtweise ergibt sich eine Störung aus ihren *kontinuierlich andauernden Folgewirkungen* im Inneren des *Systems* (= Bauablauf), die infinitesimal-kleine Störungen nach *Abbildung 2-10* sind. Daraus baut sich ein Störungspotential im gesamten Systemzustand auf. Dieser, durch eine Störung bedingte Systemzustand ist ***irreversibel*** und wird durch ein *Wirkungspotential* bzw. *Störungspotential* zeitveränderlich fortgeschrieben. Das Störungspotential lässt sich während der Bauausführung durch baubetriebliche *Lenkungen der Arbeitsproduktivitäten* (= ***Beschleunigung***[691]) korrigieren. Diese können ebenfalls ausschließlich kontinuierlich erfolgen und sind ein Teil der vernetzten Wirkungen. In einem ganzheitlichen, baubetrieblichen Ansatz ist die Wirkung einer jeden Störung erst nach vollständigem Abschluss eines (Teil-)Projekts beendet.

Sobald sich die tatsächliche *Produktivität* eines Ausführungsprozesses über einen bestimmten Zeitraum ändert, kann das auf eine Bauablaufstörung hindeuten. Eine solche Abweichung kann aber auch eine prozessbedingte Aufwandsverteilung sein, die sich gegen Ende des Projekts neutralisieren wird. Entsprechend ist die Produktivität von gleichbleibenden, großen und gut zugänglichen Arbeitsgegenständen höher als bei kleinen, verwinkelten oder runden Arbeitsgegenständen.

---

[689] *Abweichungen von gewollten Systemzuständen* werden dort als *Störung* bezeichnet – siehe *Kapitel 2.1.8*.

[690] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1202.

[691] Unter einer *Beschleunigung* werden alle monetär-bedingten Maßnahmen verstanden, bei denen eine vertraglich vereinbarte Leistung (also das *Bauinhalts-Soll*) schneller erbracht wird, als zeitlich geschuldet war. Zum Beispiel ein höherer Kapazitätseinsatz, Erhöhung der täglichen Arbeitszeiten oder Einsatz eines produktiveren Bauverfahrens. Die Optimierung vorgesehener Produktivitätsfaktoren i. S. v. § 6 Abs. 3 VOB/B, wie z. B. Umstellungen des Bauablaufs, zählen nicht dazu.

In der Fachliteratur werden weitere Produktivitätsverluste genannt aus:

- Transport- und Wegezeiten,
- Umbau- und Rüstzeiten,
- dem Einarbeitungseffekt,
- Witterungsgründe,
- nicht optimale Kolonnenzusammensetzung,
- dem Einfluss von (Mindest-)Arbeitsräumen für vertikal- und horizontalflächige Bauteile,
- der Bedeutung des Planvorlaufs und Planungsqualität, usw.[692]

Weitere Produktivitätsänderungen lassen sich infolge von Lichtverhältnissen, Trocknungs- und Aushärteverhalten von Baustoffen, situativen Details der Konstruktions- und Ausführungsvariante hervorrufen. Letzteres kommt häufig bei gewerkabhängigen Schnittstellen vor. Zum Beispiel sind bei der Montage von Versorgungsleitungen Wanddurchbrüche erforderlich. Ebenso beim Verlegen von Wandfliesen um Wasserzuleitungsrohre muss i. d. R. ein erhöhter Arbeitsaufwand erbracht werden. Demgegenüber trägt ein ebener und sauberer Fertigungsort zu einer schnelleren Produktivität bei.

Beim Einsatz von Arbeitskräften ist es möglich, dass u. a. auch:

- die Vollständigkeit der notwendigen Informationen (Qualität der Arbeitsvorbereitung),
- die Tageszeit,
- die Lohnform (Leistungs- oder Zeitlohn),
- der Gesundheitszustand,
- die individuellen Fähigkeiten,
- die Zusammensetzung der Arbeiterkolonne und
- Erfahrungswerte

Produktivitätsänderungen begünstigen.

Eine Störung und ihre Intensität kann durch *Produktivitätsfaktoren* formalisiert werden. Bei einem ***Stillstand*** liegt der Wert einer momentanen *Arbeitsproduktivität* (z. B. mit der Einheit [Menge/Arbeitsstunden]) gleich *0*, während der Wert der momentanen *Kapitalproduktivität* (z. B. mit der Einheit [Menge/Kosten]) größer als *0* ist.[693]

So kann ein erhöhter Ressourceneinsatz, z. B. aus einer angeordneten Beschleunigung, finanzielle Abweichungen nach sich ziehen. Derartige Abweichungen werden ebenfalls als Störungen betrachtet. Bauablaufstörungen stellen sich neben Hemmungen bzw. Verzögerungen auch durch Beschleunigungen des Produktionsablaufs dar; ohne diesen auf Dauer zu unterbinden.[694] Die folgende Tabelle zeigt beispielhafte Störungstypen auf.

[692] Zum Beispiel: Hofstadler, 2014: S. 65 ff.; Reister, 2014: S. 380-381, S. 479 ff.; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 373 ff.
[693] Siehe *Kapitel 2.1.7*.
[694] I. A. a. Reister, 2014: S. 435.

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Störungstypen nach Roquette et al.[695]

Störungstyp	Inhalt	Beispiele
Unterbrechung	einmalige Stillstandskosten	- Sicherung vorhandener Bauleistungen
	laufende Stillstandskosten	- nicht anderweitig einsetzbares Personal - Vorhaltung und Wartung nicht abziehbarer Geräte
	Stillsetzungs-kosten	- anderweitig einsetzbares Personal - An- und Abtransport abziehbarer Geräte
	Wiederanlauf-kosten	- Wiederaufnahme der Arbeiten
Verlängerung	Produktivitäts-minderungs-kosten	- zusätzliche Weg-, Rüst- und Einarbeitungszeiten durch Personalumsetzungen - verlängerte Beanspruchung der Arbeitskräfte - verlängerte Beanspruchung von Leistungsgeräten - geringere Auslastung (Einsätze / Zeiteinheit) der Schalung - Lohn-, Stoff-, Nachunternehmer-Preissteigerung
	Vorhaltekosten	- verlängerte Beanspruchung von Bereitstellungsgeräten
	Bereitstellungs-kosten	- verlängerte Beanspruchung des Baustellenpersonals - Gehaltserhöhungen
	Opportunitäts-kosten	- entgangene Bauleistung bzw. Umsatz - entgangener Deckungsbeitrag für Gemeinkosten
Beschleunigung	einmalige Beschleunigungs-kosten	- Einarbeitung neuer Arbeitskräfte - An- und Abtransport zusätzlicher Geräte
	laufende Beschleunigungs-kosten	- Überstunden, Nacht-, Wochenend-, Feiertagsschicht - Einsatz in zusätzlichen Schichten - Betrieb und Vorhaltung zusätzlicher Geräte - Einsatz zusätzlichen Baustellenpersonals

In der baubetrieblichen Fachliteratur werden häufig ***Primär***-, ***Sekundär***- und ***Tertiärverzögerungen*** genannt. *Reister* beschreibt, dass eine *Primärverzögerung* aus der direkten Einwirkung einer Störung auf einen Bauablauf hervorgeht. Diese kann aus der Sphäre eines Vertragspartners infolge einer Handlung, des Unterlassens einer Handlung oder aufgrund weiterer Umstände verursacht werden.[696] Eine Sekundärverzögerung ist die weiterführende Wirkung aus einer vorausgegangenen Primärverzögerung.[697] Derartige ***verzögerungsbedingte Vorgangsverlängerungen*** werden teilweise als *Folgewirkungen* bezeichnet. *Tertiärverzögerungen* fassen alle weiteren Folgewirkungen zusammen.

3.5 Hintergründe und Aufgaben baubetrieblicher Gutachten

Indem der Auftragnehmer im Verlauf der Bauausführung seinen Produktionsfortschritt mithilfe von ***Soll-Ist-Vergleichen*** überprüft, hat er die Gelegenheit, beim Erkennen einer Bauablaufstörung rechtzeitig zu reagieren und ihr entgegenzuwirken. Mit dieser Maßnahme kann er seine vereinbarten Ausführungsfristen und somit seine eingeplanten Kosten zuverlässiger einhalten.

[695] I. A. a. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 907.
[696] Vgl. Reister, 2014: S. 461.
[697] Vgl. Reister, 2014: S. 461.

Zu diesem Zweck sollten die Terminpläne „[…] *während des gesamten Projekts im Zuge des Leistungsfortschritts, bei Änderungen der Projektpläne, bei Eintreten oder Wegfallen ursprünglich ermittelter Risiken oder bei Erkennen neuer Risiken* ***weiterentwickelt*** *werden. Falls notwendig, sollten die Zeit- und Ressourcenschätzungen überprüft und überarbeitet werden, um einen genehmigten Basisterminplan zu erstellen, der als Grundlage für die Verfolgung des Projektfortschritts dienen kann.*“[698] Bei der Ausführung eines komplexen Bauablaufs sind dazu die in einem Soll-Terminplan festgehaltenen Bauleistungen regelmäßig an die Inhalte des Ist-Terminplans anzugleichen. Nur so lässt sich die oben genannte Gegenüberstellung der beiden Referenzzustände des Soll- sowie des Ist-Bauablaufs angemessen und durchgängig verwirklichen.

Der Auftraggeber hat hinsichtlich seiner Koordinierungspflichten i. d. R. ein Interesse an einer Terminplanfortschreibung, damit er regelmäßig den Stand seines Bauprojekts kennt und entsprechend seinen Mitwirkungspflichten nachgehen kann. Aus diesem Grund kommt es durchaus vor, dass in Bauverträgen Regelungen zur Fortschreibung von Terminplänen vereinbart werden.[699]

Die genannten Absichten zielen neben der Fortschreibung eines Soll-Terminplans ebenso auf die Dokumentation der tatsächlichen Ist-Situationen in Form eines fortzuschreibenden Ist-Terminplans ab.[700] Sofern „[…] *es nur um die Darstellung von Fakten geht, sollte über die Erfassung der Ist-Situationen zwischen den Parteien eigentlich kein Streit entstehen.* […] *Wenn es aber darum geht, sich auf einen fortgeschriebenen Soll-Terminplan zu einigen, wird es in der Praxis schwierig* […]“[701], da die Vertragsparteien sich ggf. auf neue Vertrags- oder Kontrollfristen einigen müssen.[702] Insgesamt *kann* diese Aufgabe konfliktträchtig sein, da die dokumentierten Informationen *Stichproben* und die geplanten Informationen *Prognosen* sind.

Während der tatsächliche Bauablauf voranschreitet, können zusätzlich baubegleitende Leistungsmodifikationen stattfinden. Solche Voraussetzungen begünstigen regelmäßige Abweichungen während der Bauausführung zwischen dem geplanten Bauablauf und dem tatsächlich ausgeführten Bauablauf. In solchen Fällen sind unterschiedliche Ansichten zwischen den Vertragspartnern über die nun vorliegende Vertragssituation keine Seltenheit, besonders dann nicht, wenn sich verschiedene Bauablaufstörungen, die durch beide Vertragsparteien verursacht wurden, überlagern oder miteinander vermischen. Folgen z. B. mehrere Änderungen aufeinander, und ist eine vorausgegangene Fortschreibung bereits strittig, kann ggf. das weitere Terminplangefüge komplett in Frage gestellt werden. Hieraus können schnell unterschiedliche Meinungen zur vorliegenden Vertragssituation entstehen. Denn die Neuvereinbarung von Fristen führt evtl. dazu, dass bisherige Vertragsbedingungen ihre rechtliche Relevanz verlieren und entsprechend neu auszulegen sind oder sich weitere Verbindlichkeiten des bestehenden Vertrags ergeben.[703] Teilweise sind bei komplexen Bauvorhaben mehrere Alternativen des vorhandenen Bauablaufs denkbar, die u. U. eine

[698] DIN ISO 21500, 2016: S. 32.
[699] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 258.
[700] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 257-258.
[701] Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 257.
[702] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 15.
[703] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 15; *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, Stand: 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 305-313.

Vertragspartei benachteiligen und die andere begünstigen würden. Sind innerhalb solcher Bauprojekte bereits nicht eingeplante Mehrkosten entstanden, stellt sich speziell bei größeren Geldsummen durchaus die Frage nach der Haftung.

Roquette et al. beschreiben, dass die Vertragsparteien nicht immer bereit sind, die daraus ableitbaren Verbindlichkeiten im Sinne des Vertragspartners zu tragen.[704] Häufig kommt es vor, dass diejenige „[…] *Partei, die aus den bisher vereinbarten Fristen Ansprüche ableiten möchte,* [bspw.] *Schadensersatzansprüche wegen Verzugs oder wegen Behinderung,* […] *sich diese Ansprüche anlässlich der Terminplanfortschreibung daher ausdrücklich und schriftlich vorbehalten* [sollte], *um Unklarheiten zu vermeiden*."[705] Solche Umstände können ein Ausgangspunkt für Streitigkeiten über bestehende oder nicht bestehende Forderungsrechte sein. Zusammenfassend können die Auffassungen der Parteien in solchen Fragen auseinander gehen, obwohl beide das Vorhandensein einer Verzögerung nicht bestreiten.

Sobald sich die Vertragsparteien nicht außergerichtlich einigen können, kommt es naheliegender Weise zum Rechtsstreit. Oftmals handelt es sich dann nicht um triviale Fälle mit eindeutiger Haftung. Vielmehr ist eine baubetriebliche sowie baurechtliche „Entwirrung" der zumeist komplexen Sachverhalte notwendig, die möglicherweise nur durch die Unterstützung von Experten – namentlich: Sachverständige und Rechtsanwälte – durchzuführen ist.

Hier sind insbesondere Komplexfragen zu klären, die durch einen „einfachen" Soll-Ist-Vergleich – wie er zur Baufortschrittskontrolle genutzt wird – üblicherweise nicht beantwortet werden können. Denn diese Soll-Ist-Vergleiche dienen eher für dispositive Entscheidungen, während der Arbeitsvorbereitung, baubegleitend zur Projektabwicklung. Sie enthalten oftmals keine Informationen, die bestimmte Einzelfallbetrachtungen eines Bauablaufs für baurechtliche Fragen erklären oder gar für das Gericht schlüssig begründen könnten.

So betont *Wessel*, dass es beim Zivilprozess über Bauablaufstörungen im Wesentlichen darauf ankommt, „[…] *ob dargelegt werden kann, welche tatsächlich unvermeidlichen Verzögerungen auf dem behaupteten Verschulden des Auftraggebers im Einzelnen* [beruhen]. ***Hierfür genügt es nicht – was kaum deutlich genug betont werden kann –, den behaupteten Soll- und Istzustand gegenüberzustellen***."[706] *Leinemann* zählt baurechtliche Fragen auf, sobald der Verursachungsbeitrag gefunden werden soll: „*Waren die vom Auftragnehmer geplanten Bauabläufe konform zum Vertragsterminplan? Reichten seine Kapazitäten aus? Hat der Auftraggeber alle Mitwirkungshandlungen erfüllt, um die vereinbarte Bautätigkeit zu ermöglichen? Sind nachträgliche Veränderungen des Leistungsumfangs aufgetreten, die terminliche Konsequenzen haben? Sind Störungen zum*

[704] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 257.

[705] *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 15. In der Rechtsprechung wurde bereits eine solche Vorgehensweise verlangt. So sollen Mehrkostenansprüche aus Bauablaufstörungen für den Auftragnehmer infolge einer Leistungsmodifikation *vorbehalten* werden, falls diese (noch) nicht absehbar sind. Vgl. OLG Köln, Beschluss vom 27.10.2014 – Az. 11 U 70/13, IBRRS 2015: 0137.

[706] Wessel, ZfBR 2010: 531. Ebenso deutlich ist eine Entscheidung des *OLG Hamm* – hier heißt es: „*Entgegen der Auffassung der Klägerseite reichen die vorgenommene Gegenüberstellung von geplantem Bauablauf und dem – nach Eintritt der behindernden Umstände – tatsächlichen Bauablauf und das Vorbringen dazu, wie sich die Verzögerung rein zeitlich ausgewirkt hat, nicht aus*." OLG Hamm, Urteil vom 12.02.2004 – Az. 17 U 56/00, IBRRS 2004: 0821.

Tragen gekommen, die einer Vertragspartei zuzuweisen sind? Haben sich Witterung, Vorunternehmerleistungen, Baugrundrisiken oder Nachbarstreitigkeiten auf die Bauzeit ausgewirkt und wenn ja, zu wessen Lasten?“[707] *Jansen* schreibt überdies, dass „[…] *die Durchsetzung einer an sich durchaus berechtigten Nachtragsforderung* [auch daran scheitern kann]*, dass sie in der baubetrieblichen Nachtragsberechnung nicht plausibel und nachvollziehbar dargelegt ist, etwa weil eine fragwürdige Bewertungs- und Berechnungsmethode zu Grunde gelegt wird.*“[708]

Entgegen einem „einfachen“ Soll-Ist-Vergleich zur Baufortschrittskontrolle spielen beim Soll-Ist-Vergleich für baubetriebliche Gutachten hauptsächlich baubetriebliche Bauzeitanalysen zum Nachweis von Verschuldensanteilen, in Form von:

1. Machbarkeitsstudien (baubetriebliche Einschätzungen),
2. Plausibilisierungen (Neuaufstellungen oder Überarbeitungen streitgegenständlicher Sachverhalte),
3. Aufbereitung entscheidungsrelevanter Dokumente und Fragestellungen,
4. juristisch zugetragenen Aufgaben

eine wesentliche Rolle. Hierbei kommt es nicht zwangsläufig auf die Fülle der Details an. Zudem sind für die Sachverhaltsaufklärung regelmäßig Umstände zu berücksichtigen, die sich nicht durch eine alleinige naturwissenschaftliche Untersuchung bewerten lassen; dazu zählen z. B. einvernehmliche Zugeständnisse und Kompromisse zwischen den Vertragsparteien. Hierauf wird im folgenden *Kapitel 4* näher eingegangen.

[707] Leinemann, NZBau 2009a: 563.
[708] Jansen, DS 2013: 94.

4 Anforderungen an das digitale Nachweisverfahren

4.1 Baurechtliche Aspekte gestörter Bauabläufe nach dem BGB

4.1.1 Allgemeine Pflichten im Werkvertrag

Bauverträge sind Werkverträge, die in §§ 631 ff. BGB geregelt sind und auf einem ***Schuldverhältnis*** gem. § 241 Abs. 1 BGB beruhen. Ein Vertragsverhältnis kommt zustande, wenn zwischen dem *Auftraggeber* und dem *Auftragnehmer*[709] übereinstimmende ***Willenserklärungen*** vereinbart werden. Der Auftragnehmer verpflichtet sich gegenüber seinem Auftraggeber, den *Werkerfolg* gem. *Kapitel 3.1* in Vorleistung zu erbringen. Auf der anderen Seite hat sich der Auftraggeber zur Abnahme des Werks sowie zur Entrichtung einer vereinbarten Vergütung an den Auftragnehmer verpflichtet.[710] Prinzipiell wird bei diesem ***Gegenseitigkeitsverhältnis***[711] zwischen der auftragnehmerseitigen ***Leistung***[712] und der auftraggeberseitigen ***Gegenleistung*** unterschieden.

Die gegenseitigen Verpflichtungen entsprechen den vertragstypischen ***Hauptleistungspflichten***.[713] Sie sind jene *werkvertraglichen* ***Leistungspflichten***[714]*,* um deren Willen ein entsprechender Vertrag geschlossen wird und die diesen charakterisieren. Generell lassen sich im Schuldverhältnis beliebig weitere Hauptleistungspflichten vereinbaren, die dann die inhaltlichen Bestimmungen eines Werkvertrags ergänzen.[715] Außerdem müssen die Vertragsparteien einer Vielzahl von ***Nebenleistungspflichten*** nachgehen, die zur Vorbereitung, Durchführung und Erreichung der Hauptleistungspflichten notwendig werden

---

[709] Abweichend von den Bezeichnungen des *Bürgerlichen Gesetzbuchs* (BGB) werden die Begriffe der *Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen* (VOB) verwendet. Daher wird im weiteren Text der vorliegenden Arbeit der *Unternehmer* als ***Auftragnehmer*** und der *Besteller* als ***Auftraggeber*** bezeichnet. Zudem wird hauptsächlich das Werkvertragsrecht *vor* der Bauvertragsrechtsreform betrachtet, das am 01.01.2018 in Kraft getreten ist. Letzteres wird in *Kapitel 4.1.8* diskutiert.

[710] Vgl. *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 514-524; *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 631, Rdn. 1, 20; *Busche in* MüKoBGB, 2018: BGB § 640, Rdn. 2.

[711] Das Gegenseitigkeitsverhältnis wird auch *synallagmatisches Verhältnis* oder *Leistungs-Gegenleistungsverhältnis* genannt; nach dem Prinzip: „Ich gebe, damit du gibst“. Vgl. *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 1, 513.

[712] Das Wort *Leistung* kann unterschiedliche Bedeutungen haben. Auf *Prozessebene* ist die Leistung eine *Arbeitsproduktivität* gem. *Kapitel 2.1.7*. In der *Betriebswirtschaft* ist die Leistung die Fertigung eines Produkts (oder eine Dienstleistung) für den Markt, das mit Kosten (als unternehmensinterner Gegenwert) verbunden ist. Im *Schuldrecht* ist die Leistung eine *geschuldete Verpflichtung* (bspw. das Herbeiführen des Werkerfolgs als Pflicht) für eine Gegenleistung. Vgl. Brüssel, 2007: S. 186-187. Laut § 1 VOB/A sind Bauleistungen „[…] *Arbeiten jeder Art, durch die eine bauliche Anlage hergestellt, instand gehalten, geändert oder beseitigt wird.*“ Für VOB-Verträge sind die Anforderungen der Leistungspflichten verschiedener Baugewerke u. a. im *Teil VOB/C* (*Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen – ATV*) geregelt. Hier knüpft die Leistungsbeschreibung gem. § 1 Abs. 1 VOB/B an, die in der Praxis die im Leistungsverzeichnis verpreisten Leistungspositionen enthält. Vgl. *Leupertz in* NK-BGB, 2016: BGB § Anhang III 631-651: Rdn. 17-19; Hammacher, NZBau 2016: 20-23.

[713] Vgl. *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 631, Rdn. 1-4, 20-22; *Busche in* MüKoBGB, 2018: BGB § 631, Rdn. 60-62, 66-67, 71; *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 442 ff., 513 ff.

[714] *Leistungspflichten* zielen *immer* direkt auf die *Leistungserbringung* ab. Sie dienen vorzugsweise der Sicherung des Erfüllungsinteresses seitens des Gläubigers. Vgl. *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 241, Rdn. 9. Siehe weiterhin *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: § 631 Rdn. 442 ff., 513; *Busche in* MüKoBGB, 2018: BGB § 650a, Rdn. 11.

[715] Vgl. *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 524.

können.[716] Beispielsweise umfassen die auftragnehmerseitigen Nebenleistungspflichten jene Tätigkeiten, die zur Herstellung einer abnahmereifen Bauleistung erforderlich sind. Hierunter fallen u. a. Beratungs-, Informations- und Aufklärungspflichten oder physische Tätigkeiten, wie etwa die Beseitigung von Bauschutt oder die Sicherung der Baustelle.

Auch der Auftraggeber ist in bestimmten Situationen verpflichtet, am Werkerfolg mitzuwirken, besonders dann, wenn seine Mitwirkungshandlung ausdrücklich im Vertrag festgehalten wird. Eine solche Mitwirkungshandlung kann eine fristgerechte Planlieferung oder die Bereitstellung der Baufläche sein. Die Nebenleistungspflichten berechtigen die andere Partei zwar nicht, dass sie ihre Hauptleistungspflichten, z. B. die Zahlung des fälligen Werklohns, zurückbehält. Allerdings können sie zu Hauptleistungspflichten erhoben werden, so dass sie im Gegenseitigkeitsverhältnis stehen. Speziell für Bauverträge ist es in der Fachliteratur umstritten, ab wann eine auftraggeberseitige Mitwirkungshandlung als Nebenleistungspflicht oder lediglich als *Obliegenheit* anzusehen ist (Obliegenheiten werden in *Kapitel 4.1.6* näher erläutert).[717] Im Gegensatz zu einer Obliegenheit zählen Nebenleistungspflichten zu den Leistungspflichten des Vertragsverhältnisses.[718]

Von Leistungspflichten sind ***Nebenpflichten***, die das Integritätsinteresse des anderen Vertragspartners schützen sollen, abzugrenzen.[719] Nebenpflichten ergeben sich vor allem aus §§ 241 Abs. 2, 242 BGB. Auf dieser Grundlage einigen sich beide Vertragspartner durch die Vertragsbildung auf eine *gemeinsame* Zusammenarbeit, bei der die Erreichung des Vertragszwecks im Vordergrund steht.

Aus diesem Grundsatz heraus sind beide Vertragsparteien dazu *verpflichtet*, den gesamten Werkvertrag mit Rücksichtnahme auf bestehende Rechte, Rechtsgüter und Interessen des anderen Vertragspartners abzuwickeln. Nebenpflichten umfassen zudem Aufklärungs-, Anzeige-, Hinweis-, Informations-, Offenbarungs- und Verschwiegenheitspflichten.[720] Sie

---

[716] Vgl. *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 241, Rdn. 9-13; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 241, Rdn. 4, 8; *Busche in* MüKoBGB, 2018: BGB § 631, Rdn. 76. Beispiele für werkvertragliche Nebenleistungspflichten: *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 631, Rdn. 5-11, 23.

[717] Sehr ausführlich: Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1274-1290 (insbesondere Rdn. 1278).

[718] Vgl. *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 513, 524, 526.

[719] In der Literatur werden *Nebenpflichten* neben *Schutzpflichten* und *Treuepflichten* auch als *Verhaltenspflichten* oder *unselbständige Nebenleistungspflichten* usw. bezeichnet. Beispielsweise: *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 241, Rdn. 9; *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 631, Rdn. 23-25; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 132. Die genaue Abgrenzung zwischen den verschiedenen Semantiken der Begriffe gestaltet sich teilweise schwierig. Besonders dann, wenn die Durchführung einer Nebenpflicht mit einer Leistungspflicht einhergeht bzw. zur Leistungserbringung beiträgt. Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 241, Rdn. 4, 8. So grenzt sich *Krebs* von dem Begriff der Nebenpflicht ab und favorisiert die Termini Schutzpflichten und Treuepflichten. Vgl. *Krebs in* NK-BGB, 2016: BGB § 241, Rdn. 19. Zugleich beschreibt *Krebs* den Forschungsbedarf zur klaren Abgrenzung zwischen Nebenleistungspflichten und Schutzpflichten. Die Leistungspflichten sollen die Veränderung der Güterlage des Gläubigers bezwecken, während die Schutzpflichten (häufig als Nebenpflichten bezeichnet) zum Schutz der gegenwärtigen Güterlage angedacht sind. Vgl. *Krebs in* NK-BGB, 2016: BGB § 241, Rdn. 48. Der ausschlaggebende Grund für die Unterscheidungen ist in den verschiedenen möglichen Rechtsfolgen zu finden. Grundsätzlich wird beim Schuldrecht berücksichtigt, ob an der vertraglichen Leistungserbringung noch festgehalten werden kann, woraus sich verschiedene *Schadensersatzansprüche* und/oder *vorzeitige Vertragsbeendigungen* ergeben können. Vgl. *Krebs in* NK-BGB/Peter, 2016: BGB § 241, Rdn. 47. In dieser Arbeit findet *keine* juristische Wertung von (geeigneten) Termini statt.

[720] Vgl. *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 242, Rdn. 19, 24.

müssen nicht zwingend leistungsbezogen sein und können bereits bei der Vertragsanbahnung beginnen sowie nach Auftragserteilung fortbestehen.[721]

Nebenpflichten zählen mit den Leistungspflichten zu den ***Primärpflichten***. Sie haben jedoch hinsichtlich ihrer Rechtsfolge unterschiedliche Relevanz, da sie nicht zwingend an die Herstellung des Werks gekoppelt sind. Die wahrzunehmenden Primärpflichten beider Vertragspartner beruhen auf den Loyalitäts-Grundsätzen von *Treu und Glauben* gem. § 242 BGB.[722] „*Treue bezeichnet im Verhältnis der Beteiligten eine Haltung, die Verlässlichkeit und Rücksichtnahme einschließt. Glauben bedeutet das Vertrauen auf eine derartige Haltung der anderen Partei.*“[723] Diese gegenseitigen Verpflichtungen gelten beim Ausüben sowie beim Unterlassen aller Handlungen, die während der kompletten Vertragsdurchführung erforderlich sein können. Unter anderem muss der Auftragnehmer möglichst frühzeitig auf ein unrichtiges oder unvollständiges Leistungsverzeichnis hinweisen.[724]

Die Zusammenhänge werden u. a. durch die *Abbildung 4-1* verdeutlicht.

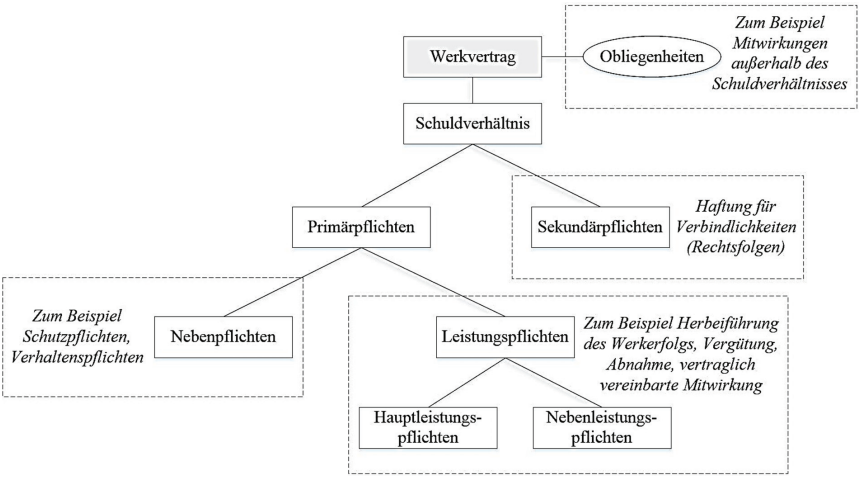


Abbildung 4-1: Grafische Darstellung eines Schuldverhältnisses[725]

Im Schuldrecht wird derjenige Vertragspartner als ***Schuldner*** bezeichnet, der seinem Vertragspartner, dem ***Gläubiger***, die Erfüllung einer Leistungspflicht schuldet. Folglich kann sowohl der Auftraggeber als auch der Auftragnehmer entweder Gläubiger oder Schuldner sein (siehe *Abbildung 4-2*). Aus dem Schuldverhältnis ergeben sich Forderungs-

[721] Vgl. *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 242, Rdn. 16.
[722] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 242, Rdn. 1-48; *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 463 ff., 525 ff.
[723] *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 242, Rdn. 12. Siehe auch *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 463. Dies gilt u. a. für das gesamte Schuldrecht. Vgl. *Kähler in* BeckOGK, St. 15.06.2018: BGB § 242, Rdn. 114-125.
[724] Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 1, Rdn. 34.
[725] Eigene Darstellung. Anmerkung: Ähnliche Darstellungen sind allgemein verbreitet. Die Angabe der Urquelle ist jedoch unbekannt.

rechte seitens des Gläubigers, die als ***(materielle) Ansprüche*** bezeichnet werden.[726] Ein Anspruch ist somit das berechtigte Fordern rechtlicher Vorteile gegenüber der anderen Vertragspartei.[727] Weiterhin ist die Relativität des Schuldverhältnisses zu beachten. Diese besagt, dass das Schuldverhältnis grundsätzlich nur zwischen zwei Parteien besteht.

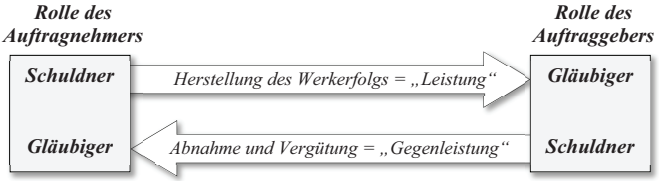


Abbildung 4-2: Gegenseitigkeitsverhältnis werkvertragstypischer Hauptleistungspflichten[728]

Neben den *Primärpflichten* existieren ***Sekundärpflichten***. Beide Pflichten sind Ausdruck der Willenserklärung aus dem Schuldverhältnis. Aus Sekundärpflichten können Verbindlichkeiten entstehen, sobald die Primärpflichten verletzt bzw. nicht eingehalten oder „gestört“ werden.[729] Das heißt, wenn die Primärpflicht einer Partei verletzt wird, ist es der benachteiligten Partei möglich, hieraus Rechte abzuleiten und Ansprüche zu fordern. Sind die Forderungen berechtigt, greift die Sekundärpflicht beim Vertragspartner. Letzterer ist dann verpflichtet, für die Rechtsfolgen *des jeweiligen Anspruchs* zu haften.

4.1.2 Bauzeitverlängerung und Leistungsstörung

Die Baupraxis zeigt, dass die Zeitplanung von Bauprojekten mit Schwierigkeiten verbunden sein kann, weshalb ggf. ungenaue oder unvollständige Bauzeitenpläne als Vertragsbestandteil vorliegen.[730] Zusätzlich können unterschiedliche Bauablaufstörungen während der späteren Ausführung auftreten (siehe *Kapitel 2.1.11*). Solche Umstände führen regelmäßig zu ***Bauzeitverlängerungen***[731], wodurch der Bauzeitenplan und ggf. die vertraglich vorgesehenen Kosten überschritten werden. Dies kann dazu führen, dass die vereinbarte Leistung nicht mehr mit der tatsächlichen Leistung übereinstimmt.

Entstehen Umstände, die außerhalb des Vertrags liegen, können Ansprüche aufgrund der Sekundärpflichten des Schuldverhältnisses als Ausgleichsregelungen greifen. In der

---

[726] Vgl. *Bachmann in* MüKoBGB, 2016: BGB § 241, Rdn. 3-4.

[727] Beziehungsweise laut § 194 BGB: „*Das Recht, von einem anderen ein Tun oder Unterlassen zu verlangen* […]“. Siehe auch *Henrich in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 194, Rdn. 13-15.

[728] Eigene Darstellung.

[729] Vgl. *Bachmann in* MüKoBGB, 2016: BGB § 241, Rdn. 10.

[730] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 42; Bottek, 2010: S. 242. Siehe *Kapitel 3.3.3*.

[731] Um Verwechselungen zu vermeiden: **Unter dem Begriff *Bauzeitverlängerung* wird keine Fristverlängerung verstanden**, sondern ein zusätzlicher *zeitlicher Mehrbedarf*, der für die Leistungserfüllung erforderlich ist (siehe *Kapitel 4.2.3*). Hieraus kann sich eine Fristverlängerung ergeben, muss es aber nicht. Eine Fristverlängerung setzt aufgrund einer Bauzeitverlängerung voraus, dass: 1. eine auftraggeberseitige Behinderung ursächlich war; 2. der zeitliche Mehrbedarf nicht mit einer Beschleunigung aufgefangen wurde und 3. der tatsächliche Fertigstellungstermin hinter dem vertraglich vereinbarten Fertigstellungstermin liegt. So wird z. B. bei einer Beschleunigung ein zeitlicher Mehrbedarf innerhalb einer kürzeren Bauzeit erbracht. Das heißt, infolge einer Beschleunigung liegt eine „komprimierte“ Bauzeitverlängerung vor, die sich rechnerisch ermitteln lässt. Ebenso kann eine Bauzeitverlängerung die Verzugsdauer gem. § 642 BGB sein. Näheres hierzu in *Kapitel 4.1.6*.

vorliegenden Arbeit werden hierfür Ansprüche aus ***Leistungsverzögerungen***[732] betrachtet, die Rechtsfolgen über §§ 280, 286 BGB oder aus §§ 293 ff. BGB bzw. § 642 BGB auslösen. Die genannten Ansprüche greifen nur, wenn die Leistungserbringung erfüllbar bzw. ***nicht unmöglich***[733] ist; oder anders ausgedrückt: Bei einer nachträglichen Betrachtung muss feststellbar sein, dass eine Werkleistung erfolgreich vollendet wurde und nicht „ins Leere gelaufen" ist.

4.1.3 Leistungszeit nach § 271 BGB

Die Ansprüche aus Leistungsverzögerungen richten sich nach der ***Leistungszeit***[734] gem. § 271 BGB. Sie gibt Aufschluss darüber, wann die geschuldete Leistung vom Schuldner abgeschlossen werden soll und wann der Gläubiger diese verlangen kann. Bis zur Vollendung einer Leistung wird zwischen der ***Fälligkeit*** und der ***Erfüllbarkeit*** unterschieden.[735]

Die *Fälligkeit* definiert jenen Zeitpunkt, ab dem der Gläubiger die Leistung *fordern kann* und der Schuldner diese *erbringen muss*.[736] „*Da beim Werkvertrag nur der Enderfolg geschuldet ist, wird die Leistung des Werkunternehmers* [bzw. Auftragnehmers] *erst mit dem für die Ablieferung des Gesamtwerkes maßgeblichen Zeitpunktes fällig, sofern nicht eine Vereinbarung über eine frühere Fälligkeit von Teilleistungen getroffen wurde.*"[737] Dementsprechend kann die Fälligkeit als Vertragsbestandteil durch die Vertragspartner in Form von *Fristen* oder *Terminen* bestimmt werden (siehe *Kapitel 3.3.2*). Laut *Jansen und von Rinteln* zielt die Fälligkeit auf jenen Zeitpunkt ab, zu dem die Bauleistung fertiggestellt sein *muss*.[738]

Unter der *Erfüllbarkeit* wird ein Zeitpunkt *innerhalb eines Erfüllungszeitraums* verstanden, ab dem der Schuldner seine erstellte Leistung *anbieten darf* und der Gläubiger die ordnungsgemäß angebotene Leistung *annehmen muss*.[739] Die Erfüllbarkeit kann *zeitgleich* mit der Fälligkeit stattfinden oder *vor* dieser liegen.[740]

---

[732] *Leistungsverzögerungen* zählen zu den Leistungsstörungen. Auch ***Schlechtleistungen*** (z. B. Baumängel) sind Leistungsstörungen. Sie werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

[733] Die ***Unmöglichkeit*** gem. § 275 BGB *schließt* eine verspätete Pflichterfüllung einer konkreten Leistung *aus*. Im Falle einer *Unmöglichkeit* sind *Schadensersatzansprüche statt der Leistung* zugänglich. Zum Beispiel könnte eine Bauleistung an einem denkmalgeschützten Bauwerk mit einer ausbleibenden Genehmigung zur unmöglichen Pflichterfüllung führen. Voraussetzung ist, dass die Bauarbeiten nicht weiter ausgeführt werden. Auf solche Leistungsstörungen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

[734] Die Termin- und Fristenregelungen bei VOB- und BGB-Werkverträgen unterscheiden sich in einigen Punkten. In der VOB ist die Leistungszeit gegenüber der (eher allgemein formulierten) Leistungszeit des BGB mit *Ausführungsfristen* spezieller definiert (siehe *Kapitel 3.3.2* und *Kapitel 4.2.2*). Die Unterschiede sind in §§ 9 Abs. 2 VOB/A, 5 Abs. 1, 2 VOB/B zu finden. In diesem Unterkapitel wird darauf jedoch nicht näher eingegangen. Vielmehr steht die Rechtsnorm § 271 BGB im Vordergrund, die auch für die Fristenregelungen der VOB relevant ist.

[735] Vgl. *Krüger in* MüKoBGB, 2016: BGB § 271, Rdn. 1; *Krafka in* BeckOGK, St. 01.08.2018: BGB § 271, Rdn. 3, 6-9.

[736] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 271, Rdn. 2; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 271, Rdn. 1-2; *Krafka in* BeckOGK, St. 01.08.2018: BGB § 271, Rdn. 8.

[737] *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 460.

[738] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 306.

[739] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 271, Rdn. 2; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 271, Rdn. 2, 16; *Krüger in* MüKoBGB, 2016: BGB § 271, Rdn. 3; *Krafka in* BeckOGK, St. 01.08.2018: BGB § 271, Rdn. 9.

[740] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 271, Rdn. 2; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 271, Rdn. 1-4; *Krüger in* MüKoBGB, 2016: BGB § 271, Rdn. 3. Als *Verhaltener Anspruch* wird die Konstellation beschrieben, bei der die *Erfüllbarkeit hinter der Fälligkeit* liegt, nachdem der Gläubiger diese gefordert hat. Vgl. *Krafka in* BeckOGK, St. 01.08.2018: BGB § 271, Rdn. 10.

4.1.4 Auslegung der Leistungszeit

Falls einer Vertragspartei aufgrund einer Bauzeitverlängerung nicht eingeplante Mehrkosten entstanden sind, die sie möglicherweise nicht zu verantworten hat, wird i. d. R. das *Verschulden* sowie der vertragsrechtliche Sinngehalt des Zeitplans hinterfragt. Sollte zwischen den Vertragsparteien keine einvernehmliche Einigung möglich sein, greift § 271 Abs. 1 BGB.

Dort heißt es: „*Ist eine Zeit für die Leistung weder bestimmt noch aus den Umständen zu entnehmen, so kann der Gläubiger die Leistung sofort verlangen, der Schuldner sie sofort bewirken.*“ Der Text der Rechtsnorm zielt auf den *Beginn* und die *Annahme* einer Leistung zu einem im Vertrag nicht vorgesehenen Zeitpunkt ab.[741] Bei Bauleistungen kann diese Regelung problematisch werden, da der Auftragnehmer erst in Vorleistung treten muss, bevor der Auftraggeber die Leistung verlangen kann. Aufgrund der zeitlichen Differenz ist das sofortige Verlangen und Bewirken wortwörtlich nicht anwendbar.

Das Wort *sofort* ist jedoch nicht mit *unverzüglich* zu verwechseln.[742] Vielmehr werden hierunter der frühzeitige Beginn sowie die zügige Herstellung eines abnahmereifen Werks verstanden, die bei Unstimmigkeiten einer angemessenen ***Auslegung*** der einzelfallbezogenen Umstände gem. §§ 133, 157 BGB bedürfen.[743]

Vordergründiges „*Ziel der Auslegung ist die Ermittlung des objektiv erklärten Parteiwillens aus Sicht des Erklärungsempfängers*.“[744] Somit hat der Auftragnehmer in Streitfragen seine Willenserklärung nach §§ 133, 242 BGB zum Ausdruck zu bringen, die *ggf.* im Zusammenwirken mit einer objektiven Auslegung des Erklärungsempfängers gem. §§ 157, 242 BGB *anzuerkennen* ist.[745] Die Vertragsauslegung unterliegt in erster Linie einer juristischen Bewertung, solange keine einvernehmliche Einigung zustande kommt. Mit der Auslegung soll ein Vertrag oder Vertragsteil „zu Ende gedacht“ werden, wobei die Interessenbewertungen beider Vertragsparteien i. S. v. § 242 BGB zu berücksichtigen sind. Gerade bei strittigen Vertragsinhalten wird eine Auslegung nicht durch einen alleinigen baubetrieblichen Leitgedanken manifestiert. Stattdessen sind juristische Aspekte des Vertrags unter Berücksichtigung der berührten Rechtsnormen relevant – dabei gilt es die Verkehrssitte[746] zu beachten. Gutachten können derartige Streitigkeiten untersuchen und den vorhandenen Sachverhalt konkretisieren.

„*Für den Zeitpunkt der Fertigstellung (im Sinne der Fälligkeit der Leistung) kommt es darauf an, in welcher Zeit bei nach dem vom Bauvertrag vorausgesetzten Bauablauf die Fertigstellung möglich war.*“[747] Wenn der Fälligkeitszeitpunkt strittig ist, trägt der Auftragnehmer als Schuldner die Anforderungen der Beweislast, während der Auftraggeber

---

[741] Nach *Jansen und von Rinteln* betrifft § 271 BGB den objektiv ermittelten möglichen Beginn und nicht die Fälligkeit einer Bau- oder Teilleistung. Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 306. Siehe auch *Kapitel 4.1.3*.
[742] Vgl. Kiedrowski, NJW 2017: 3484-3486.
[743] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 271, Rdn. 9; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 271, Rdn. 1, 14; *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631, Rdn. 459; *Preussner in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: 5 Abs. 2, Rdn. 1; *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 5 Abs. 1, Rdn. 1-2.
[744] *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 819.
[745] Vgl. *Dörner in* HK-BGB, 2017: BGB § 157, Rdn. 1.
[746] Siehe *Kapitel 3.1*.
[747] Bolz, IBR 2017: 243.

als Gläubiger die Fälligkeit nicht besonders begründen muss.[748] Trotz seines Rechts, die Auslegung durchzuführen, entstehen dem Auftragnehmer keine sonderlichen Vorteile gegenüber dem Auftraggeber.[749] Denn er ist „[…] *mit der Unsicherheit belastet, im Streitfall nicht darlegen und beweisen zu können, dass die tatsächlich von ihm in Anspruch genommene Bauzeit vor Eintritt der Fälligkeit für die Fertigstellung der Leistung lag.*“[750] Der Auftragnehmer muss vordergründig darlegen, aus welchen Beweggründen die von ihm genannte Bauzeit als Gegenstand des Vertrags anzusehen ist.[751]

Im Zweifel hat er die konkreten Umstände, die zur Vertragserfüllung erforderlich waren, plausibel vorzutragen. Als Anhaltspunkte nennt *Preussner*:

- „[…] *die Art und der Umfang der geschuldeten Bauleistung,*
- *die allgemein anerkannten Regeln der Gewerbeüblichkeit bei fortlaufender zügiger Arbeit,*
- *die zeitgenaue Erfüllung von Mitwirkungshandlungen des Auftraggebers,*
- *die Eigenheiten der Baustelle*.“[752]

Falls die Bestimmung von Fristen und/oder Terminen ungewiss ist, kann eine Auslegung gem. §§ 157, 242 BGB erfolgen, bei der die Auslegungsregeln aus §§ 187-193 BGB anzuwenden sind (siehe *Kapitel 3.3.2*).[753]

Per Auslegung kann beim BGB-Werkvertrag eine ***Fristverlängerung*** stattfinden, die mit den Regeln gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B vergleichbar ist (siehe *Kapitel 4.2.5*).[754] Als Grundlage nennen *Vygen und Joussen* die vertraglich vereinbarte Willenserklärung, die sich aus *Treu und Glauben* ergibt und auf die *Störung der Geschäftsgrundlage* i. S. v. § 313 BGB gestützt werden kann.[755] Bei der Bestimmung einer angemessenen Fertigstellungsfrist kommt es auf die *objektive Bewertung*[756] besonderer Umstände an, die zur Leistungsverzögerung beigetragen haben.[757]

Weitere Einzelheiten zur Vertragsauslegung sind den einschlägigen Quellen aus dem Literaturverzeichnis dieser Arbeit zu entnehmen.

---

[748] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 45.
[749] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 5 Abs. 1, Rdn. 3.
[750] *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 5 Abs. 1, Rdn. 3. Diese Anforderungen werden in Fachkreisen als außerordentlich hoch angesehen.
[751] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 45; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 6.
[752] *Preussner in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: § 5 Abs. 2, Rdn. 1. „*Bei der Vertragsauslegung sind grundsätzlich alle Vertragsumstände heranzuziehen. Es können Umstände des ausgeschriebenen Vorhabens wie die konkreten Verhältnisse des Bauwerks, technischer und qualitativer Zuschnitt, architektonischer Anspruch und Zweckbestimmung des Gebäudes für die Auslegung bedeutsam sein* […].“ *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 813.
[753] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 271, Rdn. 3; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 271, Rdn. 6-7.
[754] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 354; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 502.
[755] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 354.
[756] Siehe *Kapitel 2.1.4*.
[757] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 306.

4.1.5 Anspruch auf Schadensersatz nach §§ 280, 286 BGB

In §§ 280, 286 BGB wird der *Schadensersatz wegen* ***Schuldnerverzug*** geregelt, der zu den *Leistungsverzögerungen* gehört. Es wird *angenommen*, dass der Schuldner aufgrund einer *zu vertretenden Pflichtverletzung* die *fällige Leistung* nicht rechtzeitig erbrachte, obwohl er sie hätte erfüllen können (Schadensersatz *neben* der Leistung).[758]

Sobald eine Pflicht des Schuldners gem. §§ 276 ff. BGB *verletzt* wird und er diese als Pflichtverletzung ***vertreten*** muss, ist zunächst die Forderungsvoraussetzung auf ***Schadensersatz*** gem. § 280 Abs. 1 BGB seitens des Gläubigers erfüllt.[759] *Von Rinteln* schreibt, dass der Begriff der Pflichtverletzung alle Formen der Leistungsstörung umfasst, dabei ist es „[…] *unerheblich, ob der Schuldner eine Haupt- oder eine Nebenpflicht, eine Leistungs- oder eine Schutzpflicht verletzt hat.*“[760]

Das „Vertretenmüssen“ einer Pflichtverletzung ist gleichzusetzen mit der ***Zurechnung*** einer Verhaltensweise.[761] Es umfasst das ***Verschulden***[762] der Zurechnung einer Haftung aufgrund eines *vorsätzlichen* oder *fahrlässigen Verhaltens* innerhalb des bestehenden Vertragsverhältnisses.[763] Im Bereich der Leistungsstörungen haftet z. B. der Schuldner „[…] *nur dann, wenn ihm die Pflichtverletzung bzw. das zu ihr führende Verhalten vorzuwerfen ist.*“[764]

Neben seinem eigenen Verschulden kann der Schuldner ebenso eine Pflichtverletzung zu *vertreten* haben, die auf das schuldhafte Verhalten seiner ***Erfüllungsgehilfen*** gem. § 278 BGB zurückzuführen ist, solange diese nicht über ihre beauftragten oder befähigten Aufgaben hinaus handeln.[765] Ein *Erfüllungsgehilfe* ist eine *dritte* (Hilfs-)Person des Schuldners. Voraussetzung ist, dass diese ein weiterer Vertragspartner des Schuldners in einem anderen Vertragsverhältnis ist und im Rahmen ihrer Verbindlichkeiten im Willen und Wissen des Schuldners tätig wird.[766] Zum Beispiel könnte ein angestellter Polier oder ein beauftragter Subunternehmer Erfüllungsgehilfe des Bauunternehmers sein.[767] Gleiches trifft beim Auftraggeber für seinen Architekten oder Statiker zu – laut Rechtsprechung ist jedoch ein Vorunternehmer kein Erfüllungsgehilfe[768] des Auftraggebers.[769] Somit hat der

---

[758] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 1; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 286, Rdn. 1.
[759] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 280, Rdn. 14; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 280, Rdn. 1; *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 286, Rdn. 6.
[760] *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 288.
[761] Vgl. *Grundmann in* MüKoBGB, 2016: BGB § 276, Rdn. 4, 10.
[762] Häufig ergibt sich das *Verschulden*, wörtlich, aus der betreffenden Norm. So besteht im Vertragsrecht bei Primäransprüchen oft eine *verschuldensunabhängige Haftung* sowie bei Sekundäransprüchen eine *Verschuldungsvermutung*. Vgl. *Schaub in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 276, Rdn. 4. Dementsprechend geht *Oberhauser* im Speziellen auf das *Mitverschulden* gem. § 254 BGB ein und führt aus: „*Das in § 254 Abs. 1 BGB genannte mitwirkende Verschulden des Geschädigten bedeute nicht die vorwerfbare Verletzung einer gegenüber einem anderen bestehenden Leistungspflicht, sondern ein Verschulden in eigener Angelegenheit,* [d. h.,] *es erfordere lediglich ein Verschulden gegen sich selbst und damit die Verletzung einer im eigenen Interesse bestehenden Obliegenheit.*“ *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 6, Rdn. 22. Siehe auch *Kapitel 4.4.2*.
[763] Vgl. *Lorenz in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 276, Rdn. 1, 5, 6, 8; *Schaub in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 276, Rdn. 3-4; *Dauner-Lieb in* NK-BGB, 2016: BGB § 276, Rdn. 3, 4.
[764] *Dauner-Lieb in* NK-BGB, 2016: BGB § 276, Rdn. 3.
[765] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 26; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 278, Rdn. 1, 13; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 6, Rdn. 22.
[766] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 278, Rdn. 7 ff.; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 278, Rdn. 6-16.
[767] Vgl. *Preussner in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: § 10 Abs. 1, Rdn. 8-21; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 278, Rdn. 7.
[768] Siehe *Kapitel 4.1.5*.

Auftraggeber den Verzug einer verspäteten Vorunternehmerleistung nicht zu vertreten, was entsprechende Schadensersatzansprüche des Auftragnehmers ausschließt.

Im Schuldrecht erlaubt § 280 Abs. 1 BGB allerdings erst jene Schadensersatzansprüche aus Leistungsverzögerungen, wenn sich die Pflichtverletzung mit den in § 280 Abs. 2 BGB i. V. m. § 286 BGB geregelten Verzugstatbeständen zusammenbringen lässt.[770] Hierbei kommt es vorwiegend auf den Fälligkeitszeitpunkt der Leistung an, die vom Vertragsinhalt der Leistungsverpflichtung abhängt.[771]

Eine Besonderheit beim Schuldnerverzug ist, dass der Gläubiger den Schuldner mit einer ***Mahnung*** gem. § 286 Abs. 1 BGB in *Verzug* setzen muss, solange sich kein Fälligkeitstermin aus den vertraglichen Vereinbarungen, wie z. B. eine Vertragsfrist aus einem Bauzeitenplan, ermitteln lässt.[772]

Der Schuldnerverzug wird erst durch die Mahnung wirksam. Sie besitzt eine ***Warnfunktion*** und zugleich eine *Aufforderung* zur Vollendung der Leistung.[773] Darum darf sie nicht durch vorformulierte allgemeine Geschäftsbedingungen außer Kraft gesetzt werden.[774] Eine Mahnung muss dem Schuldner eindeutig bzw. unmissverständlich signalisieren, dass das Ausbleiben der Leistung Rechtsfolgen auslösen wird.[775]

Wie bereits implizit angedeutet wurde, kann der Gläubiger auf die Einreichung einer Mahnung verzichten, sobald sie gem. § 286 Abs. 2 BGB entbehrlich ist. Dies gilt, falls der Fertigstellungstermin einer Leistung

- einen kalendermäßig bestimmten Termin überschreitet;
- kalendermäßig berechnet werden kann (sofern die Leistung auf ein bestimmtes Ereignis folgt);
- irrelevant erscheint, da die Leistungserbringung durch den Schuldner ernsthaft und endgültig verweigert wird.

Darüber hinaus ist eine Mahnung entbehrlich, wenn aus besonderen Gründen, unter Abwägung der beiderseitigen Interessen, ein sofortiger Verzug gerechtfertigt ist.

Bei der Beweis- und Darlegungslast des Schuldnerverzugs hat „[…] *jede Seite die für sie günstigen Tatsachen zu beweisen.*“[776] So muss der Gläubiger die Verzögerung bzw. die ausbleibende Leistungsannahme *zur Fälligkeit* sowie die Mahnung oder andernfalls deren *Entbehrlichkeit* vortragen.[777] Zudem hat er die ursächliche Pflichtverletzung sowie seine

---

[769] Vgl. *Preussner in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: § 10 Abs. 1, Rdn. 8-21; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 278, Rdn. 7.

[770] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 1; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 280, Rdn. 2, 4; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 280, Rdn. 1-3, 32-40; *Dornis in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 286, Rdn. 10; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 68; *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 303.

[771] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 306.

[772] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 64; Bolz, IBR 2017: 243.

[773] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 8.

[774] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 66.

[775] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 8.

[776] *Dornis in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 286, Rdn. 372.

[777] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 7, 8, 32; *Dornis in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 286, Rdn. 373; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 286, Rdn. 9-10; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 5, 10,30-39.

angebotene Mitwirkungshandlung *kausal* nachzuweisen.[778] Wurde aber im Vertrag eine Garantie in Form einer rechtzeitigen Leistungserfüllung, z. B. eine Frist, vereinbart, tritt der Schuldnerverzug nach den oben genannten Voraussetzungen bereits nach alleiniger Fristüberschreitung *automatisch* ein.[779] Im Gegenzug obliegt es dann dem Schuldner sich zu entlasten, indem er kausal aufzeigt, dass sein Handeln oder Unterlassen nicht zum Schuldnerverzug führte bzw. diesen *nicht verschuldet* hat.[780]

Übertragen auf die Ausführung von Bauprojekten reicht damit die bloße Überschreitung einer vertraglich vereinbarten Frist[781] als Fälligkeitstermin aus, damit der Auftragnehmer in Schuldnerverzug gerät.[782] Das heißt, falls der Auftraggeber aus dem Schuldnerverzug Schadensersatzansprüche ableiten möchte, muss er in Streitfragen die Nichteinhaltung eines verbindlich vereinbarten Termins nachweisen. Hierbei wird das Verschulden des Auftragnehmers gem. §§ 280 Abs. 1, 286 Abs. 4 BGB zunächst ***vermutet***, wovon er sich *entlasten* kann.[783] Allerdings muss er als Leistungserbringer anhand seiner Produktionsprozesse den Nachweis über die Leistungsstörung führen, worüber er sein Verhalten offenlegt, damit die Zurechenbarkeit für das Gericht eindeutig wird.

Die Nachweisführung komplexer Bauabläufe kann sich als schwierig erweisen, da viele unterschiedliche Störungssachverhalte möglicherweise aus mehreren Risikobereichen heraus entstehen und sich dadurch verschiedene Forderungsrechte evtl. miteinander vermischen.[784] Demnach muss der Auftragnehmer bei strittigen Fällen dezidiert mit einem ***Kausalitätsnachweis*** verdeutlichen, dass die Überschreitung des Fälligkeitstermins nicht aus seiner Risikosphäre stammt.[785] Nur so kann er in einem Entlastungsbeweis die Schadensersatzansprüche des Auftraggebers aus einem Schuldnerverzug abwehren. Die Zusammenhänge lassen sich der *Abbildung 4-3* entnehmen.

[778] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 32; *Dornis in* BeckOGK, St. 01.06.2018: BGB § 286, Rdn. 373; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 286, Rdn. 9-10.
[779] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 26.
[780] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 25-29, 32; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 10.
[781] Generell ist zu differenzieren, ob eine Frist durch den Bauvertrag verbindlich geworden ist. Nicht jede Frist ist verbindlich. Beim VOB-Werkvertrag wäre eine *Vertragsfrist* gegenüber einer *Kontrollfrist* verbindlich (siehe *Kapitel 3.3.2*).
[782] Vgl. Drittler, 2017: Rdn. 5:1.
[783] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 47; Drittler, 2017: Rdn. 5:1, 5:7, 5:56-57; *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5, Rdn. 48.
[784] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 305.
[785] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 47, 79-84; Drittler, 2017: Rdn. 5:7.

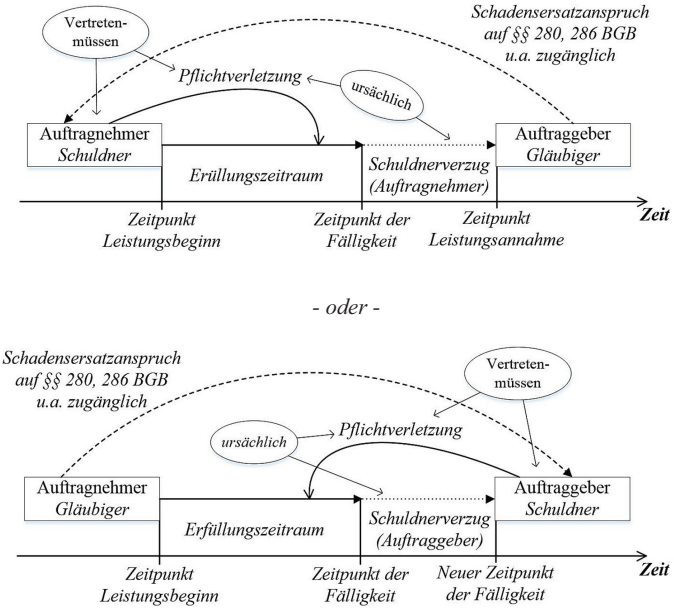


Abbildung 4-3: Schadensersatzansprüche infolge eines Schuldnerverzugs[786]

Generell muss der Auftragnehmer beim Schuldnerverzug die *rechtzeitige Erfüllung* seiner Leistungserbringung darlegen und beweisen.[787] Die Nichtannahme einer Leistung ist im *allgemeinen Schuldrecht* oftmals eine *Obliegenheitsverletzung* (siehe *Kapitel 4.1.6*), da der Gläubiger i. d. R. nicht zur Annahme der Leistung verpflichtet ist – anders verhält es sich beim Werkvertrag. Hier kann der Auftraggeber mit der Abnahmeverweigerung gleichzeitig in Annahme- und Schuldnerverzug geraten.[788]

4.1.6 Anspruch auf Entschädigung nach § 642 BGB

Die Nichtannahme i. S. d. §§ 293 ff. BGB behandelt den ***Annahmeverzug***. Der Annahmeverzug ist der Verzug des Gläubigers und wird daher auch als *Gläubigerverzug* bezeichnet. Dieser erfordert weder ein Verschulden noch eine Pflichtverletzung.[789] Voraussetzung ist eine nicht wahrgenommene ***Mitwirkung zur Annahme der Leistung***[790] seitens des Gläubigers, obwohl sie zeitgerecht und ordnungsgemäß durch den Schuldner *angeboten* wird.[791]

---

[786] Eigene Darstellung.
[787] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 20, 52.
[788] Vgl. *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 286, Rdn. 1-4; *Ernst* beschreibt, dass ein Gläubiger – bspw. der Auftraggeber – durch die Ablehnung der Abnahme in Annahme- und Schuldnerverzug geraten kann, da die Abnahme eine *echte Hauptleistungspflicht* darstellt. Vgl. *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 280, Rdn. 137.
[789] Vgl. *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 286, Rdn. 4.
[790] Im einfachsten Fall kann die Mitwirkung auch das Entgegennehmen einer Leistung sein. Es ist aber auch eine aktive Beteiligung zur Leistungsherstellung seitens des Gläubigers möglich.
[791] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 293, Rdn. 1, 4.

Der Gläubiger gerät erst in Verzug, wenn die Annahme der Leistung durchführbar gewesen wäre, so dass neben der Unmöglichkeit gem. § 275 BGB auch das Unvermögen einer ausbleibenden ***Leistungsbereitschaft*** nach § 297 BGB seitens des Schuldners auszuschließen ist.[792] Leistungsbereit zu sein bedeutet, dass der Schuldner zum Zeitpunkt seines Angebots zum Leisten imstande und bereit war.[793] Die Möglichkeiten einer angebotenen Leistung stellen sich wie folgt dar:

- ***das tatsächliche Angebot der Leistung nach § 294 BGB:*** Die Leistung muss zur richtigen Zeit (am richtigen Ort) und in der vertraglich vorgesehenen Art, Beschaffenheit, Menge und Güte dem Gläubiger – also „so, wie die Leistung zu bewirken ist" – angeboten werden, damit dieser „nur noch zugreifen" muss.[794] Der Schuldner muss bis dahin alles unternehmen, um die Mitwirkung zur Leistungs*annahme*, seitens des Gläubigers, zu ermöglichen. Der Gläubiger kann jedoch ein Angebot zur Mitwirkung ausschlagen, wenn die Leistung mit Sach- oder Rechtsmängeln behaftet ist.[795]

- ***das wörtliche Angebot der Leistung nach § 295 BGB:*** Der Gläubiger gerät in Annahmeverzug, sobald er das Angebot für eine Mitwirkungshandlung, die zur Leistungsannahme erforderlich ist, *nicht rechtzeitig wahrnimmt* oder *ganz verweigert*. Im Gegensatz zum tatsächlichen Angebot *kann* neben einem konkludenten Angebot in Form einer leistungsbereiten Präsenz das wörtliche Angebot eine Aufforderung voraussetzen und ist daher annähernd mit einer Mahnung aus § 286 BGB vergleichbar.[796] Ebenso kann sich eine Annahmeverweigerung aus einer erforderlichen, aber ausgebliebenen Mitwirkungshandlung sowie aus einem konkludenten Verhalten seitens des Gläubigers ergeben.[797] Ob die Mitwirkung des Gläubigers erforderlich war oder sein Verhalten einer konkludenten Annahmeverweigerung entspricht, kann im Wege einer Auslegung nach *Treu und Glauben* ermittelt werden.[798]

Der Eintritt eines Annahmeverzugs *ohne* Angebot ist in § 296 BGB geregelt. Die Norm setzt voraus, dass eine kalendermäßig bestimmte oder bestimmbare Mitwirkungshandlung zur Leistungsannahme durch den Gläubiger nicht rechtzeitig wahrgenommen wird. In diesem Zusammenhang wird auf § 299 BGB hingewiesen. Demnach ist ein Annahmeverzug ausgeschlossen, wenn der Zeitpunkt zur Leistungsannahme unbekannt ist. Vielmehr muss der Schuldner seine Absichten zur Leistungsannahme in angemessener Zeit ankündigen.

---

[792] Vgl. *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 293, Rdn. 1-10; *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 29-30.
[793] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 293, Rdn. 5.
[794] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 294, Rdn. 1-3; *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 294, Rdn. 1-3.
[795] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 294, Rdn. 3.
[796] Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 33; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 295, Rdn. 5; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: § 6 Abs. 6, Rdn. 3; *Retzlaff in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 642, Rdn. 32. *Kögl* weist darauf hin, dass das Prinzip eines solchen Angebots auch in einer richtig formulierten Behinderungsanzeige i. S. v. § 6 Abs. 1 VOB/B wiederzufinden ist (siehe *Kapitel 4.2.4*). Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 33, 45-49. Siehe auch Thode, ZfBR 2004: 221. In diesem Fall sollte der Schuldner genau beschreiben, welche Mitwirkungshandlung der Gläubiger zur Leistungsannahme beitragen soll. Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 33-35; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 295, Rdn. 5.
[797] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 295, Rdn. 1, 3.
[798] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 295, Rdn. 3.

Der Gläubiger trägt die Beweislast für die vorübergehende Nichtannahme, während der Schuldner die rechtzeitige Ankündigung der Leistung beweisen muss.[799] Die Zeitspanne zwischen der Ankündigung zur Annahme richtet sich nach den Umständen des Einzelfalls.[800]

Im Großen und Ganzen trifft das Gesetz „[…] *keine Unterscheidung zwischen fehlendem Willen und fehlender Möglichkeit zur Mitwirkung, sondern knüpft an die schlichte Nichtannahme oder Nichtmitwirkung an.*“[801] Der Annahmeverzug endet, „[…] *wenn sich der Gläubiger zur Annahme der Leistung bereit erklärt oder eine sonstige Mitwirkungshandlung nachholt.*“[802]

Die zuvor beschriebenen Grundlagen zum Annahmeverzug sind vornehmlich auf das allgemeine Schuldrecht ausgerichtet, bei denen es vorrangig darum geht, ob der Gläubiger die bereits fertiggestellte Leistung nach einem Angebot annimmt, z. B. die physische Entgegennahme eines Produkts. Beim Werkvertrag, insbesondere beim Bauvertrag, ist im Regelfall davon auszugehen, dass mehrere Mitwirkungshandlungen über einen längeren Zeitraum notwendig sind, damit ein Werk überhaupt erst erfolgreich abgeschlossen werden kann. Hierfür ergänzen die Regeln des Werkvertragsrechts mit § 642 BGB die allgemeinen Regelungen des Schuldrechts nach §§ 293 ff. BGB, um den Annahmeverzug des Auftraggebers *während des Herstellungsprozesses* berücksichtigen zu können.[803] Die Norm greift, wenn der Auftraggeber den Herstellungsprozess durch fehlerhaftes Tun oder Unterlassen, bspw. durch eine nicht rechtzeitig durchgeführte Mitwirkungshandlung, hemmt oder unterbricht.[804]

In der Baupraxis ist der Auftragnehmer vor allem bei komplexen Bauvorhaben auf die zeitgerechte Mitwirkung seines Auftraggebers angewiesen. Mitwirkungshandlungen können als vertragliche Verpflichtung vereinbart werden oder sich aus dem Vertragszweck ergeben. Aufgrund der fehlenden Vereinbarung sind letztere aber *keine* Leistungsverpflichtungen. Darum werden sie teilweise[805] *nicht* als Pflichten, sondern als ***Obliegenheiten*** angesehen.[806]

Eine Obliegenheit ist im allgemeinen Rechtssinn eine notwendige, aber keine Vertragspflicht im Sinne einer vertragsgemäßen Verbindlichkeit für ein bestimmtes Handeln oder Unterlassen, um ein *eigenes* oder *gemeinsames Ziel* im Schuldverhältnis zu erreichen. Nicht

---

[799] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 299, Rdn. 3.
[800] Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 39.
[801] *Dötterl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 293, Rdn. 27.
[802] *Lorenz in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 293, Rdn. 14.
[803] Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 29.
[804] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: § 6 Abs. 6, Rdn. 3; *Retzlaff in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 642, Rdn. 43-54.
[805] Vgl. *Kögl in* BeckOGK, St. 0.1.07.2018: BGB § 642, Rdn. 6-11; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1274 ff., Fn. 1430. Eine klare Abgrenzung zwischen *Pflicht* und *Obliegenheit* ist bei Bauprojekten umstritten, da der Auftraggeber i. d. R. viele verschiedene Mitwirkungshandlungen im Sinne einer *Obliegenheit* für den Baufortschritt unternimmt, die wiederum seine eigenen Leistungspflichten (insbesondere Abnahme und Vergütung) beeinflussen können. Zudem bleibt die Unterlassung einer Obliegenheit nicht rechtsfolgenlos. Vgl. Sonntag, NZBau 2017: 528. Somit nimmt der Auftraggeber die Rolle des Schuldners ein. Sehr ausführlich: Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rd. 1274-1275. Gegenposition: Peters, NZBau 2011: 641-642; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Fn. 1429. Häufig wird darauf hingewiesen, dass der Einzelfall für eine Differenzierung anhand der Vertragsunterlagen maßgeblich ist. Weiteres in *Kapitel 4.1.1.*
[806] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 293, Rdn. 11.

wahrgenommene Obliegenheiten richten sich oft gegen die eigenen Interessen derjenigen Person, die sie verletzt. Entsprechend darf eine obliegende Mitwirkungshandlung in angemessener Weise vorgenommen werden. Beispielsweise obliegt es dem Auftragnehmer, welches Personal er für seine Zielerreichung im Bauprojekt einsetzt, damit er den Werkerfolg zügig herbeiführt. Dagegen obliegt es dem Auftraggeber, wie er die Vorgewerke des Auftragnehmers koordiniert, damit diese zeitnah mit ihren Ausführungsarbeiten beginnen können. Im Gegensatz zur Wahrnehmung eines vertraglich vereinbarten Bemusterungstermins ist daher die „genaue" Koordinierung der Vorgewerke *keine* auftraggeberseitige Pflicht, die sich aus dem direkten Schuldverhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer ergibt.

Folglich ist der Auftraggeber nur zu einer bestimmten Mitwirkungshandlung verpflichtet, wenn sie ausdrücklich im Vertragsverhältnis vereinbart wird.[807] Die auftraggeberseitige Nichteinhaltung einer Obliegenheit kann zum Verlust der eigenen Rechte führen.[808] Gleichzeitig werden dem Auftragnehmer ***Entschädigungsansprüche*** aus § 642 BGB über die Dauer des Verzugs gewährt, wenn dieser Nachteile durch die ausgebliebene Mitwirkung erleidet. Der Entschädigungsanspruch ist eine Aufwandsentschädigung für die vergebliche Vorhaltung zeitabhängiger Produktionsmittel, die dem Schuldner während des Annahmeverzugs zusätzlich entstanden sind. Strittig ist die Frage, ob die Dauer des Verzugs entweder der Zeitraum der ausbleibenden Mitwirkung oder die verspätete Annahme der Leistung darstellt.[809]

Die Höhe des Entschädigungsanspruchs ist in § 642 Abs. 2 BGB geregelt. Maßgeblich sind die Dauer des Verzugs und die Höhe der ursprünglich geplanten Vergütung. Nach allgemeiner (und teilweise umstrittener) Rechtspraxis wurden bisher Wagnis und Gewinn herausgerechnet. In einem jüngeren Urteil betont aber der *BGH*, dass die „Höhe der vereinbarten Vergütung" den „[…] *enthaltenen Anteil für Gewinn, Wagnis und Allgemeine Geschäftskosten einschließen kann*."[810] Zudem legt er den Entschädigungsanspruch auf die Dauer des Verzugs aus und geht damit auf den Wortlaut der Rechtsnorm ein.[811] Unter der Verzugsdauer wird etwa die *ausbleibende* Mitwirkungshandlung verstanden, die bis zur tatsächlichen Durchführung andauert. Eine anschließende Bauzeitverlängerung, z. B. aus Sekundärverzögerungen, zählt nicht zur Verzugsdauer. Die Entscheidung des Senats ist jedoch umstritten. Nicht nur *Genschow und Stelter* waren bereits vor diesem Urteil der Ansicht, dass eine „angemessene Entschädigung"[812] nur für den Zeitraum der gesamten Verzögerungsdauer möglich sein dürfte, da sich die wesentlichen Kosten i. d. R. aus Folgewirkungen ergeben.[813] Es ist ohnehin fraglich, wie die Verzugsdauer bei einer gehemmten

[807] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 871-872.
[808] Vgl. *Retzlaff in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 642, Rdn. 9.
[809] Vgl. Sonntag, NZBau 2017: 525; Genschow/Stelter, 2013: S. 47-48.
[810] BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751. Weiter heißt es: „*Hiervon zu unterscheiden ist der nicht vom Anspruch gem. BGB umfasste anderweitig „entgangene Gewinn", der nur im Rahmen eines Schadensersatzanspruchs erstattet verlangt werden kann* […]". BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751.
[811] Vgl. BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751.
[812] Wortlaut von § 642 Abs. 1 BGB.
[813] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 48. Siehe auch Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 753-770. Diese Frage wird sehr intensiv von *Sonntag* durchleuchtet und soll nicht weiter vertieft werden. Sonntag, NZBau 2017: 526 ff.

Vorunternehmerleistung sinnvoll abzugrenzen ist,[814] besonders wenn sich die Ausführungsprozesse aus mehreren *kontinuierlich andauernden Folgewirkungen* zusammensetzen und ggf. mit anderen Einwirkungen überlagern (siehe *Abbildung 2-10*). Naturgemäß erstreckt sich eine daraus ableitbare Vorgangsdauer *nicht* über einen abgesteckten Zeitraum.

Grundsätzlich trägt der Auftragnehmer die Beweis- und Darlegungslast für einen Anspruch auf Entschädigung.[815] Er muss die Umstände für den Eintritt des Annahmeverzugs sowie dessen Dauer ebenfalls durch einen Kausalitätsnachweis beweisen.[816] Zwar hat er nicht wie beim Schadensersatz ein Mitverschulden gem. §§ 242, 254 BGB zu berücksichtigen, „[…] *weil es sich bei § 642 BGB nicht um einen Schadensersatzanspruch, sondern um einen vertraglichen Anspruch eigener Art handelt* […].“[817] Dennoch weisen *Vygen und Joussen* darauf hin, dass bei einem Anspruch aus § 642 BGB eine entsprechende Kürzung im Sinne des § 254 BGB stattfinden kann.[818] Die Zusammenhänge des Annahmeverzugs und einen daraus ableitbaren Entschädigungsanspruch verdeutlicht *Abbildung 4-4*.

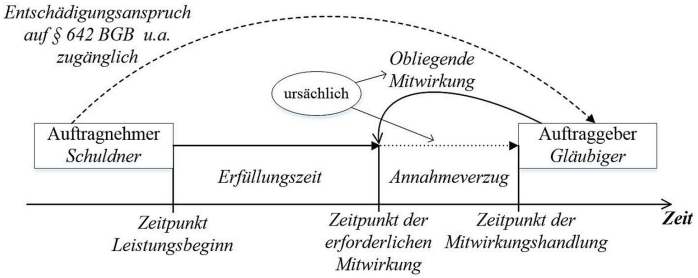


Abbildung 4-4: Prinzip des Entschädigungsanspruchs infolge eines Annahmeverzugs[819]

Neben § 642 BGB kann der Auftragnehmer zusätzlich den Ersatz von Mehraufwendungen über § 304 BGB fordern. Mehraufwendungen sind u. a. Mahn-, Transport-, Aufbewahrungs- und Erhaltungskosten.[820] Auf Kostenfragen soll hier nicht weiter eingegangen werden.

[814] *Retzlaff* meint: „*Nicht eindeutig vom BGH geklärt sind hingegen die „Verlangsamungsfälle“, in denen der Mitwirkungsverzug des Bestellers nicht zum Stillstand der Bauarbeiten führt, diese aber langsamer fortschreiten, wodurch die Produktionsmittel des Unternehmers länger auf der Baustelle gebunden sind*.“ *Retzlaff in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 642, Rdn. 63.

[815] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 302.

[816] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 302, 318.

[817] OLG München, Beschluss vom 02.09.2014 – Az. 27 U 2924/14 Bau, IBRRS 2017: 401. Nachfolgend: BGH, Beschluss vom 19.07.2017 – Az. VII ZR 297/14, IBRRS 2017: 4000 (Nichtzulassungsbeschwerde zurückgewiesen).

[818] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 858-859. Siehe auch *Kapitel 4.4.2* und *Kapitel 4.4.3*.

[819] Eigene Darstellung.

[820] Vgl. *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 304, Rdn. 1.

4.1.7 Vertragsstrafen nach §§ 339 ff. BGB

Die vorausgegangenen Betrachtungen liefern einen Überblick zur rechtlichen Einordnung von Leistungsverzögerungen über BGB-Werkverträge. Jedoch hat der Auftraggeber nach dem Werkvertragsrecht „[…] *grundsätzlich keine Rechte, um auf den laufenden Prozess der Herstellung des geschuldeten Werkes Einfluss zu nehmen*."[821] Allerdings kann er das Verhalten seines Vertragspartners lenken, indem er Zwischenziele befristet und diese bei Nichteinhaltung mit einer ***Vertragsstrafe*** hinterlegt. Diese muss eindeutig und einvernehmlich mit einer Vertragsfrist festgehalten werden. Hierbei sollte die Höhe der Vertragsstrafe maximal *0,3 %* je Werktag, bezogen auf die Auftrags- bzw. Abrechnungssumme, betragen und darf insgesamt die Obergrenze von maximal *5,0 %* der Auftragssumme nicht überschreiten.[822] Ein Gläubiger hat Anspruch auf eine Vertragsstrafe, wenn sie entsprechend wirksam vereinbart wird. Sie fällt an (im Sprachgebrauch „verwirkt"), wenn der Fälligkeitstermin infolge eines auftragnehmerseitigen Verzugs schuldhaft überschritten wird. Eine Vertragsstrafe kann gegenstandslos werden, falls der Bauzeitenplan inhaltlich oder aufgrund von Störungen, die der Auftragnehmer nicht zu vertreten hat, komplett umgeworfen wird.[823]

4.1.8 Das neue Bauvertragsrecht 2018

Im Zuge der Reform des Werkvertragsrechts vom 01.01.2018 wurde das Werkvertragsrecht um den ***Bauvertrag*** – das *Kapitel 2* (§§ 650a-h BGB) – erweitert. Derzeit bestehen viele unterschiedliche Meinungen in der einschlägigen Fachliteratur, wie sich die neuen Rechtsnormen auslegen lassen. Jedoch fehlen bisher *richtungsweisende Urteile*[824], so dass die verschiedenen Ansichten teilweise (noch) breit aufgestellt sind. Aus diesem Grund folgt im nachstehenden Text eine kurz angerissene Auswahl der einzelnen Neuerungen, die hinsichtlich der Bewertung von Verzugsansprüchen bedeutsam sind. Einige Punkte werden diskutiert.

Nachdem in § 650a BGB eine Definition zum Bauvertrag stattfindet, werden dem Auftraggeber in der darauf folgenden Norm § 650b BGB Anordnungsrechte zur Änderung eines weiteren Leistungsinhalts eingeräumt. In § 650b Abs. 1 BGB wird zwischen zwei Änderungsbegehren des Auftraggebers (bzw. Bestellers) unterschieden:

- Nr. 1: eine Änderung des *vereinbarten* Werkerfolgs (§ 631 Abs. 2 BGB) oder
- Nr. 2: eine *notwendige* Änderung *zur Erreichung* des vereinbarten Werkerfolgs.

Die Regelungen des § 650b BGB sehen es – entgegen dem derzeitigen Rechtsverständnis zu den Anordnungsrechten gem. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B – ausdrücklich vor, dass die Leistungsänderungen zwischen den Vertragsparteien einvernehmlich geregelt werden.[825] *Leinemann* weist darauf hin, dass dieses Einigungsmodell auf die Änderungsanordnung und Vergütung abzielt.[826]

---

[821] *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 5 Abs. 3, Rdn. 1.
[822] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 124-125.
[823] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 142.
[824] Laut *Weise* werden die Entscheidungen ggf. erst in den nächsten zehn Jahren vorliegen. Vgl. Weise, NJW-Spezial 2018a: 301.
[825] Vgl. Weise, NJW-Spezial 2017: 492 ff.
[826] Vgl. Leinemann, NJW 2017: 3115.

Der Unternehmer ist verpflichtet, vor der angeordneten Leistungserbringung ein Angebot über die Mehr- oder Mindervergütung zu erstellen, solange ihm die dafür erforderlichen Pläne zugänglich sind. Allerdings kann der Auftragnehmer die Anordnung gem. § 650b Abs. 1 Nr. 1 BGB ausschlagen, sobald die damit verbundene Ausführung für ihn *unzumutbar* ist. Dies wäre der Fall, wenn nicht notwendige Änderungsleistungen angeordnet werden. Nach § 650b Abs. 1 Nr. 2 BGB kann der Auftragnehmer aber keine Änderungsanordnung ausschlagen, wenn die dafür erforderliche Ausführung zumutbar sein sollte. Hierfür trägt der Auftragnehmer, im Gegensatz zu außerbetrieblichen Gründen, die Beweislast für eine betriebsinterne Unzumutbarkeit, worunter etwa Personaldispositionen fallen.[827]

Sollte keine Einigung innerhalb von *30 Tagen* zustande kommen, ist eine einseitige Änderungsanordnung *in Textform* durch den Auftraggeber möglich.[828] Ob und inwieweit die *30 Tage* bei einer ausbleibenden Einigung im Sinne einer *auftragnehmerseitigen Behinderung*[829] zu werten sind, ist noch durch die Rechtsprechung zu klären.[830] *Kandel* weist darauf hin, dass die 30-Tage-Regelung als „Höchstfrist" zu deuten ist.[831] Nach Auffassung von *Weise* wird in diesem Zusammenhang der Grundsatz von *Treu und Glauben* § 242 BGB vermutlich eine tragende Rolle einnehmen.[832]

In § 650c BGB sind die mit der Anordnung verbundenen Vergütungsanpassungen geregelt. In § 650c Abs. 1 BGB wird von der Preisfortschreibung auf Basis der *Urkalkulation* abgewichen. Somit *kann* der Auftragnehmer ***tatsächlich erforderliche Kosten*** zuzüglich angemessener Zuschläge abrechnen. Anderenfalls ist es ihm möglich, nach § 650c Abs. 2 BGB die Preisbildung der Urkalkulation zu nutzen. Gemäß § 650c Abs. 2 BGB wird *vermutet*, dass die Urkalkulation Angaben über den *vermehrten* oder *verminderten Aufwand* der *tatsächlich erforderlichen Kosten* enthält.

In Fachkreisen wird bereits diskutiert, wann welche der beiden Regelungen greift. Zudem ist fraglich, was *tatsächlich erforderliche Kosten* sind. Möglicherweise wollte der Gesetzgeber hiermit ein „Anpassungswerkzeug" bereitstellen, um eine gewisse Realitätsnähe im Falle von Unstimmigkeiten berücksichtigen zu können. Sollte dies zutreffen, könnte auf die BIM-basierte Bauablaufsimulation zukünftig eine besondere Bedeutung zukommen (die Gründe werden in *Kapitel 4.5* genannt).

Dem Auftragnehmer wird nach derzeitiger Meinung ein ***Wahlrecht*** eingeräumt.[833] *Kandel* beschreibt, „[…] *dass die Nachtragsvergütung grundsätzlich auf der Basis der tatsächlichen Kosten zu ermitteln ist, während die Urkalkulation im Ergebnis nur eine Darlegungs-Beweiserleichterung für den Auftragnehmer darstellt. Der Auftragnehmer kann, muss allerdings nicht auf die Urkalkulation abstellen; tut er dieses, ist es* ***Aufgabe des Auftraggebers****, die* ***Vermutung*** *des § 650c Abs. 2 BGB zu erschüttern, indem er belegt, dass*

[827] Vgl. Leinemann, NJW 2017: 3115.
[828] Vgl. Weise, NJW-Spezial 2017: 492.
[829] Siehe *Kapitel 2.4.3*.
[830] Vgl. Weise, NJW-Spezial 2017: 492; Putzier, NZBau 2018: 131-134.
[831] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2, Rdn. 45. *Leinemann* weist darauf hin, dass der Zeitrahmen von *30 Tagen* als zu lang empfunden werden könnte. Einer AGB-wirksamen Verkürzung sei aber nicht zuzustimmen. Vgl. Leinemann, NJW 2017: 3116.
[832] Vgl. Weise, NJW-Spezial 2017: 492.
[833] Vgl. Leinemann, NJW 2017: 3116; Becker, 2017: S. 7-8; *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB 650c, Rdn. 10.

die Vergütungsermittlung nach § 650c Abs. 1 BGB zu einem abweichenden Ergebnis führt."[834] Damit wird die sog. *Korbion'sche Regel*: *guter Preis bleibt guter Preis – schlechter Preis bleibt schlechter Preis* weitestgehend durchbrochen.

Dennoch sollte die Rechtsprechung abgewartet werden, welche Voraussetzungen der Auftraggeber für eine Beweislastumkehr erbringen muss, damit er die in § 650c BGB genannte „Richtigkeitsvermutung"[835] widerlegen kann. In jedem Fall wird er nicht aus der Sicht des Auftragnehmers argumentieren können, weshalb die Plausibilisierung der Produktionsprozesse für den Nachweis fragwürdig erscheint.[836] *Kandel* weist u. a. darauf hin, dass beim Ausbleiben einer einvernehmlichen Einigung die Möglichkeit eines Preisbestimmungsverfahrens nicht auszuschließen ist.[837]

Fraglich ist derzeit, ob die Anordnungsrechte des BGB mit den Anordnungsrechten der VOB/B konform sind oder sich widersprechen. Einige Meinungen schließen eine komplette Unwirksamkeit der in *Kapitel 4.2.6* beschriebenen VOB-Klauseln nach § 2 Abs. 5, 6 VOB/B aus, […] *weil diese Klauseln keine abweichende Preisbildungsmethode vorschreiben*."[838] Laut *Kandel* widersprechen die Regelungen gem. §§ 650b, 650c BGB *nicht* den Regelungen der §§ 1, 2 VOB/B.[839] *Von Rinteln* äußert, dass […] *die Reichweite der beiden Änderungsrechte trotz der Unterschiede im Wortlaut im Wesentlichen gleich* [ist]."[840] *Weise* schreibt, dass die VOB/B ein „Anordnungsmodell" und der neue Bauvertrag ein „Konsensmodell" vorsieht.[841] Aus diesem Grund verstoßen „[…] *diese Bestimmungen der VOB/B gegen das BGB und sind unwirksam*."[842] *Ehrl* kritisiert: „*Dass diese Neuregelungen ein hohes Konfliktpotential bilden, etwa zur Auslegung des vertraglich geschuldeten Werkerfolges, zur Zumutbarkeit der durch den Besteller angeordneten Änderung für den Unternehmer oder zur Preisfindung, liegt auf der Hand*."[843]

Für jene Fälle, bei denen das Kooperationsgebot versagt, umfasst das neue Bauvertragsrecht eine ***einstweilige Verfügung*** gem. § 650d BGB. Sie wird für Streitigkeiten zwischen den Vertragspartnern nach Beginn der Bauausführungen vorgesehen. Die einstweilige Verfügung ist anwendbar bei Unstimmigkeiten aus §§ 650b, 650c BGB.

Verfügungstitel sollen Entscheidungen erleichtern und diese im Zuge eines Eilverfahrens beschleunigen.[844] Um einen Verfügungstitel zu erhalten, ist es nicht erforderlich, dass das Vorliegen eines Verfügungsgrunds im Sinne eines Klageverfahrens schlüssig dargelegt wird. Demnach kann auf ein Sachverständigengutachten zur Glaubhaftmachung verzichtet

[834] *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2, Rdn. 15.
[835] Vorsichtig formuliert!
[836] Wobei das *OLG Köln* bereits in einem Urteil eine auftraggeberseitige konkrete bauablaufbezogene Darstellung für den Nachweis von Schadensersatzansprüchen aus verspäteten *Planungsleistungen* forderte. Vgl. OLG Köln, Urteil vom 31.05.2017 – Az. 16 U 98/16, IBRRS 2017: 2535.
[837] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2, Rdn. 38.
[838] *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2, Rdn. 40; Leinemann, NJW 2017: 3117.
[839] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2 Abs. 5, Rdn. 9b, 36.
[840] *von Rinteln in* Messerschmidt/Voit, 2018: BGB § 650b, Rdn. 10.
[841] Vgl. Weise, NJW-Spezial 2018a: 300. Ebenso: *Merkle in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 631 Rdn. 402.
[842] Weise, NJW-Spezial 2018a: 300. Siehe vorkalkulatorische Preisfortschreibung: Weise, NJW-Spezial 2018b: 492-493.
[843] Ehrl, DStR 2017, 2395.
[844] Vgl. Becker, 2017: S. 7.

werden,[845] was allein aus Zeitgründen in besonders strittigen Fällen ohnehin wohl kaum durchführbar wäre. Folglich wird das zuständige Gericht eine „ad hoc“[846]-Entscheidung fällen müssen, damit möglichst ein Baustillstand vermieden wird. Überspitzt formuliert kann davon ausgegangen werden, dass die Gerichte die Verfügungstitel flüchtig beschließen, da sie aufgrund des Zeitmangels sich eher weniger tief mit den doch oftmals komplexen Streitgegenständen auseinandersetzen können. *Leinemann* erwartet „[…] *eine Reihe von Bauprozessen mit einstweiligen Verfügungsverfahren* […]“[847], die demnächst von den Gerichten bewältigt werden.

Möglicherweise eignen sich einstweilige Verfügungen nur für kleine Nachträge, die mit „überschaubaren Kosten“ verbunden sind. *Meurer* weist bereits darauf hin, dass eine einstweilige Verfügung verhältnismäßig teuer sein kann und die beteiligten Richter bestenfalls eine summarische Prüfung durchführen, weshalb die besonders strittigen Rechtsfragen voraussichtlich in ein Hauptverfahren münden.[848] *Leupertz* hält es für denkbar, dass eine „[…] *Flut von Eilverfahren auch zu solchen Streitpunkten führen, die nicht dem Eilbedürftigkeitspostulat der Bauablauf- und Liquiditätssicherung unterliegen*.“[849] Letztendlich werden klagende Auftragnehmer bei Komplexfragen nicht um die Darlegung der Kausalität herumkommen. Vorteile der einstweiligen Verfügung bestehen ggf. darin, dass nachfolgende Gewerke weniger durch Uneinigkeiten blockiert werden, da ein Verfügungstitel den Auftragnehmer zum Weiterarbeiten und den Auftraggeber zur Erfüllung seiner Mitwirkungshandlungen bewegen könnte.

Die VOB/B wird trotz der Reform des Werkvertragsrechts weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Für öffentliche Auftraggeber gelten die Regelungen aus § 8a VOB/A sowie § 8a VOB/B EU mit der daraus resultierenden Einbeziehung der VOB/B inkl. VOB/C.

4.2 Auftragnehmerseitige Ansprüche nach der VOB/B

Während der Auftraggeber seine Schadensersatzansprüche nach § 6 Abs. 6 VOB/B bzw. §§ 280, 286 BGB oder die Auszahlung von Vertragsstrafenregelungen nach § 11 VOB/B durch den Beweis des auftragnehmerseitigen Schuldnerverzugs fordern kann,[850] obliegt es dem Auftragnehmer, anhand seines Produktionsablaufs die prozessualen Ansprüche des Auftraggebers abzuwehren und/oder eigene Ansprüche zu erheben. Da bei der Überschreitung einer Vertragsfrist gem. § 286 Abs. 4 BGB ein Verschulden beim

[845] Vgl. Becker, 2017: S. 7.

[846] Problemlösung bzw. Entscheidungsfindung, die aus einer Situation heraus getroffen wird. Sprachliche Bedeutung: Zu diesem Zweck (deutsch: „zu diesem“).

[847] Leinemann, NJW 2017: 3118.

[848] Vgl. Meurer, St. 06.06.2017: S. 5. *Leinemann* vertritt demgegenüber eine diametrale Meinung: Leinemann, NJW 2017: 3119.

[849] *Leupertz in* Messerschmidt/Voit, 2018: BGB § 650d, Rdn. 3.

[850] Für die Beweisführung muss der Auftraggeber die haftungsbegründende Kausalität gem. § 286 ZPO nachweisen können. Für diesen Nachweis reicht der Vortrag über die Nichteinhaltung einer zuvor vereinbarten Vertragsfrist und die davon betroffenen „Schadenspositionen“, wie z. B. Mietausfälle, aus. Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 80. Siehe auch *Lorenz in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 286, Rdn. 82-84. Bei einer nicht eingehaltenen Vertragsfrist wird der Fälligkeitszeitpunkt überschritten, wodurch ein *Verschulden* seitens des Auftragnehmers *vermutet* wird. Im Streitfall obliegt es dem Auftragnehmer sich der Vermutung zu entledigen. Dafür hat er konkrete Tatsachen auf Basis eines *produktionsorientierten* Bauablaufmodells vorzutragen. Siehe *Kapitel 3.3.3* und *Kapitel 4.1.5*.

Auftragnehmer *vermutet* wird,[851] liegt die Darlegungs- und Beweislast über eine strittige Bauablaufstörung i. d. R. beim Auftragnehmer. Auch zur Nachweisführung eigener Ansprüche (neben der Leistung) ist der Auftragnehmer darlegungs- und beweispflichtig. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Sicht des Auftragnehmers näher eingegangen.

Obwohl Ansprüche des Auftragnehmers aufgrund von Bauzeitverlängerungen betrachtet werden, betreffen die folgenden Punkte ebenfalls den Auftraggeber. Im Großen und Ganzen kann die vorliegende Arbeit zur wechselseitigen Beweisführungs- und Darlegungslast in einem Parteivorbringen zwischen Kläger und Beklagtem hilfreiche Anhaltspunkte liefern.

4.2.1 Fristen-Regelungen der VOB/B

Die Regelungen in § 5 VOB/B konkretisieren die Leistungszeit gem. § 271 BGB für die Ausführung von Bauleistungen. Wie in *Kapitel 3.3.2* vorgestellt, umfasst die VOB verschiedene *Fristen* bzw. *Termine*, um Bauleistungen zeitlich gliedern zu können. Zum Beispiel ist es gegenüber der Leistungszeit i. S. v. § 271 BGB möglich, dass der Zeitpunkt einer fälligen Bauleistung mithilfe einer Vertragsfrist gem. § 5 Abs. 1, 2 VOB/B zu einem *Ausführungsbeginn* oder zu einem *Zwischentermin* ausdrücklich vereinbart werden kann.[852]

§ 5 Abs. 1 VOB/B enthält eine Definition zu *Kontroll-* sowie *Vertragsfristen*. Darüber hinaus wird der Auftragnehmer angehalten, sich anhand der Vertragsfristen zu orientieren, indem er seine Bauleistungen entsprechend beginnt, angemessen fördert und vollendet. *Vertragsfristen* sind *verbindliche Fristen*, die bei einer schuldhaften Überschreitung schadensersatzrechtliche Ansprüche über § 6 Abs. 6 Satz 1 VOB/B i. S. v. §§ 280, 286 BGB gegenüber dem Auftragnehmer auslösen können.[853] Die in *Kapitel 3.3.2* vorgestellten *Kontrollfristen* tragen im Wesentlichen dazu bei, dass Zwischenstände des Bauablaufs ermittelbar werden, damit bspw. der Auftraggeber von seinem *Abhilferecht* gem. § 5 Abs. 3 VOB/B Gebrauch macht.[854] Kontrollfristen können bei einer späteren Anspruchsbehauptung hilfreich sein, wenn gezeigt werden soll, dass der Auftragnehmer die Ausführung angemessen förderte oder einen drohenden Verzug verhindern konnte.[855] Prinzipiell besitzt der Auftragnehmer während seiner Ausführungsarbeiten ein Dispositionsrecht gem. § 4 Abs. 2 Nr. 1 VOB/B, das es ihm erlaubt, seine Aufgaben unter eigener Verantwortung im Rahmen der vorliegenden Vertragsfristen zweckmäßig zu gestalten und voranzubringen.[856]

§ 5 Abs. 2 VOB/B konkretisiert den Fall für nicht vereinbarte Fristen zum Leistungsbeginn. Demnach muss der Auftragnehmer innerhalb von zwölf Werktagen nach Aufforderung des Auftraggebers mit seinen Ausführungen beginnen. Im Gegenzug hat der Auftragnehmer den Beginn seiner Ausführungen dem Auftraggeber anzuzeigen. *Vygen und Joussen* weisen

---

[851] Siehe *Kapitel 4.1.5*.
[852] Vgl. Reister, 2014: S. 41; *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 15-16. Siehe *Kapitel 4.1.3*.
[853] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 247; *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 14-17. Siehe *Kapitel 4.1.5.*
[854] Vgl. *Schneider in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/A § 9, Rdn. 14, 16.
[855] Vgl. *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 5, Rdn. 14; *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 5 Rdn. 85-91.
[856] Vgl. Schiffers, 1998: S. 286; *Fuchs in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 4 Abs. 2; *Althaus in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 5 Abs. 3, Rdn. 3 *und* § 5 Abs. 4, Rdn. 3-19.

darauf hin, dass eine *Vorlauffrist*[857] von zwölf Werktagen eine Ausprägung von *Treu und Glauben* ist, die auch bei BGB-Werkverträgen im Zuge einer Vertragsauslegung als „branchenüblich" angesehen wird.[858] Falls diese Vorlauffrist unzureichend erscheint, ermöglicht § 5 Abs. 2 Nr. 1 VOB/B ein Abrufrecht des Auftragnehmers zum voraussichtlichen Ausführungsbeginn.

§ 5 Abs. 3 VOB/B gewährt dem Auftraggeber ein Abhilferecht gegenüber dem Auftragnehmer. So hat der Auftragnehmer unverzüglich Abhilfe auf Verlangen zu schaffen, wenn Arbeitskräfte, Geräte, Gerüste, Baustoffe oder Bauteile unzureichend erscheinen, so dass die geplanten Ausführungsfristen – also *Kontroll-* sowie *Vertragsfristen* – offenbar nicht eingehalten werden können. Im Rahmen dieser Abhilfe darf sich der Auftragnehmer auf sein Dispositionsrecht gem. § 4 Abs. 2 Nr. 1 VOB/B berufen.[859]

Kommt der Auftragnehmer seinen Verpflichtungen gem. § 5 Abs. 1-3 VOB/B nicht nach und gerät mit der Vollendung seiner Arbeiten in Verzug, kann der Auftraggeber über § 5 Abs. 4 VOB/B Schadensersatz gem. § 6 Abs. 6 VOB/B i. S. d. §§ 280, 286 BGB fordern oder nach fruchtlosem Ablauf der Frist von seinem Kündigungsrecht Gebrauch machen.

4.2.2 Bauablaufstörung, Leistungsverzögerung, Behinderung und Unterbrechung

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden *Bauablaufstörungen* und *Leistungsverzögerungen* vorgestellt. Die Bauablaufstörung ist ein baubetrieblicher Begriff, der weitestgehend mit dem systemtheoretischen Störungsbegriff vergleichbar ist. Eine *Leistungsverzögerung* ist hingegen ein juristischer Begriff, der auf den Verzug bzw. die verspätete Leistungsannahme abzielt.

Eine *Bauzeitverlängerung* beruht auf eine tatsächlich eingetretene *Bauzeitverzögerung*, die infolge einer Bauablaufstörung entsteht und (zunächst) nichts mit einer *Fristverlängerung* zu tun hat. Vielmehr handelt es sich um einen zusätzlichen zeitlichen Mehrbedarf, der zur produktionsorientierten Leistungserfüllung erforderlich geworden ist.[860] Die Bezeichnungen *Behinderung* und *Unterbrechung* sind dagegen baurechtliche Begriffe aus § 6 VOB/B.

Ihren Ursprung hat eine ***Behinderung*** gem. dem Wortlaut aus § 6 Abs. 1, Satz 1 VOB/B, wonach der Auftragnehmer dem Auftraggeber schriftlich anzeigen muss, sobald er sich in seiner ordnungsgemäßen Ausführung der Leistung *behindert* glaubt. Weiter heißt es in § 6 Abs. 1, Satz 2 VOB/B: „*Unterlässt er die Anzeige, so hat er nur dann Anspruch auf Berücksichtigung der hindernden Umstände, wenn dem Auftraggeber offenkundig die Tatsache und deren hindernde Wirkung bekannt waren.*"

Die VOB/B benennt *hindernde Wirkungen*, die mit Wirkungen einer Bauablaufstörung vergleichbar sind. Diese zielen im Wesentlichen auf eine Verzögerung der auftragnehmer-

[857] Dies sind keine *Vorlauffristen* gem. § 6 Abs. 4 VOB/B, die während einer Fristfortschreibung eingerechnet werden können.
[858] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 52.
[859] Vgl. *Sacher in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B, § 5 Rdn. 78.
[860] Siehe *Kapitel 4.3*.

seitigen *Produktionsprozesse* ab, woraus dieser Forderungsrechte mit *zeitlichen* und/oder *finanziellen* ***Rechtsfolgen*** ableiten kann.[861]

Eine Behinderung setzt die Kenntnisnahme des Auftraggebers i. S. v. § 6 Abs. 1 VOB/B über eine vorhandene Bauablaufstörung voraus.[862] Des Weiteren ist eine Bauablaufstörung erst dann eine Behinderung, wenn sie gem. § 6 Abs. 2 VOB/B aus folgenden unterschiedlichen Gründen entstanden ist:

- einem Umstand aus dem Risikobereich des Auftraggebers;
- einem Streik oder einer von der Berufsvertretung der Arbeitgeber angeordnete Aussperrung im Betrieb des Auftragnehmers oder in einem unmittelbar für ihn arbeitenden Betrieb;
- höherer Gewalt oder anderen für den Auftragnehmer unabwendbaren Umständen;
- Witterungseinflüssen, mit denen der Auftragnehmer bei Angebotsabgabe normalerweise nicht rechnen konnte.

Demzufolge dürfen die Entstehungsgründe einer Behinderung *nicht im Risikobereich des Auftragnehmers* liegen,[863] damit die Tatbestandsvoraussetzungen i. S. v. § 6 Abs. 2 VOB/B erfüllt sind.

Wie beim BGB-Werkvertrag kann der Auftragnehmer Schadensersatzansprüche verlangen, wenn eine Behinderung aus einem vertragswidrigen Verhalten des Auftraggebers resultiert.[864] Im Gegensatz zum Schadensrecht kommt es bei der Bewertung einer Behinderung nicht zwangsläufig auf eine vom Auftraggeber schuldhaft verletzte Vertragspflicht an.[865] Stattdessen ist objektiv zwischen verschiedenen Zurechnungskriterien gem. § 6 Abs. 2 VOB/B zu differenzieren.[866] So kann eine vom Auftraggeber unverschuldete Verzögerung des Produktionsprozesses zu einer auftragnehmerseitigen Behinderung führen. Dies ist der Fall, wenn durch eine auftraggeberseitige Anordnung gem. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B durch einen auftraggeberseitigen Annahmeverzug gem. § 642 BGB oder durch eine Mengenabweichung i. S. v. § 2 Abs. 3 VOB/B[867] etc. eine Behinderung entstanden ist, deren hindernde Umstände allesamt als *unverschuldet* oder *vertragskonform* anzusehen sind.[868]

---

[861] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6 Rdn. 2; *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: VOB-Kommentar/Berger § 6 Abs. 1, Rdn. 32 ff.; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 6-7.

[862] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 11-14 i. V. m. BGH, Urteil vom 14.01.1999 – Az. VII ZR 73/98, IBRRS 2000: 0695.

[863] Zum Beispiel: Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1355. Weitere Beispiele sind in Leistungsverzögerungen aufgrund von Baumängeln oder sonstigen Schlechtleistungen zu finden.

[864] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6 Rdn. 1, 48.

[865] Zum Beispiel: *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 33; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 59-64; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30-39; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 1-6.

[866] Zum Beispiel: *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 34-36.

[867] Vorausgesetzt, die Mengenermittlung wurde vom Auftraggeber durchgeführt. Hier können auch Mengenmehrungen innerhalb der *10-%-Toleranzgrenze* i. S. v. § 2 Abs. 3 VOB/B zu einer auftragnehmerseitigen Behinderung führen. Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30.

[868] Vgl. Thode, ZfBR 2004: 215 ff. *Sonntag* stellt hierzu eine detailliertere Ausführung vor. Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30. Siehe auch *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6, Rdn. 1-12.

Ferner können auch „neutrale“ Einwirkungen auf den Bauablauf, z. B. außergewöhnliche Witterungsereignisse, ursächlich für eine Behinderung sein.[869] Mehrkosten, die dadurch entstehen, begründen keine finanziellen Ansprüche gegenüber dem Vertragspartner und müssen daher von jeder Vertragspartei selbst getragen werden.[870] Allerdings können zeitliche Ansprüche erhoben werden.

§ 6 Abs. 2 VOB/B benennt die ***Risikobereiche***, die der *Abbildung 4-5* zu entnehmen sind.

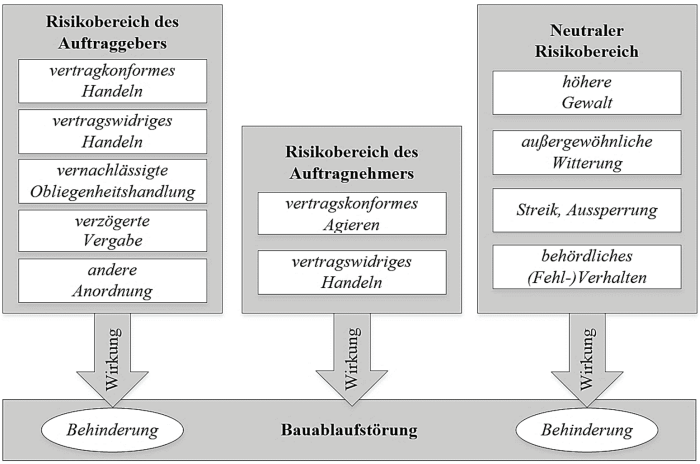


Abbildung 4-5: Klassifizierung der Risikobereiche i. A. a. Lang und Rasch.[871]

Laut *Kapellmann et al.* wird eine Bauablaufstörung dann als Behinderung bezeichnet, wenn sie *negative Folgen* besitzt.[872] Negative Folgen sind keine baubetrieblichen oder physikalischen Wirkungen eines gestörten Bauablaufs.[873] In dieser Arbeit wird unter dem Begriff ein materieller Anspruch auf eine bestimmte Anspruchshöhe als *Rechtsfolge* verstanden, die im Vertragsverhältnis aufgrund einer Bauablaufstörung zum Nachteil des Auftragnehmers führen würde, solange sie unberücksichtigt bliebe – insbesondere muss dieser Anspruch gerechtfertigt sein.

Die Folgen zielen direkt auf die auftragnehmerseitige Behinderung ab. Demnach können dem Auftragnehmer zeitliche Behinderungsfolgen (bezogen auf einen zeitlichen Mehrbedarf der Bauzeit als Bauzeitverlängerung) und/oder finanzielle Behinderungsfolgen (bezogen auf Mehrkosten infolge einer Bauzeitverlängerung) durch eine Bauablaufstörung entstanden sein.[874] *Sonntag* schließt sich der Meinung von *Kapellmann et al.* an und weist darauf hin,

[869] Hierzu zählen: Streik, Aussperrung, höhere Gewalt sowie für den Auftragnehmer nicht abwendbare Umstände (wie außergewöhnliche Witterungsverhältnisse). Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 23-28.
[870] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 24, 28.
[871] Eigene Darstellung i. A. a. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 536, Rdn. 64.
[872] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203; *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 1-3.
[873] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203-1204. Siehe *Kapitel 2.1*.
[874] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1204; *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 2.

dass Behinderungen „[…] *nicht zwingend, zeitliche und/oder finanzielle Folgen haben. Es kann durchaus sein, dass sich Behinderungen nur zeitlich, nicht aber finanziell auswirken oder, dass Behinderungen weder zeitliche noch finanzielle Folgen haben*.“[875] Demnach kann eine unbestrittene Bauablaufstörung vorliegen, die zunächst alle Anforderungen einer Behinderung erfüllt. Sollte hingegen nachzuweisen sein, dass Ausweichmöglichkeiten i. S. v. § 6 Abs. 3 VOB/B möglich gewesen wären, kann die Behinderung u. U. keine negativen Folgen haben. Entsprechend kommt es auf die Bewertung des Einzelfalls an, ob und inwieweit eine (gerechtfertigte) Behinderung vorliegt. Hierzu weisen *Kapellmann et al.* darauf hin, dass, solange eine Störung ***keine*** *negativen Folgen* verursacht, auch kein entsprechender Regelungsbedarf in der VOB/B vorhanden ist.[876] Dies ist dann gegeben, wenn dem Auftragnehmer im Rahmen seiner Dispositionsfreiheit genug Zeit für die Fertigstellung seiner Ausführungsarbeiten übrig bleibt.[877]

Da der Auftragnehmer erst beim Bestehen einer Behinderung Forderungsrechte wegen einer Bauablaufstörung besitzt, ist er im Rechtsstreit für das Vorhandensein einer Behinderung und die daraus resultierenden Behinderungsfolgen darlegungs- und beweispflichtig.[878]

Der ***Start*** einer Behinderung resultiert aus § 6 Abs. 1 VOB/B und ***endet*** gem. § 6 Abs. 3 Satz 2 VOB/B.[879] Aus Start und Ende der Behinderung ergibt sich ihre Dauer.[880] Zur zeitproportionalen Darstellung einer Behinderung sind Vorgangsbalken oder Meilensteine eines Balkenplans geeignet. Es wird aber davon ausgegangen, dass *Bauablaufstörungen* nicht ausschließlich schlagartig auftreten, wie z. B. bei einer ausbleibenden Planlieferung oder bei Maschinenausfällen, sondern sich ebenso gut „schleichend“ – also hemmend – entfalten können. Das wäre durch häufige Arbeitsplatzwechsel oder Verzögerungen durch den Einfluss des Einarbeitungseffekts der Fall. Ebenso ist es denkbar, dass Bauablaufstörungen allmählich enden oder sich mit anderen Bauablaufstörungen vermischen.

Eine Behinderung muss daher *nicht* mit einer Bauablaufstörung zeitlich deckungsgleich sein. *Abbildung 4-6* stellt einen gestörten Bauablauf als System dar. Darin ist eine Behinderung enthalten, die rein aus subjektiven Erfassungsgründen außerhalb der realen Systemstörung liegt. Zum Vergleich ist zusätzlich eine Leistungsverzögerung eingezeichnet.

---

[875] *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 7. Siehe auch Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203, 1414 ff.

[876] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203.

[877] Siehe *Kapitel 3.2.2* und *Kapitel 4.4.5*.

[878] Vgl. *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: Rdn. 2; *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 8, Rdn. 72.

[879] Der Auftragnehmer hat beim Wegfall der Behinderung *unverzüglich* mit seinen Arbeiten zu beginnen und den Auftraggeber darüber zu benachrichtigen. Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6 Rdn. 35.

[880] In Fachkreisen ist es umstritten, ob beim Ausbleiben einer Behinderungsabmeldung eine Pflichtverletzung vorliegt. Pro: *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 3, Rdn. 48. Contra: Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 532; *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 2.

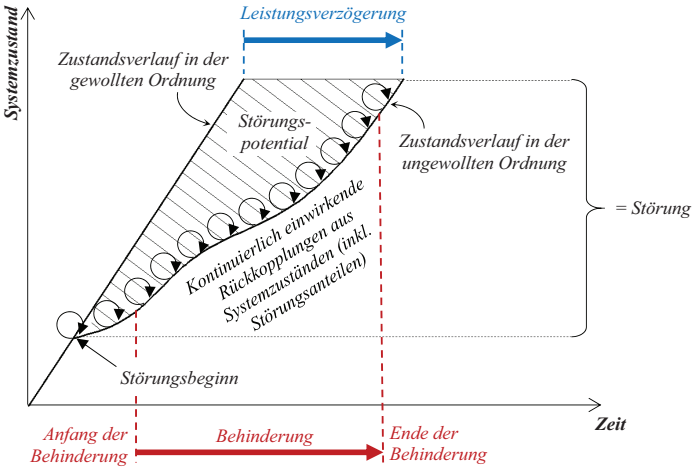


Abbildung 4-6: Bauablaufstörung, Leistungsverzögerung und Behinderung[881]

Der vorausgegangene Text zeigt, dass eine Behinderung eine spezielle Form einer Bauablaufstörung ist. Folglich setzt sich eine *Behinderung* aus einer *objektiv zu wertenden Bauablaufstörung inkl. ihrer Entstehungsgründe und Gegensteuerungsmaßnahmen* zusammen. Gleichzeitig muss sie außerhalb der Risikosphäre des Auftragnehmers entstanden sein und zu einer vertragsrechtlichen Abweichung während seiner Leistungserfüllung geführt haben.

Der Begriff ***Unterbrechung*** ist mit § 6 Abs. 5, 7 VOB/B in Verbindung zu bringen. Sie zielt auf einen *Stillstand* bzw. auf *unproduktive Ausführungsprozesse* ab, bei der kein Weiterarbeiten über einen Zeitraum von 3 Monaten möglich ist.[882] Sie kann zur vorzeitigen Vertragsbeendigung führen. Unterbrechungen im Sinne der VOB werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.2.3 Behinderungsanzeige nach § 6 Abs. 1 VOB/B

§ 6 Abs. 1 VOB/B sieht vor, dass der Auftragnehmer *nur dann* einen zeitabhängigen Anspruch aufgrund einer Bauablaufstörung erheben kann, sobald dem Auftraggeber ihre hindernden Umstände und hindernden Wirkungen tatsächlich bekannt waren.[883] Der Auftragnehmer ist sogar *verpflichtet*, eine drohende oder bereits wirkende Bauablaufstörung dem Auftraggeber als Behinderung *unverzüglich* und *schriftlich anzuzeigen*.[884] Dies hat zu erfolgen, wenn sich der Auftragnehmer in seiner ordnungsgemäßen Ausführung behindert *glaubt* und die Behinderung nicht *offenkundig* ist.

---

[881] Eigene Darstellung (weiterentwickelte Version aus *Kapitel 2.1.8*).

[882] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 3; *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Vorbem. § 6, Rdn. 34 sowie § 6 Abs. 5, Rdn. 12.

[883] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 353-354; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 524; *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 1; *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 14.

[884] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1217-1718; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: § 6 Abs. 1, Rdn. 1.

Eine Behinderungsanzeige dient besonders als Informations-, Warn- und Schutzfunktion gegenüber dem Auftraggeber.[885] Diesem soll gem. § 4 Abs. 1 VOB/B die Möglichkeit zum Entgegenwirken gegeben werden,[886] damit der Auftragnehmer seine Ausführung wieder bestmöglich aufnehmen und fortführen kann.[887] Ebenso soll sie den Auftraggeber vor unberechtigten Behinderungsansprüchen bewahren.[888]

Falls eine schriftliche Behinderungsanzeige ausbleibt, kann sich der Auftragnehmer später nicht auf das Vorliegen einer Behinderung und die daraus ableitbaren Behinderungsfolgen berufen, ausgenommen die Anzeige war wegen Offenkundigkeit entbehrlich.[889] Dagegen gestaltet sich der Nachweis einer *Offenkundigkeit* schwierig. Der *BGH* versteht unter einer Offenkundigkeit, dass dem Auftraggeber die hindernden Umstände und die daraus resultierenden Wirkungen im Bauablauf *bekannt* waren und deren Mitteilung einer „reinen Förmelei" (Zitat) gleichkäme.[890]

Grundsätzlich kann zwar eine auftraggeberseitige Offenkundigkeit infolge einer *Anordnung* gem. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B vorliegen,[891] dennoch ist nicht davon auszugehen, dass der Auftraggeber die hindernden Wirkungen in der Bauausführung realistisch abschätzen konnte.[892] Somit wird der Behinderungsanzeige in Fachkreisen ein hoher Stellenwert beigemessen.

Prinzipiell muss der Auftraggeber Kenntnis über eine Behinderung gem. § 6 Abs. 1 VOB/B erlangen, falls der Auftragnehmer Ansprüche auf § 6 Abs. 2-4 VOB/B oder § 6 Abs. 6 Satz 1, 2 VOB/B stützt.[893] In der Fachliteratur wird die Meinung vertreten, dass ein Nachweis der *schriftlichen* Behinderungsanzeige besser für alle zeitabhängigen Ansprüche – namentlich: Schadensersatz-, Entschädigungs-, Vergütungs- und/oder Fristverlängerungsansprüche – gestellt werden sollte, solange diese wegen einer Bauzeitverlängerung gefordert werden.[894] Unter diesen Umständen ist der schriftlichen Behinderungsanzeige als belegbares Dokument eine wesentliche Bedeutung beizumessen, sobald der Auftragnehmer einen prozessualen Anspruch zu einer behaupteten *Behinderung* begründen möchte.[895]

---

[885] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 1, Rdn. 1.
[886] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 6, 40; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 1, Rdn. 1.
[887] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1217; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: § 6 Abs. 1, Rdn. 1.
[888] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 1, Rdn. 1.
[889] Vgl. *Voit in* Messerschmidt/Voit, 2018: § 6, Rdn. 2-3.
[890] Vgl. BGH, Urteil vom 21.12.1989 – Az. VII ZR 132/88, IBRRS 2000: 0939.
[891] Siehe *Kapitel 4.2.6*.
[892] Vgl. *Voit in* Messerschmidt/Voit, 2018: § 6, Rdn. 3. Laut *Oberhauser*, ist die Offenkundigkeit ein „Ausnahmetatbestand" gegenüber der Behinderungsanzeige. Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 8.
[893] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 15; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6.
[894] Vgl. Drittler, 2017: Rdn. 4:127 ff.; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 179 Fn. 3140, Fn. 27; Genschow/Stelter, 2013: S. 30-32. *Roquette et al.* bezeichnen die Behinderungsanzeige als *notwendige Voraussetzung* für die Anspruchsbegründung. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 528, 531, 601.
[895] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 47.

Die inhaltlichen Anforderungen zur Erstellung einer Behinderungsanzeige richten sich nach jedem konkreten Einzelfall.[896] Sie sollte „[…] *alle Tatsachen enthalten, aus denen sich für den Auftraggeber mit hinreichender Klarheit und erschöpfend die Hinderungsgründe ergeben, wobei in der Regel eine konkrete bauablaufbezogene Darstellung erforderlich* [wird]. *Dagegen gehört es nicht zu deren notwendigen Inhalt den Umfang einer Bauzeitverlängerung gem. § 6 Abs. 2 VOB/B oder gar die Höhe möglicher Mehrkosten anzugeben*.“[897] Die bloße Mitteilung des Auftragnehmers, seine Ausführungsarbeiten seien behindert, ist hingegen unzureichend.[898]

Letztendlich sollte sich der Auftragnehmer auf stichhaltige Fakten berufen, die die behinderungsgefährdeten Bauleistungen mit ihren möglichen Beeinträchtigungen aussagekräftig beschreiben, so dass der Auftraggeber i. S. v. *Treu und Glauben* handeln kann. Eine Behinderungsanzeige ist daher nicht aus willkürlicher Sorge heraus zu stellen.[899] Zusammenfassend zählt *Tabelle 4-1* wichtige Inhalte zur Erstellung einer Behinderungsanzeige auf.

Tabelle 4-1: Notwendige Informationen einer Behinderungsanzeige nach Lang/Rasch.[900]

Fragestellung	Sachverhaltsdarstellung	Anmerkung
Seit wann?	Ab wann sind die Arbeiten behindert?	konkrete Datumsangabe
Welche Arbeiten?	Welche Arbeiten sind an welchem Ort von der Behinderung betroffen?	mindestens konkretes Gewerk benennen
Wodurch?	Alle Tatsachen, aus denen sich die Gründe der Behinderung für den Auftraggeber mit hinreichender Klarheit ergeben	zum Beispiel fehlende Planlieferung der Schalpläne Decke über EG Achse 5 – 10
Wie lange?	Ab wann und voraussichtlich wie lange wird die Behinderung dauern?	bis Ursache beseitigt ist plus Zuschlag X Tage für Wiederaufnahme
Auswirkungen?	Welche Auswirkungen liegen vor, dass die betroffenen Arbeiten jetzt nicht ausgeführt werden konnten?	Baustillstand der Schalarbeiten an der Decke
Wie ursprünglich geplant?	Wann hätten die Arbeiten nach dem Bauablauf ausgeführt werden sollen?	Basis: letzter koordinierter Terminplan

4.2.4 Fristverlängerungsanspruch nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B

Soweit eine unbestrittene Behinderung gem. § 6 Abs. 2 VOB/B vorliegt, können Ausführungsfristen zugunsten des Auftragnehmers *verlängert* werden. Hieraus resultiert der Fristverlängerungsanspruch, der sich aus § 6 Abs. 2-4 VOB/B ergibt.[901] Die Verlängerung der Ausführungsfristen erfolgt „automatisch“.[902] „Automatisch“ bedeutet, dass die nach § 6 Abs. 3, 4 VOB/B zu berechnende Fristverlängerung keine zusätzliche Vereinbarung

[896] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 40.
[897] *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 398. Siehe auch *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 7, Rdn. 38; BGH, Urteil vom 21.12.1989 – Az. VII ZR 132/88, IBRRS 2000: 0939.
[898] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 40.
[899] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 1, Rdn. 25-26, 40-46.
[900] I. A. a. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 215.
[901] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 50.
[902] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1243; Schiffers, 1998: S. 293.

zwischen den Vertragsparteien voraussetzt und der bestehende Vertrag entsprechend angepasst wird.[903]

Die Verlängerung betrifft Ausführungsfristen gem. § 5 Abs. 1 VOB/B, weshalb die automatische Fortschreibung auf *Einzelfristen* sowie auf *Vertragsfristen* anzuwenden ist.[904] Mit der automatischen Fortschreibung einer Vertragsfrist wird der ursprünglich geplante Fälligkeitstermin einer Leistung zeitlich nach hinten verlegt, wodurch sich die Bewertungsergebnisse eines auftragnehmerseitigen Verzugs[905] ändern können.[906] Eine automatisch verlängerte Vertragsfrist entkräftet mitunter die Schadensersatz- und/oder Vertragsstrafenansprüche des Auftraggebers für den ursprünglich vorgesehenen Termin.[907] Allerdings bleiben von der Behinderung berührte Vertragsstrafen bestehen, sofern der gesamte Zeitplan nicht vollständig umgeworfen wird.[908]

Die nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B verlängerten Ausführungsfristen sind keine kalendermäßig bestimmten Termine mehr und setzen infolge einer weiteren Überschreitung eine auftraggeberseitige Mahnung voraus, damit der Auftragnehmer in Verzug gerät.[909] Die Mahnung ist entbehrlich, solange zwischen den Vertragspartnern der neue Termin vereinbart wird oder das Gericht in einem Rechtsstreit eine Entscheidung trifft.[910]

Grundsätzlich ist zwischen zeitlichen und finanziellen Behinderungsfolgen zu differenzieren, die wegen einer Behinderung gem. § 6 Abs. 2 VOB/B vorliegen können. Die Fristverlängerung nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B ist ein eigenständiger Anspruch, der auf zeitliche Behinderungsfolgen abzielt. Ein Fristverlängerungsanspruch ist *keine* Voraussetzung für einen finanziellen Anspruch mit finanziellen Behinderungsfolgen.[911] Mehrkosten, die sich aufgrund einer Bauzeitverlängerung ergeben, begründen *keinen* automatischen Anspruch auf Fristverlängerung. Vielmehr kommt es auf die konkrete Bauzeitverlängerung *wegen eines bestimmten Behinderungssachverhalts* an, woraus der Auftragnehmer die für ihn *unabwendbaren Mehrkosten* über einen Schadensersatz-, einen Entschädigungs- oder einen Vergütungsanspruch gem. *Kapitel 4.4.3* fordern kann.

---

[903] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln NZBau 2010: 403; *Döring in* Ingenstau/Korbion, VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 2.
[904] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 22; *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 17.
[905] Siehe *Kapitel 4.1.3* und *Kapitel 4.1.5*.
[906] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6, Rdn. 7-8.
[907] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 13 ff.; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 63; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: 1104-1106.
[908] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 44. Laut *Berger* verschafft § 6 Abs. 2 VOB/B den Vertragspartnern *keine* neuen Ansprüche. Stattdessen wird der vorhandene Vertragsinhalt *umgestaltet* bzw. auf eine unvorhersehbare Situation angepasst. Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 13-14.
[909] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 17; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 62.
[910] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 17; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1270.
[911] Vgl. Markus, NZBau 2014: 688.

Anspruchsvoraussetzungen:

Ein Fristverlängerungsanspruch erfordert das Vorliegen einer Behinderung gem. § 6 Abs. 2 VOB/B, die dem Auftraggeber gem. § 6 Abs. 1 VOB/B bekannt ist.[912] Spätestens bei der Darlegung prozessualer Ansprüche muss der Auftragnehmer adäquat-kausal durch einen Soll-Ist-Vergleich objektiv nachweisen können, dass eine konkrete Behinderung

- unbestritten vorlag,
- seine Ausführungsprozesse beeinträchtigte und dass
- die Überschreitung eines vorgesehenen Fertigstellungstermins stattfinden musste.[913]

Für diese Aufgaben ist einerseits der (hypothetisch) ungestörte Soll-Bauablauf – wie er ohne Behinderung gewesen wäre – mit dem tatsächlich gestörten Bauablauf zum behaupteten Eintritt der Behinderung gegenüberzustellen.[914] Den gesamten Nachweis kann der Auftragnehmer mit einem produktionsbezogenen Soll-Bauablaufplan führen, indem er darin die Behinderungen und deren potentielle baubetriebliche Wirkungen überprüft und den Sachverhalt mit einem (tatsächlichen) Ist-Bauablaufplan objektiv abgleicht.[915] Zur Nachweisführung ist es gängige Praxis, dass die Fristverlängerungsansprüche durch einen Terminplan veranschaulicht werden, um die Störungsanteile der Risikobereiche zu identifizieren. Eine Vertragsfrist verlängert sich nur, wenn aufgrund einer Behinderung der geplante kritische Weg tatsächlich nicht eingehalten werden konnte. Bei der Verlängerung einer Kontrollfrist kommt es dagegen nicht auf den kritischen Weg an.

Zeitliche Anspruchshöhe:

Die *Ermittlung der Anspruchshöhe* erfolgt über § 6 Abs. 4 VOB/B. Sie richtet sich nach der Behinderungsdauer mit einem Zuschlag für die Wiederaufnahme der Arbeiten und eine etwaige Verschiebung in eine ungünstige Jahreszeit unter Berücksichtigung der ***Weiterführungs- und Wiederaufnahmepflicht*** gem. § 6 Abs. 3 VOB/B.[916] Die Wiederaufnahme der Arbeiten kann Vorbereitungs- oder Einarbeitungszeiten umfassen,[917] wobei der Behinderungssachverhalt, die Arbeitsaufgaben und der erforderliche Ressourceneinsatz stets zu berücksichtigen sind. Unter diesen Voraussetzungen ist die Anspruchshöhe zwischen der berechneten und der tatsächlichen (konkreten) Bauzeitverlängerung als Abweichung zu identifizieren. Durchweg ist die berechnete Anspruchshöhe mit dem Ist-Bauablauf zu vergleichen, damit das zeitliche Ende der tatsächlichen Ist-Bauzeit *nicht vor* dem zeitlichen Ende des ermittelten Fristverlängerungsanspruchs liegt. In diesem Zusammenhang sind aber etwaige Beschleunigungsmaßnahmen, die während des Ist-Bauablaufs ergriffen wurden, bei der Ermittlung der Anspruchshöhe zu beachten.

---

[912] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 1, 15; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 22; *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1215.

[913] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 1-2; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 909 ff.

[914] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 7; *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 40, 41; *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1968. Siehe *Kapitel 4.4.7*.

[915] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 1-3; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203, 1204; Thode ZfBR 2004: 214; Schiffers, 1998: S. 293 ff.

[916] Vgl. *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 3 ,10-14.

[917] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: § 6 Abs. 4, Rdn 14.

4.2.5 Vergütungsansprüche nach § 2 Abs. 3, 5, 6, 8 VOB/B

Die VOB/B gewährt dem Auftraggeber Anordnungsrechte zur vertragskonformen Modifizierung des Bau-Solls. Die Anordnungsregelung ist für unbestimmte Situationen im Verlauf des Bauprojekts vorgesehen. Beispielsweise kann während der Bauausführung ein Anpassungsbedarf infolge einer baubegleitenden Planung entstehen, woraufhin der Auftraggeber mit einer entsprechenden Anordnung reagieren möchte.[918] Mit dieser Regelung sollen die Interessen eines Auftraggebers als Eigentümer und/oder Nutzer gewahrt werden; von einem rechtlichen Änderungsinteresse seitens des Auftragnehmers wird hingegen nicht ausgegangen.[919]

Eine Form der Anordnung ist nicht vorgegeben und kann neben einer ausdrücklichen Anweisung auch mündlich sowie durch ein konkludentes Verhalten des Auftraggebers zum Ausdruck gebracht werden.[920] Der rechtsgeschäftliche Wille zur Änderung des vertraglichen Bau-Solls muss jedoch erkennbar sein.[921] Anordnungen der VOB/B können zu unterschiedlichen Ansichten führen, da der Auftraggeber, z. B. über § 5 Abs. 3 VOB/B, dazu berechtigt ist, in den Bauablauf einzugreifen, ohne einen entsprechenden rechtsgeschäftlichen Willen zur Modifizierung des Bau-Solls zu beabsichtigen.

Voraussetzungen für angeordnete Vergütungsansprüche gem. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B:

Im Gegensatz zu den Anordnungsrechten von § 650b BGB ermöglicht § 1 Abs. 3 oder Abs. 4 VOB/B dem Auftraggeber einen einseitigen Änderungsvorbehalt nach Auftragserteilung des Hauptvertrags, der keinen befristeten Zustimmungszeitraum[922] des Auftragnehmers erfordert.[923]

§ 1 VOB/B ermöglicht *dem Auftraggeber* folgende zwei Anordnungsrechte:

- ***§ 1 Abs. 3 VOB/B*** gewährt ihm eine Änderung und/oder Erweiterung des vertraglich vereinbarten Bauentwurfs. Hiermit wird ihm eine Anpassungsmöglichkeit der Ausführungsarbeiten ermöglicht, bei der er ohne Angabe besonderer Gründe in die Projektabwicklung eingreifen kann.[924]
- ***§ 1 Abs. 4 VOB/B*** räumt ihm ein Anordnungsrecht auf Verlangen ein, bei dem der Auftragnehmer im Hauptauftrag nicht vereinbarte, aber erforderliche Leistungen mit ausführen muss. Diese Regelung greift nur, wenn die nicht vereinbarten Leistungen zur Erreichung der vertraglichen Leistung erforderlich sind und der Betrieb des Auftragnehmers darauf eingerichtet ist. Das heißt, das Anordnungsrecht nach § 1 Abs. 4 VOB/B „[…] *ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Vertrag anzupassen,*

---

[918] Vgl. *von Rintelen in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 49.
[919] Vgl. *von Rintelen in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 49a.
[920] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 193-198; *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 121.
[921] Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 105; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 455.
[922] Gemeint ist der Einigungszeitraum von *30 Tagen* gem. § 650b Abs. 2 BGB (siehe *Kapitel 4.1.8*).
[923] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2, Rdn. 44 i. V. m. *von Rinteln in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 49b-50; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 177; *Wieseler in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 1 Abs. 4, Rdn. 1-4; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 7, 15.
[924] Vgl. *von Rinteln in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 79.

weil sonst der Werkerfolg nicht erreicht werden könnte."[925] Alle anderen Leistungen setzen jedoch eine Zustimmung des Auftragnehmers voraus, damit die Anordnungen im Sinne des § 1 Abs. 4 VOB/B wirksam werden.

Solche Anordnungen können dazu beitragen, dass sich nicht nur das Bau-Ist, sondern auch das Bau-Soll im Laufe der Bauabwicklung dynamisch verändert, wodurch das zum Zeitpunkt der Auftragserteilung vereinbarte Gegenseitigkeitsverhältnis zwischen Leistung (werkvertraglicher Erfolg) und Gegenleistung (Vergütung) „gestört" wird.[926] In diesem Zusammenhang wird zwischen dem verpreisten Leistungsumfang und dem geschuldeten Werkerfolg unterschieden.[927] Das bedeutet, eine Anordnung, die das Bau-Soll modifiziert, kann zu einem vom Hauptauftrag abweichenden zeitlichen Mehraufwand bis zur Vollendung einer bestimmten Bauleistung führen.[928] Oft stimmt daraufhin das Bau-Soll nicht mehr mit dem Bau-Ist überein, wobei der ursprünglich kalkulierte Preis von der nun tatsächlichen Vertragssituation abweicht.

Darum darf der Preis entsprechend der Leistungsmodifikation angeglichen werden.[929] *Kapellmann* argumentiert, dass infolge eines einseitigen Anordnungsrechts zwangsläufig ein einseitiger Anspruch des Auftragnehmers auf eine entsprechende Vergütungsanpassung, ohne Zustimmung des Auftraggebers, vorliegt.[930] Für diesen Zweck sieht die VOB/B die Vergütungsansprüche gem. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B vor, die im direkten Zusammenhang mit den Anordnungen gem. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B stehen. Das Äquivalent bildet sich einerseits aus § 1 Abs. 3 VOB/B im Verhältnis mit dem Anspruch auf eine geänderte Leistung gem. § 2 Abs. 5 VOB/B und andererseits aus § 1 Abs. 4 VOB/B im Verhältnis mit dem Anspruch auf eine zusätzliche Leistung gem. § 2 Abs. 6 VOB/B. Für beide Vergütungsansprüche sollte der anzupassende Preis bereits vor der Ausführung der betroffenen Bauleistung vereinbart werden. Diese Vergütungsansprüche sind nicht nur bei einvernehmlichen Einigungen anzuwenden, sondern auch für den Fall, dass sich die Parteien zwar auf die Leistungsmodifikation, aber nicht über den Preis einigen konnten.[931]

Die Unterscheidung sowie Reichweite der Anordnungs- und Vergütungsregelungen von § 1 Abs. 3, 4 VOB/B i. V. m. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B sind *in Fachkreisen* aufgrund unklarer Definition *umstritten*.[932] In der baubetrieblichen Praxis wird davon ausgegangen, dass § 1 Abs. 3 VOB/B i. V. m. § 2 Abs. 5 VOB/B eine „andere" bzw. erweiterte Ausführung der vertraglich vereinbarten Leistung ermöglicht. Demgegenüber wird bei § 1 Abs. 4 VOB/B i. V. m. § 2 Abs. 6 VOB/B davon ausgegangen, dass eine Leistung zur Ausführung kommen

---

[925] *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 103.
[926] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 28. Siehe *Kapitel 3.1* und *Kapitel 4.1.1*.
[927] Vgl. Leinemann, NJW 2017: 3115.
[928] Vgl. Möhring, 2012: S. 13.
[929] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 449; Reister, 2014: S. 449-451.
[930] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 177.
[931] Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 97, 106.
[932] Vgl. *von Rintelen in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 50a-b; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 181; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 194-222; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 76 ff.; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 3, Rdn. 26, 42-43; *Keldungs in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 1 Abs. 3, Rdn. 3-4; *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 102 ff.; Althaus, BauR 2012: 359-379.

soll, die nicht in der Leistungsbeschreibung des Vertrags genannt wurde.[933] *Kandel* beschreibt, dass die Abgrenzungen zwischen § 2 Abs. 5 VOB/B und § 2 Abs. 6 VOB/B äußerst kompliziert sein können, während sich die weitestgehend vergleichbaren Rechtsfolgen kaum voneinander unterscheiden.[934] Ein offensichtlicher Unterschied besteht darin, dass ein Anspruch auf § 2 Abs. 6 VOB/B gegenüber dem Auftraggeber *angekündigt* werden muss, was bei § 2 Abs. 5 VOB/B nicht ausdrücklich vorgesehen ist.[935]

Der Vergütungsanspruch gem. § 2 Abs. 5 VOB/B zielt u. a. auf die auftraggeberseitige Anordnung zur Änderung des *Bauentwurfs* ab. Unstrittig ist, dass die Formulierung „Bauentwurf" den Bauinhalt – also das Bauwerk als technisches Produkt – meint. Demgegenüber beschreibt *Jansen*, dass sich der Begriff nach einhelliger Auffassung aus dem „[…] *gesamten bautechnischen Leistungsumfang, wie er sich aus dem Leistungsverzeichnis, den Plänen und Zeichnungen, den einschlägigen technischen Regelwerken, aber auch aus den weiteren Vereinbarungen der Parteien ergibt.*"[936] Kontroverse Meinungen bestehen darin, inwieweit ein angeordnetes Bauverfahren oder eine angeordnete Produktionsweise zu werten ist. Schließlich kann der Bauentwurf unterschiedlich erreicht werden. Dennoch schuldet der Auftragnehmer den werkvertraglichen Erfolg und nicht die Herstellungsweise. Nach gängigen Meinungen werden *auftraggeberseitige Anordnungen zur Beschleunigung* als *unzulässig* angesehen und sind *nicht* durch die Anordnungsrechte gem. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B gedeckt.[937]

Nicht jede Anweisung des Auftraggebers stellt eine Anordnung mit Vergütungsfolgen dar. Sobald eine auftraggeberseitige Anordnung nicht zur Abweichung des ursprünglichen Bau-Solls beiträgt, handelt es sich um eine Aufforderung zur Einhaltung des bereits bestehenden Herstellungsanspruchs, etwa i. S. v. § 4 Abs. 1 Nr. 3, 4 VOB/B. Anderenfalls können Anordnungen dem Auftragnehmer Vergütungsansprüche gewähren, sobald sie zu Abweichungen zwischen dem ursprünglichen Umstands-Soll oder Inhalts-Soll führen und durch § 1 Abs. 3, 4 VOB/B und § 2 Abs. 5, 6 VOB/B gestützt sind.[938]

Folglich ist eine auftraggeberseitige Aufforderung zur Korrektur einer auftragnehmerseitigen Verzögerung *keine* unzulässige Beschleunigungsanordnung. Eine eigene Verzögerung sollte der Auftragnehmer durch eigenständige Beschleunigungsmaßnahmen wieder gutmachen, indem er die versäumte Zeit wieder aufholt, damit er nicht in Verzug gerät.[939] Im Gegensatz dazu besteht nicht die Pflicht, dass eine unstrittige

---

[933] So deutet etwa § 2 Abs. 5 VOB/B auf die „Grundlage des Preises" hin, während § 2 Abs. 6 VOB/B auf die „Grundlage der Preisermittlung" abzielt. Das Wort „Ermittlung" beschreibt eine Methodik, die bei § 2 Abs. 5 VOB/B bereits gegeben sein muss.

[934] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2 Abs. 5, Rdn. 38. Siehe auch *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 182, 213; *Würfele in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1037; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 51 ff.

[935] *Kniffka* bewertet die Formulierung kritisch, da es „dem gesunden Menschenverstand" widerspricht, wenn eine erbrachte Leistung aufgrund einer ausbleibenden Ankündigung „verschenkt" wird. Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 108.

[936] *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 16. Diese Meinung ist *strittig*, da dazu auch die *Bauumstände* des Bau-Solls zählen.

[937] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 181, Fn. 442; *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 112; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 17.

[938] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 191; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 200; Mechnig/Bolz, IBR 2016: 76.

[939] Vgl. Leinemann, NZBau 2009b: 626.

Behinderung aufgeholt werden muss.[940] Vielmehr setzt eine Beschleunigung zur Aufholung einer durch den Auftraggeber verursachten Behinderung eine gesonderte Vereinbarung zwischen den Vertragsparteien voraus. Das heißt aber nicht, dass der Auftragnehmer keine Gegenmaßnahmen i. S. v. § 6 Abs. 3 VOB/B als Ausprägung der Schadensminderungspflicht der §§ 242, 254 BGB vorzunehmen braucht – im Gegenteil, bei *zumutbaren Anstrengungen* ist er sogar dazu *verpflichtet*.[941] Aus der Förderpflicht oder der Pflicht zur Abhilfe entsteht nach § 5 Abs. 1, 3 VOB/B sowie aus der Dispositionsfreiheit des Auftragnehmers gem. § 4 Abs. 2 VOB/B ein generelles Spannungsverhältnis, das der Auftragnehmer nicht treuwidrig ausnutzen darf.[942] *Roquette et al.* gehen auf das Problem ein, dass zwischen Vertragsparteien häufig unterschiedliche Ansichten darüber bestehen, ob eine Anordnung nach § 1 Abs. 3 VOB/B oder nach § 5 Abs. 3 VOB/B vorliegt.[943]

Dem Auftragnehmer ist ein Vergütungsanspruch aus § 2 Abs. 5, 6 VOB/B zugänglich, wenn der Auftraggeber zu der vorausgegangenen Anordnung berechtigt ist.[944] Die Formulierung „andere Anordnung" sorgt für unterschiedliche Meinungen, da sich darunter ggf. eine vertragswidrige Anordnung subsumieren ließe, die die in *Kapitel 4.2.7* thematisierten Schadensersatzforderungen gem. § 6 Abs. 6 VOB/B zulässt.[945] Führt der Auftragnehmer *nicht berechtigte* Anordnungen *widerspruchsfrei* aus, sind diese als berechtigte Anordnungen anzusehen und müssen nach § 2 Abs. 5, 6 VOB/B vergütet werden.[946]

Die aus einer Anordnung ableitbaren Vergütungsansprüche einer möglichen verlängerten Bauzeit liegen im Risikobereich des Auftraggebers.[947] Eine daraus resultierende verlängerte Bauzeit entspricht einer auftragnehmerseitigen Behinderung, die einen Anspruch auf Fristverlängerung gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B ermöglicht,[948] falls die vertraglich vorgesehenen Fertigstellungstermine tatsächlich überschritten werden. Eine solche Behinderung ist vertragskonform, da sie auf den auftraggeberseitigen Anordnungsrechten aufbaut. Allerdings muss die Behinderung für einen Fristverlängerungsanspruch dem Auftraggeber unter den Voraussetzungen von § 6 Abs. 1 VOB/B bekannt gewesen sein.[949]

Neben dem Fristverlängerungsanspruch sieht die VOB/B zudem vor, dass die durch den zeitlichen Mehraufwand entstandenen Mehrkosten über die Vergütungsansprüche nach § 2 Abs. 5, 6 VOB/B als finanzielle Behinderungsfolgen gedeckt werden können.[950] Inwieweit der komplette Fristverlängerungsanspruch aus § 6 Abs. 2-4 VOB/B den Preis

---

[940] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 32.
[941] Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 44; *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 2 ff.; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1455. Siehe auch *Kapitel 4.4.2* und *Kapitel 4.4.5*.
[942] Zum Beispiel: *von Rinteln in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 1, Rdn. 82-88.
[943] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 844 ff.
[944] Vgl. *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 29.
[945] Vgl. *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 1 Abs. 3, Rdn. 42-43; Thode, ZfBR 2004: 214. *Leinemann* äußert hierzu Zweifel. Vgl. Leinemann, NZBau 2009a: 564. Siehe auch *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 30.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 6, Rdn. 2, 4 ff.
[946] Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 5, Rdn. 104, 113 i. V. m. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 181, Fn. 442.
[947] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 5.
[948] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 5.
[949] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 5; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 356-358.
[950] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 345, 348.

mitbestimmt, ist fraglich, da dieser einen eigenständigen Anspruch auf zeitliche Behinderungsfolgen darstellt.[951] Zweckmäßigerweise sollte der Auftragnehmer sich etwaige Mehrkosten aus einer möglichen Terminplanfortschreibung ausdrücklich schriftlich vorbehalten, um Unklarheiten zu vermeiden.[952]

Voraussetzungen für Vergütungsansprüche ohne Anordnung gem. § 2 Abs. 3, 8 VOB/B:

In der Baupraxis kommt es durchaus vor, dass der Auftragnehmer ohne Anordnung *nicht beauftragte Leistungen* i. S. v. § 2 Abs. 8 VOB/B eigenmächtig ausführt.[953] In solchen Fällen liegen keine Anordnungen und somit keine Tatbestandsvoraussetzungen für Vergütungsansprüche gem. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B vor. Hierfür gewährt die VOB/B dem Auftragnehmer, die nicht beauftragten Leistungen über § 2 Abs. 8 VOB/B der Höhe nach i. S. v. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B abzurechnen. Eine Vergütungspflicht besteht gem. § 2 Abs. 8 Nr. 2 VOB/B, wenn die bestellten Leistungen

- zur Erfüllung des Vertrags erforderlich sind,
- dem mutmaßlichen Willen des Auftraggebers entsprechen und
- unverzüglich angezeigt werden.[954]

Voraussetzungen einer Vergütung liegen ebenfalls vor, wenn der Auftraggeber ein nachträgliches Anerkenntnis gem. § 2 Abs. 8 Nr. 3 VOB/B äußerte.[955] Nicht beauftragte Leistungen, die entgegen dem ausdrücklichen Willen des Auftraggebers ausgeführt werden, können mit sich bringen, dass der Auftragnehmer die damit verbundenen Kosten nicht erstattet bekommt.[956]

Darüber hinaus können die tatsächlich ausgeführten Mengen bei gleichbleibendem Leistungsinhalt einer Leistungsposition von den im Leistungsverzeichnis vertraglich vorgesehenen Mengenvordersätzen aufgrund der tatsächlichen Baustellensituation abweichen.

Sobald eine Mengenüberschreitung bzw. -unterschreitung von *+/- 10 %* vorliegt, besteht beim Einheitspreisvertrag gem. § 2 Abs. 3 VOB/B die Verhandlungsmöglichkeit zur Anpassung und Fortschreibung eines neuen Preises. Eine Anordnung, die zu einer nachweisbaren Mengenabweichung führte, schließt diesen Anspruch aus.[957] Die Preisanpassung erfolgt vergleichsweise zu den Vergütungsansprüchen gem. § 2 Abs. 5, 6, 8 VOB/B auf der Grundlage der Urkalkulation unter Berücksichtigung des zeitlichen Mehr- oder Minderbedarfs.[958]

---

[951] Vgl. Markus, NZBau 2014: 688.
[952] Vgl. OLG Köln, Beschluss vom 27.10.2014 – Az. 11 U 70/13, IBRRS 2015: 0137.
[953] Ein solches Verhalten kann durch einen Zugzwang erfolgen. Wenn etwa der Auftragnehmer bei einem Folgeprojekt nicht zu Beginn in Verzug geraten möchte. Denkbar ist auch ein unwissendes Verhalten des Auftragnehmers.
[954] Vgl. *Voit in* Messerschmidt/Voit, 2018: § 2, Rdn. 28; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 466-468.
[955] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 467.
[956] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 301-302.
[957] Vgl. *Kandel in* BeckOK VOB/B, St. 30.04.2018: VOB/B § 2 Abs. 3, Rdn. 2.
[958] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 179, 213; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 67.

Vergütungsansprüche ohne Anordnung gem. § 2 Abs. 3, 8 VOB/B können ebenfalls zu einer verlängerten Bauzeit und somit zu einer vertragskonformen auftragnehmerseitigen Behinderung führen.[959] Je nach Einzelfall lassen sich Fristverlängerungsansprüche gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B herleiten. Sobald der Auftraggeber die Soll-Mengen bestimmt hat und eine Mengenerhöhung *zwischen 0* und *10 %* einen zeitlichen Mehrbedarf für die Vertragserfüllung erfordert, liegt eine Behinderung vor.[960] Zwar ist ein Anspruch auf Preisanpassung gem. § 2 Abs. 3 VOB/B nicht möglich, ein Fristverlängerungsanspruch nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B hingegen schon.

Höhe der Vergütungsansprüche:

Die Ermittlung der Vergütungshöhe für Ansprüche aus § 2 Abs. 3, 5, 6, 8 VOB/B ist nahezu identisch.[961] Im Gegensatz zu den Rechtsfolgen aus einem Schadensersatzanspruch spielen die tatsächlich nachweisbaren Kosten bei Vergütungsansprüchen eine eher untergeordnete Rolle, da der Preis auf Grundlage der Urkalkulation fortgeschrieben wird.[962] Unter Anwendung der *Korbion´schen Formel* soll der Auftraggeber bei Änderungen der vertraglich vereinbarten Werkleistung an dem ursprünglich vereinbarten Preisniveau festhalten können.[963]

Dazu spricht sich ein Großteil der Baupraxis für eine ***vorkalkulatorische Preisfortschreibung*** aus, die *Kapellmann* korrekterweise als „eine Art Dreisatzrechnung" bezeichnet.[964] Auch das *OLG Hamm* bekräftigt, dass Mehr- und Minderkosten vor Beginn der Ausführungen nach den Grundlagen der Preisermittlung zu vereinbaren und entsprechend im Falle einer Leistungsmodifikation nach dem Grundverständnis gem. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B fortzuschreiben sind.[965] Der dafür erforderliche Proportionalitätsfaktor – das sog. Vertragspreisniveau – wird auf Basis der Urkalkulation hinsichtlich einer vergleichbaren Leistungsposition gebildet, in einem „Preispaket" zusammengefasst und entsprechend der vorliegenden Baustellensituation modifiziert bzw. fortgeschrieben.[966]

Die Vorgehensweise zur vorkalkulatorischen Preisfortschreibung ist zur Ermittlung der Vergütungshöhe angedacht. Bei der Fortschreibung bildet sich die Vergütungshöhe aus der technischen Leistungsmodifikation und aus einer möglichen Bauzeitverlängerung. Bei dieser Methode wird davon ausgegangen, dass die Kosten aufgrund der erbrachten Arbeitsproduktivität proportional zur verlängerten Bauzeit angefallen sind, bspw. in Form von zusätzlich erbrachten Arbeitsstunden. Aus der Gegenüberstellung zwischen hypothetisch ungestörten Soll-Bauzeiten und tatsächlichen Ist-Bauzeiten entsteht eine zeitliche Differenz, die für die Bewertung der Anspruchshöhe maßgeblich ist. Die zeitliche Differenz stellt eine Behinderungsdauer gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B dar.

---

[959] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30.
[960] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30. Die Argumentation ist jedoch keinesfalls unumstritten. Siehe z. B. Tiesler, 2018: S. 310-311.
[961] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 67-76; Reister, 2014: S. 284 ff.; Althaus, BauR 2012: 359.
[962] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 38, 90-100; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 493-494; *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213.
[963] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213; Franz/Kues, BauR 2010: 678 ff.
[964] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213.
[965] Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 09.05.2018 – Az. 12 U 88/17, IBRRS 2018: 1881.
[966] Anschaulich: Genschow/Stelter, 2013: S. 90 ff.; Althaus, BauR 2012: 362.

Die daraus ableitbare Vergütungshöhe ist eine *finanzielle Behinderungsfolge*. Diese Vorgehensweise ist jedoch aufgrund ihrer pauschalen Sachverhaltsschilderung in der Fachliteratur sehr umstritten (siehe *Kapitel 4.4.8*).

4.2.6 Ansprüche wegen Bauzeitverlängerung nach § 6 Abs. 6 VOB/B

In § 6 Abs. 6 VOB/B sind zwei Anspruchsgrundlagen enthalten, die der Auftragnehmer aus einer Behinderung gem. § 6 Abs. 2 VOB/B ableiten kann. Zum einen handelt es sich um den ***Schadensersatzanspruch***, geregelt in § 6 Abs. 6 Satz 1 VOB/B, und zum anderen um den ***Entschädigungsanspruch***, geregelt in § 6 Abs. 6 Satz 2 VOB/B. Hintergründe zum Schadensersatzanspruch gem. §§ 280, 286 BGB und zum Entschädigungsanspruch gem. § 642 BGB werden ausführlich in den *Kapiteln 4.1.5* und *4.1.6* thematisiert. Die Ansprüche aus § 6 Abs. 6 VOB/B bauen weitestgehend darauf auf. Im folgenden Text wird daher nur kurz auf die VOB/B-Regelungen eingegangen.

Voraussetzungen:

Beide Ansprüche setzen voraus, dass eine *Behinderung* vorliegt, die

- aus dem Risikobereich des Auftraggebers gem. § 6 Abs. 2 Nr. 1a) VOB/B stammt
- und dem Auftraggeber i. S. v. § 6 Abs. 1 VOB/B bekannt ist.[967]

Während der Auftraggeber im VOB-Werkvertrag seine Schadensersatzansprüche über § 6 Abs. 6 VOB/B weiter i. S. d. §§ 280, 286 BGB fordern kann,[968] werden die Schadensersatzansprüche des Auftragnehmers aus §§ 280, 286 BGB abschließend durch § 6 Abs. 6 VOB/B ersetzt.[969] Der Auftragnehmer kann aber weiterhin einen Schadensersatzanspruch aus § 6 Abs. 6 Satz 1 VOB/B wegen einer Bauzeitverlängerung verlangen. Neben dem Eintritt einer Behinderung muss er ein dafür ursächliches *Verschulden* bzw. *vertragswidriges* Verhalten des Auftraggebers nachweisen können.

Des Weiteren ermöglichen die Tatbestandsvoraussetzungen aus § 6 Abs. 1, 2 VOB/B aber auch *verschuldensunabhängige* Entschädigungsansprüche aus § 6 Abs. 6 Satz 2 VOB/B, die auf § 642 BGB verweisen.[970] Diese „besondere Kombination" aus Schadensersatz- und Entschädigungsanspruch inkl. Behinderungsanzeige ist in BGB-Verträgen nicht vorgesehen.

Anspruchshöhe:

Beim Schadensersatzanspruch ist der nachweislich entstandene *Schaden*[971] mithilfe der ***Differenzhypothese***[972] zu ermitteln. Dazu muss die auf eine Behinderung zurückzuführende

---

[967] Vgl. Thode, ZfBR 2004: 220.
[968] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 49.
[969] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 30.
[970] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 127; Genschow/Stelter, 2013: S. 42.
[971] Siehe „Schaden" in *Kapitel 4.4.2*.
[972] Die *Differenztheorie* baut auf den Vergleich zweier Güterlagen auf. Bei der Bewertung von Bauablaufstörungen werden die „Schadenspositionen" aus dem *ungestörten Soll-Bauablauf* (als erste Güterlage) den „Schadenspositionen" des *gestörten Ist-Bauablaufs* (als zweite Güterlage) gegenübergestellt. Die Differenz ergibt den *Schaden*. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 886. Dagegen äußert *Flume*, dass § 249 Absatz 1 BGB nicht auf einen Vermögensvergleich abstellt. Es kommt vielmehr darauf an, dass der Ersatzpflichtige einen Zustand „herzustellen" hat, der hypothetisch ohne den zum Ersatz verpflichtenden Umstand eingetreten wäre. Vgl. *Flume in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 249, Rdn. 39. Näheres in *Kapitel 4.4.2*.

verlängerte Bauzeit bewiesen werden. Mit einem Soll-Ist-Vergleich sind die tatsächlichen Mehrkosten herauszuarbeiten.

Im Gegensatz dazu ist für die Höhe eines Entschädigungsanspruchs ein zusätzlicher Zeitbedarf aus einer Behinderung nachzuweisen. § 642 BGB zielt auf die (angemessene) Verzugsdauer – also ohne die Berücksichtigung etwaiger Folgewirkungen – ab (siehe *Kapitel 4.1.6*).[973] Wie beim Vergütungsanspruch erfolgt eine Fortschreibung der zeitabhängigen Kostenanteile oder der entschädigungsrelevanten Kostenposition.[974] Das heißt, im Falle einer Fortschreibung sind die Kostenansätze aus der Urkalkulation zu entnehmen.[975] Die zeitunabhängigen Preisanteile aus Wagnis und Gewinn bleiben außen vor.

4.3 Zusammenfassung – zeitabhängige Ansprüche des Auftragnehmers

Im vorausgegangenen Text wurden vorwiegend die materiellen Ansprüche des Auftragnehmers *wegen einer Bauzeitverlängerung* aus gestörten Bauabläufen thematisiert, die nach Vertragserfüllung (neben der Leistung) bestehen können. Sie werden als ***zeitabhängige Ansprüche*** (des Auftragnehmers) bezeichnet und folgendermaßen zusammengefasst:

1. ***Monetäre Ansprüche*** *als Ausgangssituation für finanzielle Behinderungsfolgen*:

- ***Vergütungsanspruch (mit Anordnung)*** nach §§ 1 Abs. 3, 2 Abs. 5 VOB/B oder §§ 1 Abs. 4, 2 Abs. 6 VOB/B (resp. §§ 650b, 650c BGB),
- ***Vergütungsanspruch (ohne Anordnung)*** nach § 2 Abs. 3 oder 8 VOB/B,
- ***Schadensersatzanspruch*** nach § 6 Abs. 6 Satz 1 VOB/B (resp. §§ 280, 286 BGB),
- ***Entschädigungsanspruch*** über § 6 Abs. 6 Satz 2 VOB/B (resp. § 642 BGB),
- ***Anspruch auf Ersatz von Mehraufwendungen*** nach § 304 BGB.

2. Und/oder ***fristverlängernde Ansprüche*** *für zeitliche Behinderungsfolgen*:

- ***Fristverlängerungsanspruch*** nach § 6 Abs. 2-4 VOB/B (bzw. *Störung der Geschäftsgrundlage* gem. §§ 242, 313 BGB).

Generell können bei der Verlängerung von Vertragsterminen monetäre Ansprüche erhoben werden.[976] Unter Vernachlässigung von § 304 BGB haben alle zeitabhängigen Ansprüche gemein, dass ihre jeweilige Anspruchshöhe, sei es die Verlegung des Fälligkeitstermins und/oder zeitabhängige Mehrkosten, auf einen zeitlichen Mehraufwand zurückgeführt werden muss, der aufgrund einer Behinderung entstanden ist.[977] Hieraus kann der Auftragnehmer je nach Einzelfall fristverlängernde Ansprüche und/oder monetäre Ansprüche ableiten.[978] Diese *Bauzeitverlängerung* ist durch die *Gegenüberstellung* zwischen

[973] Vgl. BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751. Die Begrifflichkeiten „Schaden“ oder „Vergütung“ sind beim Anspruch auf Entschädigung eher ungeeignet. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 753-754.
[974] Vgl. BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751.
[975] Vgl. OLG München, Beschluss vom 02.09.2014 – Az. 27 U 2924/14 Bau, IBRRS 2017: 4001. Nachfolgend: BGH, Beschluss vom 19.07.2017 – Az. VII ZR 297/14, IBRRS 2017: 4000 (Nichtzulassungsbeschwerde zurückgewiesen).
[976] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 658.
[977] Siehe *Kapitel 4.2.3*.
[978] Vgl. Zanner/Saalbach/Viering, 2014: S. 104; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 658. Siehe auch Aufzählung der *zeitabhängigen Ansprüche* im vorliegenden Kapitel.

der geplanten Soll-Bauzeit und der tatsächlichen Ist-Bauzeit als Zeitdifferenz, *unter Berücksichtigung der eingesetzten Produktivitätsfaktoren*, zu messen (siehe *Kapitel 8*).

Durch eine Bauzeitverlängerung kann zwar ein ursprünglich vereinbarter Fertigstellungstermin überschritten werden. Allerdings ist ein solcher Umstand keine zwingende Voraussetzung für einen *monetären Anspruch*. Vielmehr kommt es bei der Geltendmachung der daraus ableitbaren Mehrkosten auf einen tatsächlichen und nachweisbaren Mehraufwand an, der in der Risikosphäre des Auftraggebers liegt.[979] *Kapellmann et al*. fassen die Voraussetzungen für monetäre Ansprüche in einem pragmatischen Satz zusammen: „*Die Tatsache, dass die Stillstandszeit später aus anderen Gründen wieder aufgeholt werden kann, berührt nicht die Tatsache, dass einmal entstandene Stillstandskosten – ebenso wie ausgegebenes Geld – endgültig „verloren" sind*."[980] Folglich können solche auftraggeberseitigen Behinderungen monetäre Ansprüche verursachen, die einen geschuldeten Fertigstellungstermin nicht gefährdet haben und daher einen fristverlängernden Anspruch ausschließen. Ähnlich verhält es sich mit jenen Situationen, bei denen ein behinderungsbedingter zeitlicher Mehraufwand in geleisteten Arbeitsstunden „versteckt" ist. Dies gilt besonders für Bauzeitverlängerungen, die durch eine *Beschleunigung* aufgefangen werden.

Im Falle einer Beschleunigung ist ein Hauptaugenmerk auf den Verzehr und die Schaffung von Pufferzeiten zu legen. Grundsätzlich sind die in den Vertrag eingebrachten oder erarbeiteten Pufferzeiten als zusätzliche, nicht genutzte Kostenfaktoren des Auftragnehmers anzusehen,[981] solange sie nicht für die vertraglich vereinbarte Leistungserfüllung aufgebraucht oder vertraglich für den Auftraggeber vorgesehen wurden.[982] Daher stehen Pufferzeiten in erster Linie dem Auftragnehmer zu – diese Zeitreserven sind seine Ressourcen, die er vorrangig im Rahmen seiner Disposition aufbrauchen kann.[983] Falls der Auftraggeber die vorhandenen Pufferzeiten für sich in Anspruch nimmt, um eine von ihm verschuldete Behinderung auszugleichen, muss er damit rechnen, dass dem Auftragnehmer finanzielle Nachteile entstehen. Darum kann der Auftragnehmer in solchen Fällen monetäre Ansprüche fordern.[984] Monetäre Ansprüche bleiben auch dann bestehen, wenn der Auftragnehmer aufgrund einer auftraggeberseitigen Behinderung eine eigenständige oder angeordnete Beschleunigung einleiten muss, um den Fertigstellungstermin noch vertragsgemäß einzuhalten.

Roquette et al. erläutern, dass dieses Prinzip ebenso für Beschleunigungen zu berücksichtigen ist, die nach einer bereits erfolgten Fristverlängerung stattfinden und zwischen dem ursprünglichen sowie dem neuen verlängerten Vertragstermin liegen.[985] Die vom Auftragnehmer veranlassten Beschleunigungen sind durch die Schadensminderungspflicht *begrenzt*. Die Kosten einer Beschleunigung dürfen nicht die absehbaren Kosten wegen einer Bauzeitverlängerung überschreiten. Entgegen *Treu und Glauben* darf sich der Auftragnehmer nicht infolge einer Beschleunigung vertragswidrig bereichern.

---

[979] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 647.
[980] Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1482.
[981] Vgl. Tiesler, 2018: S. 212.
[982] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 25-26; *Funke in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 1, Rdn. 102.
[983] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 613. Siehe auch *Kapitel 4.4.5*.
[984] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 614-616.
[985] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 844.

Die vorausgegangenen Beschreibungen verdeutlichen das Risiko des Auftragnehmers. Er hat die Kosten für eine eigenmächtig eingeleitete Beschleunigung selbst zu tragen, wenn keine Behinderung für eine solche Maßnahme vorausgegangen ist.[986]

Um Klarheit in der Abrechnung einer Bauleistung zu schaffen, betonen *Vygen und Joussen*, dass die Pufferzeit und der zu vergütende Mehraufwand herauszuarbeiten sind.[987] Insgesamt ist zu beachten, dass bei monetären Ansprüchen (unter Vernachlässigung von § 304 BGB) eine Anspruchskonkurrenz vorliegt. Das heißt, diese Ansprüche stehen in einem „Entweder-oder-Verhältnis" zueinander, so dass entweder nur ein Schadensersatz-, Entschädigungs- oder ein Vergütungsanspruch auf eine nachzuweisende Behinderung gefordert werden kann.[988]

4.4 Nachweisführung im Bauprozess

4.4.1 Allgemeines zum Zivilprozess

In *Bauprozessen* kommt es regelmäßig auf die ***Darlegung*** gestörter Bauabläufe an. Die sog. ***Darlegungslast*** beschreibt das Risiko, ob ein *Streitgegenstand*[989] durch eine Partei konkret genug verdeutlicht werden konnte,[990] um das Gericht bzw. den Richter vom Wahrheitsgehalt des jeweiligen Vortrags zu *überzeugen*. Zum Streitgegenstand gehören alle ***konkreten***

---

[986] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 614.

[987] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 615.

[988] Vgl. Thode, ZfBR 2004: 215; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 872 ff.; *Funke in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 1, Rdn. 65; Leinemann, NZBau 2009a: 564.

[989] Nach § 253 Abs. 2 Nr. 2 ZPO muss die ***Klageschrift*** „[…] *die bestimmte Angabe des Gegenstandes und des Grundes des geltend gemachten Anspruchs sowie einen bestimmten Antrag enthalten* […]". Aus dem Wortlaut der Norm lässt sich im Allgemeinen der Begriff des ***Streitgegenstands*** ableiten. Dieser ist allerdings umstritten. Nach heutiger Meinung wird von einem *zweigliedrigen Streitgegenstandsbegriff* ausgegangen. Vgl. *Musielak in* Musielak/Voit, 2018: Einleitung, Rdn. 68-76; *Saenger in* HK-ZPO, 2017: Einführung, Rdn. 97-112; *Becker-Eberhard in* MüKoZPO, 2016: Vorbem. § 253, Rdn. 32-40; *Wendtland in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 2, Rdn. 3-4. Demgemäß setzt sich der Sinngehalt des *Streitgegenstands* aus dem ***Klageantrag*** *und* den ***Klagegründen*** zusammen. Vgl. *Wendtland in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 2, Rdn. 4. Herleitung: Der Kläger reicht an das Gericht einen *bestimmten Antrag* (Klageantrag) ein und *begründet* diesen mit einer *konkreten Lebenssachverhaltsschilderung* bzw. mit einem *behaupteten Tatsachenkomplex* (Klagegründe). Vgl. *Becker-Eberhard in* MüKoZPO, 2016: Vorbem. zu § 253, Rdn. 33. Mit dieser Vorgehensweise erhebt er einen ***prozessualen Anspruch*** auf eine bestimmte Rechtsfolge, die das Gericht im (wirtschaftlichen) Interesse des Klägers entscheiden soll. Vgl. *Wendtland in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 2, Rdn. 4. Mit der Nennung des Grunds (bzw. der Klagegründe) für eine beantragte und zugleich *beanspruchte Gerichtsentscheidung* ergibt sich der Begriff der ***Anspruchsbegründung***. Vgl. *Foerste in* Musielak/Voit, 2018: ZPO § 253, Rdn. 25, 27 i. V. m. *Elzer in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 304 Rdn. 25-27. Der *prozessuale Anspruch* ist nicht mit dem *materiellen Anspruch* gem. § 194 BGB zu verwechseln (siehe *Kapitel 4.1.1*)! Diese Unterscheidung gilt grundsätzlich; es ist egal, ob die einerseits beanspruchten und andererseits geforderten Rechtsfolgen in einem Zusammenhang stehen. *Saenger* begründet die Unterscheidung damit, dass, wenn dem nicht so wäre, eine unbegründete Klage fälschlicherweise keinen Streitgegenstand mehr hätte. Vgl. *Saenger in* HK-ZPO, 2017: Einführung, Rdn. 100. Weiterhin ergibt sich die Bestimmtheit des *bestimmten Antrags* aus der Sache, d. h., aus dem einschlägigen *materiellen Recht*, z. B. aus den Bestimmungen der VOB/B, und aus den *Umständen des Einzelfalls*, wie z. B. Behinderungssachverhalte im gestörten Bauablauf. Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 253, Rdn. 57. Mehr dazu: *Becker-Eberhard in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 253, Rdn. 88-155. *Forste* beschreibt, dass der Wortlaut „Gegenstand" nicht der *Streitgegenstand* sein kann, da dieser in der Norm *gesondert* von *Anspruch* und *Antrag* aufgeführt wird. Daher bekräftigt er: Nach „[…] *dem heute vorherrschenden Streitgegenstandsbegriff ist der „Gegenstand" daher praktisch bedeutungslos.*" *Foerste in* Musielak/Voit, 2018: ZPO § 253, Rdn. 24.

[990] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 277.

Tatsachen, die den Geschehensablauf eines individuellen ***Lebenssachverhalts***[991] bilden, um die prozessualen Ansprüche des Klägers auf ein materielles Recht begründen zu können.[992]

Ein Vortrag muss auf Fakten basieren und das Streitthema ***konkret bzw. substantiiert*** benennen, damit die Tatbestandsvoraussetzungen einer zu bezeichnenden materiellen Norm erkennbar und schlüssig ausgefüllt sind.[993] Dazu muss es sich von anderen Streitgegenständen abgrenzen können, damit die Subsumierung des Richters gelingt und der Gegenpartei mindestens die Möglichkeit zu einer Stellungnahme gegeben wird. Rechtsfragen sind hingegen durch das Gericht zu klären.

Zur Glaubhaftmachung der in einer Klage vorgebrachten und zunächst behaupteten Tatsachen erfolgt regelmäßig eine richterliche Schlüssigkeitsprüfung.[994] *Bacher* beschreibt, dass es für die Schlüssigkeit einer Klage unerheblich ist, […] *wie wahrscheinlich die Darstellung ist, und ob sie auf eigenem Wissen oder einer Schlussfolgerung aus Indizien besteht*. […] *Die Angabe näherer Einzelheiten ist* [grundsätzlich] *nur dann erforderlich, wenn diese für die Rechtsfolgen von Bedeutung sind*."[995]

Bestreitet der Beklagte weiterhin die Schlüssigkeit relevanter Tatsachen, erfolgt eine Erheblichkeitsprüfung über die Wirksamkeit seiner Sichtweisen.[996] Hieraus ergibt sich die ***Substantiierung***, bei der die Parteien im Verlauf der Verhandlungen gehalten sind, die *Inhalte* ihrer Vorträge *zu konkretisieren* bzw. zu substantiieren.[997] Der erforderliche Grad der Substantiierung richtet sich nach Vortrag und Gegenvortrag beider Parteien.[998] Für die Substantiierung ist daher der jeweilige Einzelfall entscheidend. Unklarheiten bei Vortrag und Gegenvortrag können dazu führen, dass ein *Beweis angetreten* werden muss;[999] anderenfalls kann der Klage auch ohne *Beweisaufnahme* stattgegeben oder sie aufgrund fehlender Schlüssigkeit als *unbegründet* abgewiesen werden.[1000]

Die *Darlegungslast* ist von der *Beweislast* abzugrenzen, da sie mit einer obliegenden Nachweisbarkeit oder Nichtnachweisbarkeit behaupteter Tatsachen verbunden ist.[1001] Die *Beweislast* geht mit dem *Risiko* derjenigen Partei einher, die den Zivilprozess *verliert*, wenn sie einen *Beweis* zu einer strittigen Tatsache *nicht* liefern kann. Die Einzelheiten zur Beweisführung sind juristische Themen des Prozessrechts, die in der einschlägigen Fachliteratur nachgelesen werden können.

Bedeutsam ist der Informationsgehalt der durch die Parteien in den Zivilprozess eingebrachten Tatsachenbehauptungen, über die der Streitgegenstand nicht nur in der Sache

---

[991] „*Der Terminus Lebenssachverhalt dürfte am besten geeignet sein; er deutet an, dass solche Tatsachen zum Klagegrund gehören, die nach den Maßstäben des Lebens eine Einheit bilden*." *Becker-Eberhard in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 253, Rdn. 75. Folglich kommt es auf die Systemanalyse einer in der Vergangenheit befindlichen Gegebenheit an (siehe *Kapitel 2.1*).

[992] Vgl. Musielak, NJW 2000: 3599; *Becker-Eberhard in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 253, Rdn. 80. Ergänzend: *Kapitel 4.1.1*.

[993] Vgl. Beuermann, IBR 2018: 484.

[994] Vgl. *Drescher in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 935, Rdn. 12. Siehe auch *Kapitel 4.4.2*.

[995] *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 253, Rdn. 22.

[996] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 253, Rdn. 25.

[997] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 284, Rdn. 38.

[998] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 284, Rdn. 38.

[999] Vgl. *Saenger in* HK-ZPO, 2017: ZPO § 284, Rdn. 1-36.

[1000] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 253, Rdn. 23, 25, 26.

[1001] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 277.

beschrieben, sondern auch begrenzt wird. Das Gericht darf hier *dem Kläger* nicht mehr gewähren, als dieser beantragt hat.[1002] In der Zivilprozessordnung weitet sich dieser *Dispositionsgrundsatz* auf beide Streitparteien aus, indem sie den Inhalt und Gang des Verfahrens, unter Berührung der richterlichen Hinweis- und Aufklärungspflichten, anhand des Streitgegenstands bestimmen.[1003] Dementsprechend kann es z. B. beim Bauprozess auf die einschätzende Bewertung durch den Tatrichter ankommen, „[…] *inwieweit eine konkrete Behinderung von bestimmter Dauer zu einer Verlängerung der gesamten Bauzeit geführt hat, weil sich Anschlussgewerke verzögert haben*."[1004]

Neben dem Dispositionsgrundsatz gilt u. a. der *Beibringungsgrundsatz*, der besagt, dass es dem Kläger sowie dem Beklagten obliegt, auf welches Sachverhaltsmaterial bzw. welchen „Tatsachenstoff" sie ihre Behauptungen in einem Zivilprozess stützen.[1005] Dafür sind alle Tatsachen, die inhaltlich nicht zum Klagebegehren des Streitgegenstands passen, für die Schilderung des entscheidungsrelevanten Lebenssachverhalts ungeeignet.[1006] „*Gegen den Beibringungsgrundsatz verstößt es, wenn die Partei wegen wesentlicher anspruchsbegründender Tatsachen pauschal auf die Anlagen verweist oder gar hofft, der Richter werde von sich aus die Anlagen auf solche Tatsachen hin durchsuchen. Anlagen können lediglich zur Erläuterung des schriftlichen Vortrags dienen, diesen aber nicht ersetzen.*"[1007]

Um diesen Verfahrensgrundsätzen Genüge zu leisten, schreibt *Mertins*, dass der durch den Kläger geschilderte Sachverhalt unbedingt auf die maßgebende Norm – in Abhängigkeit vom Stand des Verfahrens – „zugespitzt" werden sollte, damit dieser nicht zu sehr von seinem Klagebegehren abweicht.[1008]

Das deutsche Zivilprozessrecht geht, im Gegensatz zu einigen ausländischen Verfahrensgrundsätzen, davon aus, „[…] *dass keine Partei dazu verpflichtet ist, ihrem Prozessgegner zum Sieg zu verhelfen und ihm Informationen preiszugeben, über die der Gegner nicht schon selbst von sich aus verfügt*."[1009] Folglich ist die gerichtliche Entscheidung über eine strittige Tatsachenbehauptung von der subjektiven Überzeugung des Richters abhängig. *Prütting* betont, dass gerade bei einem möglichen Beweis nicht eine absolute naturwissenschaftliche und objektive Wahrheit im Vordergrund steht, da „[…] *ein solches Ziel niemals erreichbar wäre*. […] *Vielmehr bedeutet Wahrheit im Verfahren immer eine „prozessordnungsgemäß gewonnene Wahrheit"*."[1010] Diese Definition schließt nicht die Wahrheitspflicht der Parteien aus. Sie dürfen nicht bewusst unwahre und/oder unvollständige Aussagen treffen, um sich ggf. Vorteile zu verschaffen.[1011] *Brand* nennt *implizit* die wesentlichen Unterschiede zwischen einer Simulation zur Nachweisführung über gestörte

[1002] Vgl. *Elzer in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 308, Rdn. 1.
[1003] Vgl. *Rauscher in* MüKoZPO, 2016: Einleitung, Rdn. 312-314, 318, 325; *Musielak in* Musielak/Voit, 2018: Einleitung, Rdn. 35.
[1004] BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1005] Vgl. *Saenger in* HK-ZPO, 2017: Einführung, Rdn. 69; *Rauscher in* MüKoZPO, 2016: Einleitung, Rdn. 328, 333; *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 284, Rdn. 10.
[1006] Vgl. Musielak, NJW 2000: 3599. Vergleichbares trifft auch auf den Beklagtenvortrag zu. So sind Tatsachenbehauptungen außerhalb des Streitgegenstands nicht entscheidungserheblich. Vgl. *Rauscher in* MüKoZPO, 2016: Einleitung, Rdn. 333.
[1007] Dölling, NJW 2013: 3122.
[1008] Vgl. Mertins, NJ 2009: 444.
[1009] Brand, NJW 2017: 3558.
[1010] *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 284, Rdn. 8.
[1011] Vgl. *Fritsche in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 138, Rdn. 1.

Bauabläufe vor deutschen Zivilgerichten und für Planungs- oder Steuerungsaufgaben (für die Arbeitsvorbereitung oder Baufortschrittskontrolle):

„*Die Rechtswissenschaft stellt – wie alle Geisteswissenschaften – keine Erkenntnistheorie zur Verfügung, die naturwissenschaftliche Wahrheiten oder Erkenntnisse hervorzubringen vermag, sondern vielmehr eine Methode, um Konflikte zu lösen, die innerhalb einer Gesellschaft entstehen können. Diese Methode soll sicherstellen, dass Rechtsfrieden hergestellt und dass subjektive Rechte wahrgenommen werden können, soweit sie nicht die subjektiven Rechte anderer verletzen*."[1012]

Zusammenfassend kann eine naturwissenschaftliche Aufarbeitung der Sachverhalte für den entscheidungsrelevanten Verlauf eines Zivilprozesses ausschlaggebend werden. Nämlich genau dann, wenn sie zum einen auf die momentane Prozesslage – hinsichtlich der im Raum stehenden Rechtsfragen – abzielt und zum anderen für den weiteren Prozessverlauf wesentlich ist. In diesem *Zusammenhang* kommt es allein auf die ***Logik in der Sache*** an. Das bedeutet jedoch nicht, dass zur Darlegung alle naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten absolut vollständig aufzuarbeiten sind. Vielmehr bedarf es einer objektiven Realitätsnähe, die einzig und allein den im Zivilprozess genannten Tatsachen gerecht werden muss.

4.4.2 Grundlagen des Kausalitätsnachweises

Im Zivilprozess sind Kausalitätsnachweise zur Überzeugungsbildung des Richters behilflich. Mit einem Kausalitätsnachweis ist der Ursachenzusammenhang zwischen einer Verletzungshandlung und dem daraus resultierenden Verletzungserfolg herauszuarbeiten, damit einerseits der Streitgegenstand aufgearbeitet und andererseits eine entsprechende Haftungszurechnung zu einer bestimmten Streitfrage getroffen werden kann.

Unter objektiven Bewertungskriterien muss für die ausstehende Zurechnung eine Ursache *geeignet* sein, damit sie die beanspruchte Rechtsfolge seitens des Klägers, z. B. beim Schadensersatzanspruch den ***Schaden***[1013], zusammenhängend belegen kann.[1014] Vorwiegend ist die Frage zu klären, ob ein bestimmter Anspruch gegenüber einer bestimmten Person besteht und in welcher Höhe bzw. in welchem Umfang die daraus resultierenden Rechtsfolgen anzusetzen sind.[1015] Außerdem dient der Kausalitätsnachweis zur klaren

[1012] Brand, NJW 2017: 3558.

[1013] Der ***Schaden*** erfolgt direkt aus dem *prozessualen Anspruch* des *Streitgegenstands* und ist mit wirtschaftlichen Nachteilen in Verbindung zu setzen, die i. d. R. monetäre Aspekte betreffen. Nach gängiger Ansicht besteht der (materielle) „Schaden" eines gestörten Bauablaufs entweder aus „Mehrkosten" und/oder aus „Zeit" bzw. „Zeitverlusten". Dieser Schadensbegriff wird insbesondere hinsichtlich des Auftragnehmers angewandt. Die „Zeit" ist dann ein Schaden, wenn der Auftragnehmer unverschuldet zusätzliche Leistungszeit bis zur Fälligkeit seiner Leistung benötigt und er hieraus einen Fristverlängerungsanspruch ableiten kann. Hinsichtlich der VOB/B können sich „Mehrkosten" aus Schadensersatz-, Entschädigungs- und Vergütungsansprüchen ergeben, die allesamt aus einem verlängerten Produktionsprozess entstehen. Die Unterscheidung zwischen Zeit und Kosten ist darin begründet, dass die jeweiligen Ansprüche in der VOB/B voneinander getrennt geregelt sind. *Bacher* beschreibt etwas allgemeiner, dass ein Schaden „[…] *eine unfreiwillige Einbuße am Vermögen oder an anderen Rechtsgütern* [ist]." *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 287, Rdn. 2. Hierunter fällt auch die Bauzeit, die allerdings als ein Kostenfaktor betrachtet werden kann. Vgl. Duve/Richter, BauR 2006: 608, Fn. 3.

[1014] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 13.

[1015] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 13.

Abgrenzung von nicht relevanten Randthemen oder nebeneinander bestehenden Ansprüchen des zu untersuchenden Lebenssachverhalts.

Ausgehend von einem *Schadensersatzanspruch* soll der Kausalitätsnachweis dazu beitragen, dass der Geschädigte seine Nachteile durch den Schädiger als *sekundäre Vertragspflicht* ersetzt bekommt.[1016] Beispielsweise ist ein Gläubiger so zu stellen, wie er ohne Verzugsschaden stehen würde, damit ihm sämtliche Verzögerungsschäden, die bis zum endgültigen Ausbleiben der Leistung entstanden sind, als Ausgleich zugutekommen.[1017] Ein solcher Schadensersatz ist damit keine Sanktion, sondern vielmehr eine Verbindlichkeit zur „Wiedergutmachung" des erlittenen Nachteils.

Der Schaden ist vollumfänglich von demjenigen zu ersetzen, der ihn herbeiführte. Art, Inhalt und Umfang des Schadens sind nach der *Differenztheorie* i. S. d. §§ 249 ff. BGB zu ermitteln (siehe *Kapitel 4.2.7*).[1018] Hierbei ist jeder Einzelfall auszuwerten.[1019] *Schulze* schreibt, dass sich beim Schadensersatzanspruch „[…] *das subjektive Recht oder* ***das Rechtsgut, aus dessen Verletzung der Schaden hervorgegangen ist****, in anderer Gestalt fort*[setzt]*, damit dessen Wertgehalt dem Geschädigten erhalten bleibt.* [Dementsprechend] *bildet der objektive Wert (Verkehrswert) den Mindestschaden, in dessen Höhe der Geschädigte unabhängig von der sonstigen Berechnungsweise des Ersatzes regelmäßig Ersatz verlangen kann.*"[1020] Dazu muss der Geschädigte darlegen und ggf. später beweisen können, inwieweit das eigene Verhalten als ***Mitverschulden*** gem. § 254 BGB zurechenbar ist, falls er entsprechende Forderungen erhebt.[1021] Das heißt, dass ein Auftragnehmer vortragen muss, dass er sich nicht durch ein etwaiges Unterlassen oder Tun *selbst geschädigt* hat.[1022] Er muss aufzeigen, ob er in der Lage war, einen Verzögerungsschaden zu mindern oder gar vollständig abzuwenden. Zum Beispiel darf der Auftragnehmer seine Arbeiten nicht einfach einstellen, wenn eine durch den Auftraggeber verursachte Behinderung vorliegt, solange er dafür andere Arbeiten hätte vorziehen können. Hieraus geht die ***Schadensminderungspflicht*** hervor.[1023] Die Norm § 254 BGB ist damit eine Ausprägung des Grundsatzes von *Treu und Glauben*, § 242 BGB.[1024]

[1016] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 2. Siehe „sekundäre Vertragspflicht" in *Kapitel 4.1.1*.
[1017] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 286, Rdn. 30a.
[1018] Vgl. *Stadler in* Jauernig, 2018: BGB § 280, Rdn. 3, 22, 49-55; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 1-2; *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 762.
[1019] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: BGB § 631, Rdn. 326.
[1020] *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 2.
[1021] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 254, Rdn. 13. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249–253, Rdn. 25; *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 280, Rdn. 153; *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 286, Rdn. 121, 125-126, 171.
[1022] Vgl. *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 254, Rdn. 1-4.
[1023] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1455 ff.; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 1184. „*Generell sind Vertragspartner aneinander verpflichtet alles zu tun, was Leistungserfolg herbeiführt, und zu unterlassen, was diesen beeinträchtigen oder gefährden könnte* […]". *Mansel in* Jauernig, 2018: BGB § 631, Rdn. 5.
[1024] Vgl. *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 254, Rdn. 1. § 6 Abs. 3 VOB/B ist eine Ausprägung des § 254 BGB. Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1455. Die Regelung des § 6 Abs. 3 VOB/B ist auf Behinderungen ausgerichtet und somit übergreifend für alle Behinderungsfolgen maßgeblich.

Die Darlegung der erhobenen Ansprüche gliedert sich in einen zweiteiligen, aufeinander aufbauenden Kausalitätsnachweis; einerseits die ***haftungsbegründende Kausalität*** nach § 286 ZPO und andererseits die ***haftungsausfüllende Kausalität*** nach § 287 ZPO (siehe *Abbildung 4-7*).[1025]

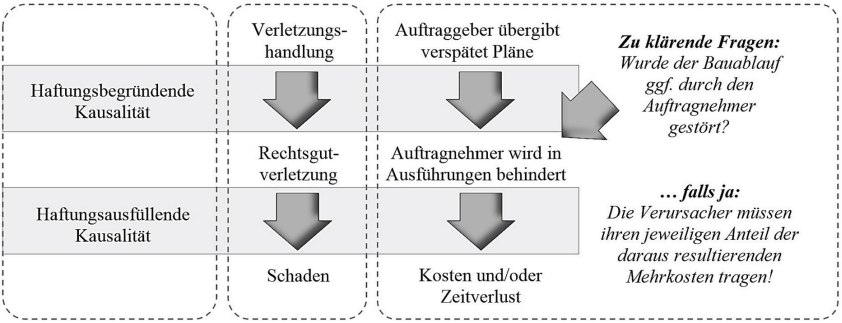


Abbildung 4-7: Adäquate haftungsbegründende und haftungsausfüllende Kausalität[1026]

Im ersten Schritt stellt sich die Frage, ob eine bestimmte Partei überhaupt für einen möglichen Schaden in Regress genommen werden kann. Diese Fragestellung ist eine Aufgabe des ***Haftungsrechts***, die mithilfe der *haftungsbegründenden Kausalität* nach § 286 ZPO gewürdigt wird.[1027] Wie *Abbildung 4-7* zeigt, ist mithilfe der haftungsbegründenden Kausalität ein kausaler Zusammenhang zwischen der ***Verletzungshandlung*** des (potentiellen) Schädigers und der beanstandeten ***Rechtsgutverletzung*** herzuleiten.[1028]

Nachdem dieser Nachweis gelingt, folgt im zweiten Schritt die Fragestellung des ***Schadensrechts***, die mit der *haftungsausfüllenden Kausalität* nach § 287 ZPO zu würdigen ist.[1029] Über die haftungsausfüllende Kausalität wird beim Schadensersatzanspruch vornehmlich der Umfang der Ersatzpflicht gem. §§ 249 ff. BGB – also die Höhe des Schadens – ermittelt.[1030] Dieser Nachweis trifft auf den kausalen Zusammenhang zwischen der ***Rechtsgutverletzung*** und der ***Höhe des Schadens*** zu.

§ 286 ZPO regelt das *Beweismaß* sowie die *Beweiswürdigung* aus rechtswissenschaftlicher Sicht.[1031] Im Rahmen der ***freien Beweiswürdigung*** gem. § 286 Abs. 1 ZPO muss das

---

[1025] Vgl. *Lorenz in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 280 Rdn. 78 ff.; *Ernst in* MüKoBGB, 2016: BGB § 280, Rdn. 146; *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 249-253, Rdn. 24; *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 13. Hierbei handelt es sich um *echte monokausale Zusammenhänge* gem. *Kapitel 2.1.6*.

[1026] Eigene Darstellung.

[1027] Vgl. *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 249-253, Rdn. 24-25.

[1028] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 13.

[1029] Vgl. *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 249-253, Rdn. 24-25.

[1030] Vgl. *Oetker in* MüKoBGB, 2016: BGB § 249, Rdn. 1.

[1031] Stichwort: ***Vollbeweis***. Vgl. *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 286, Rdn. 2, 3. Insbesondere kommt es bei Beweisfragen auf die *Schlüssigkeit* und *Erheblichkeit* eines Parteivortrags an, die von der *Darlegungslast* der beweisbelasteten Partei abhängen. In der Regel findet eine entsprechende *richterliche Würdigung* bereits *vor* einem Haupttermin – teilweise ohne Vorbereitung des Haupttermins – statt. Das kann u. U. dazu führen, dass eine erhobene Klage aufgrund der *richterlichen Würdigung* (Schlüssigkeitsprüfung) bereits zu diesem Zeitpunkt durch das Gericht als *unbegründet* abgewiesen wird. Bei solchen Gerichtsentscheidungen sind weitere Beweisfragen „belanglos“ und finden daher nicht mehr statt. Für weitere Einzelheiten wird auf die einschlägige Fachliteratur zur Zivilprozessordnung verwiesen.

Gericht die von den Parteien dargelegten Tatsachenbehauptungen berücksichtigen und dadurch eine Entscheidung treffen, ob diese als wahr oder als unwahr zu bewerten sind.[1032] Hierzu wird geprüft, ob die genannten Gründe ausreichen, um die materiellen Anspruchsvoraussetzungen eines Rechtstexts zu belegen.[1033]

Der Grad der Überzeugung des Gerichts hängt vom ***Beweismaß*** ab, das sich nicht mit mathematischen Methoden ermitteln lässt, weswegen Wahrscheinlichkeitsberechnungen zur Begründung einer Glaubhaftmachung alleine nicht ausreichen.[1034] Das Beweismaß bedarf „[…] *auch keiner absoluten Gewissheit oder „an Sicherheit grenzender" Wahrscheinlichkeit. Erforderlich und ausreichend ist vielmehr ein für das praktische Leben brauchbarer Grad von Gewissheit, der Zweifeln Schweigen gebietet, ohne sie völlig auszuschließen* […]."[1035] Folglich ist die subjektive Entscheidung des Gerichts in Form einer objektiven Bewertung bzw. Zurechnung relevant, **die nicht gegen Naturgesetze, Denk- und Erfahrungssätze verstoßen darf**.[1036]

Im Gegensatz zu den Anforderungen aus § 286 ZPO, die maßgeblich auf die Beweiswürdigung begründeter Tatbestandsmerkmale abzielt, dient § 287 ZPO zur Ermittlung der Entstehung und Höhe eines Schadens.[1037] Voraussetzung für die Anwendung von § 287 ZPO ist die gelungene Nachweisführung des jeweiligen Haftungsgrunds i. S. v. § 286 ZPO.[1038] Während bei der Anwendung von § 286 ZPO das Gericht voll überzeugt werden muss, reduziert § 287 ZPO „[…] *die Anforderungen an die Darlegungslast des Geschädigten* [und zugleich] *das Maß für eine Überzeugungsbildung des Tatrichters*."[1039] Dem Gericht ist erlaubt, den Umfang des Schadens – anhand von greifbaren Ausgangs- und Anknüpfungspunkten – möglichst konkret zu schätzen.[1040] „*Das Gesetz nimmt in Kauf, dass das Ergebnis der Schätzung mit der Wirklichkeit vielfach nicht übereinstimmt; allerdings soll die Schätzung möglichst nahe an diese heranführen* […]."[1041]

Im Zivilrecht unterliegt der Kausalitätsnachweis der ***Adäquanztheorie***, die eine abgeschwächte Form der Zurechnungstiefe gegenüber der ***Äquivalenztheorie*** ist. Die *Äquivalenztheorie* geht zunächst davon aus, dass jedes Verhalten als Handlungsbeitrag gleichwertig – also äquivalent – für den Eintritt eines Schadens ist.[1042] „*Ein vollständiger naturwissenschaftlicher Kausalitätsnachweis unterbleibt jedoch*."[1043] Stattdessen wird die *Conditio-sine-qua-non-Formel* zugrunde gelegt. Ursächlich sind demnach nur diejenigen gleichwertigen Bedingungen, die nicht hinweggedacht werden können, ohne dass zugleich

[1032] Vgl. *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 286, Rdn. 3, 28.
[1033] Vgl. *Saenger in* HK-ZPO, 2017: ZPO § 284, Rdn. 13.
[1034] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 286, Rdn. 2.
[1035] *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 286, Rdn. 1.
[1036] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 286, Rdn. 12-13; *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 286, Rdn. 1.
[1037] Vgl. *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 286, Rdn. 3, 8, 28.
[1038] Vgl. *Motzke in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 4, Teil C, Rdn. 211; *Saenger in* HK-ZPO, 2017: ZPO § 287, Rdn. 3.
[1039] *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 287, Rdn. 1.
[1040] Vgl. *Saenger in* HK-ZPO, 2017: ZPO § 287, Rdn. 14.
[1041] *Saenger in* HK-ZPO, 2017: ZPO § 287, Rdn. 15.
[1042] Vgl. *Flume in* BeckOK BGB, St. 01.05.2018: BGB § 249, Rdn. 285-287; *Oetker in* MüKoBGB, 2016: BGB § 249, Rdn. 103.
[1043] *Oetker in* MüKoBGB, 2016: BGB § 249, Rdn. 103.

der Eintrittserfolg des Schadens entfallen würde.[1044] Bei der *Adäquanztheorie* findet hingegen eine wertende Eingrenzung der Zurechenbarkeit statt.[1045] Ausgangspunkt dafür ist die Überlegung, dass sich kausale Wirkungen rein theoretisch endlos fortschreiben und teilweise zufällig aufsummieren können.[1046] Bei der Zurechenbarkeit eines Verhaltens als Handlungsbeitrag für die Ursächlichkeit eines Schadens „[…] *mag es unbillig erscheinen, dem Schädiger derartige Folgerisiken aufzuerlegen*."[1047] Entsprechend werden bei der Adäquanztheorie nur geeignete Ursachen berücksichtigt, so dass ganz unwahrscheinliche und atypische Kausalverläufe aus dem haftungs- und schadensrechtlich relevanten Ursachenzusammenhang unbeachtet bleiben.[1048]

Der Schadenseintritt darf nicht vom regelmäßigen Verlauf der Dinge abweichen, die nach der Lebenserfahrung vernünftigerweise außer Betracht bleiben würden.[1049] In der Regel wird der ***adäquate Kausalitätsnachweis*** **durch eine nachträgliche objektive Beurteilung eines optimalen Beobachters mit umfassendem Fach- und Erfahrungswissen** durchgeführt.[1050] In der *Ex-post-Beurteilung*[1051] muss der *Ex-ante-Standpunkt*[1052] zum Zeitpunkt des Schadenseintritts nachvollzogen werden,[1053] um die weiteren Auswirkungen annähernd genau zu verifizieren und zu validieren (siehe *Kapitel 2.2.5*). [1054] Grundsätzlich besteht der *adäquate Zurechnungszusammenhang* bei der *haftungsbegründenden Kausalität* sowie der *haftungsausfüllenden Kausalität*.[1055]

4.4.3 Kausalitätsnachweis für zeitabhängige Ansprüche

Im Jahr 2005 bekräftigte der *BGH* ausdrücklich einen Kausalitätsnachweis zur Bewertung von Behinderungen und den daraus ableitbaren Behinderungsfolgen in zwei Grundsatzurteilen.[1056] *Eschenbruch und von Rinteln* heben hervor, dass diese Urteile auf schadensrechtliche Fragestellungen ausgerichtet waren.[1057] Im Sinne der gegenwärtigen Meinungen[1058] bekräftigen sie ebenfalls die generelle Notwendigkeit eines *Kausalitäts-*

[1044] Vgl. *Oetker in* MüKoBGB, 2016: BGB § 249, Rdn. 103 i. V. m. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 14.
[1045] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 14.
[1046] Vgl. *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 249-253, Rdn. 27.
[1047] *Teichmann in* Jauernig, 2018: BGB § 249-253, Rdn. 27.
[1048] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 14 i. V. m. *Oetker in* MüKoBGB, 2016: BGB § 249, Rdn. 110.
[1049] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 14. Diese Aussage zielt zweckmäßig auf einen ***Anscheinsbeweis*** ab. Jedoch werden Kausalitätsnachweise nach der Lebenserfahrung für gestörte Bauabläufe *abgelehnt*. Dennoch besitzen komplexe Bauabläufe sehr variable Wirkungsbeziehungen, so dass aufgrund dieser Umstände auf eine solche Nachweisführung nicht vollständig verzichtet werden kann. Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil A, Rdn. 727-728.
[1050] Vgl. *Schulze in* HK-BGB, 2017: BGB § 249-253, Rdn. 15.
[1051] Nachträgliche Beurteilung eines Wirkungszusammenhangs als *Rekonstruktion*.
[1052] Der zu erwartende Wirkungszusammenhang als *Prognose*.
[1053] Vgl. Langen, BauR 2011: 381.
[1054] *Gnerlich et al.* beschreiben hierzu baubetriebliche Simulationsansätze. Vgl. Gnerlich/Tiesler/Möhring/Franz, 2018: S. 45-56.
[1055] Vgl. *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 6, Rdn. 53.
[1056] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177; BGH, Urteil vom 24.02.2005 – AktZ. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218. Siehe auch *Kapitel 4.4.2.*
[1057] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 405.
[1058] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 405; Drittler, 2017: Rdn. 4:179; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 547-549; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 320; *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1965-1967; Genschow/Stelter, 2013: S. 62-63; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 165 ff.

nachweises[1059], sobald der Auftragnehmer wegen Bauzeitverlängerungen Ansprüche auf Schadensersatz, Entschädigung[1060], zusätzliche Vergütung und/oder einen Anspruch auf Fristverlängerung in einem Gerichtsverfahren fordert.[1061]

Jeder dieser zeitabhängigen Ansprüche setzt individuelle Kriterien voraus, die vom Auftragnehmer zu begründen sind. In Streitfragen muss er beweisen können, dass während seiner Bauausführung ein hindernder Umstand vorlag, der

- *vertraglich* nicht vorgesehen war bzw. nicht im Bau-Soll enthalten ist,
- *terminlich* zu einer objektiven Bauzeitverlängerung führte und
- *inhaltlich* die Tatbestandsvoraussetzungen eines zeitabhängigen Anspruchs erfüllt.

Alle *zeitabhängigen Ansprüche* haben gemein, dass sie nur dann rechtskräftig werden können, wenn die Entstehungsgründe einer Bauablaufstörung **nicht im Risikobereich des Auftragnehmers liegen** und somit die Tatbestandsvoraussetzungen einer *Behinderung* i. S. v. § 6 Abs. 2 VOB/B erfüllt sind. Zudem muss der Auftragnehmer adäquat-kausal nachweisen können, dass

- eine *konkrete* Behinderung *tatsächlich* stattfand, die
- seine Ausführungsprozesse derartig *beeinträchtigte*, so dass hieraus
- eine *Bauzeitverlängerung* entstanden ist, die sich infolge
- eines *objektiven Soll-Ist-Vergleichs* ermitteln lässt.

Am ehesten kann der Auftragnehmer sein Handeln oder Unterlassen über eine produktionsbezogene Betrachtungsweise darlegen, mit der er die Erreichung seiner geplanten Leistungsziele verdeutlicht.[1062] *Aus diesem Grund ist es ratsam, wenn er den Kausalitätsnachweis mithilfe eines produktionsbezogenen Soll-Terminplans führt*, womit er die darauf einwirkenden Behinderungen inkl. der potentiellen baubetrieblichen Auswirkungen aufzeigt und diesen Sachverhalt mit dem tatsächlichen Ist-Bauablauf abgleicht.[1063]

Die Fragestellung, ob der Eintritt einer konkreten Behinderung sich tatsächlich auf den Bauablauf auswirkt, unterliegt der Nachweisführung der *adäquaten haftungsbegründenden Kausalität* gem. § 286 ZPO. Darunter fällt auch die Klärung der Entstehungsgründe von den jeweiligen Behinderungen sowie deren Umfang und *Dauer*.[1064] Beispielsweise ist aufzuzeigen, dass eine Pflichtverletzung, eine Obliegenheitsverletzung oder eine auftrag-

---

[1059] Als Abgrenzung zum Schadensersatzrecht, siehe *Kapitel 4.4.2*, werden teilweise die Bezeichnungen *anspruchsbegründende Kausalität* und *anspruchsausfüllende Kausalität* verwendet. Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 318.

[1060] Der Kausalitätsnachweis ist derzeit wegen einer jüngeren Entscheidung des *BGH* mit der konkreten bauablaufbezogenen Darstellung kritisch in Verbindung zu bringen. Laut *Kögl* dürfte sich durch „[…] *die Einschränkung des Anwendungsbereichs von § 642* [BGB] *auf Entschädigung nur für die Dauer des Verzugs* […] *das Problem der bauablaufbezogenen Betrachtung nach diesseitiger Auffassung allerdings weitgehend erledigt haben.*" *Kögl in* BeckOGK, St. 01.07.2018: BGB § 642, Rdn. 76. Dennoch hat der *BGH* in seiner Entscheidung die Erforderlichkeit einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung im Allgemeinen nicht beantwortet. Vgl. BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751. Weitere Aspekte zu diesem Thema folgen in *Kapitel 4.1.6*, *Kapitel 4.4.7* und *Kapitel 4.5*.

[1061] Vgl. Thode, ZfBR 2004: 214.

[1062] Vgl. Schiffers, 1998: S. 275.

[1063] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 1-3; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1203, 1243; Thode, ZfBR 2004: 214; Schiffers, 1998: S. 293 ff. Siehe *Kapitel 4.2.5*.

[1064] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177; BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218.

geberseitige Anordnung für eine bestimmte Behinderung ursächlich war. Vereinfacht formuliert muss geklärt werden, ob z. B. ein Bauplan vertragsgerecht vorlag oder nicht.[1065] Jedoch reicht das alleinige Aufzählen einer unterlassenen Mitwirkung zur Begründung einer Haftung als Nachweis nicht aus; vielmehr muss erkenntlich sein, welche Bereiche des Bauablaufs durch eine Handlung oder Unterlassung beeinträchtigt werden.[1066]

Dazu ist der konkrete Ursachenzusammenhang zwischen einer Behinderung und einer unmittelbaren Verzögerung im Einzelfall darzulegen und ggf. zu beweisen.[1067] Beispielsweise muss für Fristverlängerungsansprüche gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B dargelegt werden, dass die tatsächliche Verschiebung eines vertraglich vorgesehenen Fertigstellungstermins auf eine Bauzeitverlängerung zurückzuführen ist, deren Ursache in einem bestimmten hindernden Umstand liegt. Hierfür ist ein Hauptaugenmerk auf den *kritischen Weg*[1068] zu legen, über den die Vertragsfristen abgebildet werden.[1069]

Bei der *adäquaten haftungsausfüllenden Kausalität* gem. § 287 ZPO ergeben sich weitere Fragestellungen zur Anspruchshöhe, die nicht mehr zum Haftungsgrund – also dem Verursachungshergang – gehören.[1070] Hierunter fallen die zeitlichen oder finanziellen Folgen einer zuvor begründeten Behinderung.[1071] Dafür sind die auf eine Behinderung zurückzuführenden terminlichen Auswirkungen zu betrachten, woraus sich die Anspruchshöhe errechnen lässt (z. B. die Höhe der Fristverlängerung i. S. v. § 6 Abs. 3, 4 VOB/B).[1072] Auch solche Umstände, die allein für die Entstehung und den Umfang eines Anspruchs von Bedeutung sind, unterliegen einer einschätzenden Bewertung des Tatrichters.[1073] Dies kann der Fall sein, wenn eine Gesamtverzögerung vorliegt, weil sich Anschlussgewerke verzögerten.[1074] Eine Beweiserleichterung durch § 287 ZPO bedeutet weiterhin, dass eine Bauzeitverlängerung, die aus einer oder mehreren Behinderungen entstanden ist, eine möglichst konkrete Ausarbeitung erfordert.[1075] Das heißt, dass § 287 ZPO auch für die Beurteilung von *Mehrfachkausalitäten*[1076] angewandt werden kann und zur Bestimmung/Schätzung der Gesamtbauzeitverlängerung infolge eines Behinderungssachverhalts anzuwenden ist.

Insgesamt hat der Auftragnehmer zur Durchführung eines Kausalitätsnachweises möglichst einen ganzheitlichen Ursachenzusammenhang über eine Behinderung im Zuge seiner Beweisführung zu konkretisieren bzw. anhand einer belegbaren Datenbasis logisch vorzutragen.[1077] Dies ist erforderlich, da die bloße Behauptung einer vorhandenen Behinderung als Nachweis nicht ausreicht – auch das alleinige Vorbringen einer

[1065] I. A. a. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1613.
[1066] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1067] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1068] Siehe *Kapitel 3.2.2*.
[1069] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 521-522.
[1070] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1071] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177; BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218.
[1072] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218 i. V. m. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 27.
[1073] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218.
[1074] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1075] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1076] Siehe *Kapitel 4.4.6*.
[1077] Siehe *Kapitel 3.4* i. V. m. *Kapitel 4.5*.

schriftlichen Behinderungsanzeige verfehlt die Anforderungen einer schlüssigen Nachweisführung.[1078] Hierzu erläutert *Thode*, dass die bloße „[…] *Behauptung, dem Auftragnehmer seien Mehrkosten entstanden,* […] *ohne die Angabe der Bezugsgröße keinen Informationswert* [besitzt].“[1079] Ebenso ist die „[…] *Behauptung einer auftraggeberseitig zu vertretenden Behinderung, ihre Dokumentation im Bautagebuch oder* […] *die Tatsache, daß Termin-Ist und Termin-Soll sich unterscheiden* [, als] *Nachweis* [nicht ausreichend]. *Die Kausalitäten sind dadurch noch nicht nachgewiesen*.“[1080]

Vielmehr verlangt die Rechtsprechung für die Darlegung regelmäßig eine ***konkrete bauablaufbezogene Darstellung***[1081], sobald der Auftragnehmer die Rechtsfolgen von zeitabhängigen Ansprüchen aus gestörten Bauabläufen fordert oder anderenfalls einen Entlastungsbeweis durchführen möchte. Dafür hat er „[…] *Angaben zu machen, ob und wann seine Arbeiten, die nach dem Bauablauf nunmehr ausgeführt werden müßten, nicht oder nicht wie vorgesehen ausgeführt werden können*.“[1082] So sind „[…] *auch diejenigen unstreitigen Umstände* [zu] *berücksichtigen, die gegen eine Behinderung sprechen, wie z.B. die Lieferung von Vorabzügen, nach denen tatsächlich zu den vorgesehenen Zeiten gearbeitet worden ist, oder die wahrgenommene Möglichkeit, einzelne Bauabschnitte vorzuziehen*.“[1083]

Darüber hinaus fordert der *BGH*, dass selbst bei Großbaustellen „[…] *die Forderung nach einer konkreten Darstellung nicht überhöht ist, weil es dem Auftragnehmer gerade in einem Fall, in dem er sich behindert fühlt, zuzumuten ist, eine aussagekräftige Dokumentation zu erstellen, aus der sich die Behinderung sowie deren Dauer und Umfang ergeben* […]. *Soweit ein Auftragnehmer mangels einer ausreichenden Dokumentation der Behinderungstatbestände und der sich daraus ergebenden Verzögerungen zu einer den Anforderungen entsprechenden Darstellung nicht in der Lage ist, geht das grundsätzlich nicht zu Lasten des*

[1078] Vgl. *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 2, Rdn. 2.
[1079] Thode, ZfBR 2004: 214.
[1080] Schiffers, 1998: S. 297.
[1081] Vgl. BGH, Urteil vom 21.03.2002 – Az. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570. Die *konkrete bauablaufbezogene Darstellung* ist ein *unbestimmter Rechtsbegriff*, der bereits vielfach in der Fachliteratur und von den Gerichten interpretiert wurde. Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 62-63. Eine konkrete bauablaufbezogene Darstellung ist jedoch *keine zwingende* Voraussetzung zur Darlegung eines Entschädigungsanspruchs. Ihre Erfordernis ist abhängig von der jeweiligen Einzelfallbetrachtung, um zwischen Folgewirkungen im Gesamtbauablauf differenzieren zu können, damit Anspruchsgrund und -höhe infolge eines Behinderungssachverhalts *eindeutig* dargestellt werden. In einem konkreten Fall des *Kammergerichts* entfiel z. B. die Notwendigkeit einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung, da lediglich ein Ereignis während des Annahmeverzugs betrachtet wurde. Vgl. KG, Urteil vom 10.01.2017 – Az. 21 U 14/16, IBRRS 2017: 0410. Die KG-Entscheidung war nicht rechtskräftig und wurde vom *BGH* wieder aufgehoben. Vgl. BGH, Urteil vom 26.10.2017 – Az. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751. Jedoch ist der *BGH* dabei nicht auf die Erforderlichkeit einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung eingegangen, weshalb in Fachkreisen bereits „spekuliert“ wird, ob diese überhaupt zur Darlegung eines Entschädigungsanspruchs notwendig ist. Vgl. Sienz, IBR 2017: 665. Offensichtlich stellt sich aber bei dieser Entscheidung der Sachverhalt als triviale Unterbrechung dar, die insoweit als nicht komplex anzusehen ist. Komplexe Sachverhalte müssen dagegen „entwirrt“ werden, um sie sauber von anderen Sachverhalten zu trennen. Demzufolge kommt es immer auf die Komplexität des Lebenssachverhalts an, ob eine konkrete bauablaufbezogene Darstellung für die Darlegung eines Anspruchs notwendig wird. *Sonntag* zählt bspw. Aspekte auf, die gegen eine konkrete bauablaufbezogene Darstellung sprechen können. Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 117. Siehe auch *Kapitel 4.5*.
[1082] BGH, Urteil vom 21.10.1999 – Az. VII ZR 185/98, IBRRS 2000: 0800.
[1083] BGH, Urteil vom 21.03.2002 – Az. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570.

Auftraggebers.“[1084] Eine Nachweisführung ist laut *BGH* ebenso nicht zulässig, wenn zwei fiktiv erstellte Bauabläufe gegenübergestellt werden.[1085]

Somit hat der Auftragnehmer seine Nachweisführungen auf Grundlage einer ***aussagekräftigen Dokumentation*** zu stützen, die er während der Baumaßnahme anfertigen muss.[1086] Sie hat Informationen über die *geplanten* und *tatsächlichen* Bau-Inhalte und Bau-Umstände zu enthalten.[1087] Hierbei kommt es im Wesentlichen auf die pro Bauleistung

- eingesetzten Kapazitäten und Arbeitszeiten,
- bearbeiteten Mengen (zeitdiskrete Bautenstände),
- Bedingungen während der Produktion und
- beabsichtigten bzw. tatsächlich nachgegangenen sowie möglichen Fertigungsrichtungen an.

Die Dokumentation sollte erschöpfend ausgearbeitet werden, damit sie möglichst alle Tatsachen enthält, die mit einer Bauablaufstörung bzw. Behinderung in Anbetracht des Gesamtbauablaufs in Verbindung gebracht werden können. *Berger* führt aus, dass „[…] *neben dem Ablaufplan die Dokumentation von Leistungsänderungen, die Überwachung der Planlieferliste, die ordentliche Führung des Bautagebuchs, Baubesprechungsberichte und Behinderungsanzeigen* [entscheidend sind].“[1088] Letztendlich steht und fällt ein Kausalitätsnachweis mit der Dokumentation über das Bau-Ist und das beabsichtigte Bau-Soll, das sich während der Ausführungsarbeiten ebenfalls fortentwickeln kann.[1089]

Das Ziel des aus der Dokumentation abzuleitenden Kausalitätsnachweises ist die Erläuterung des wesentlichen Lebenssachverhalts, so dass bestenfalls ein außenstehender Dritter die Zusammenhänge möglichst nachvollziehen und mit kritischen Nachfragen nicht vollständig widerlegen kann.[1090] Im Allgemeinen gilt: „***Je näher diese Abbildung die tatsächlichen Abläufe wiedergibt, umso eher ist sie als Grundlage zur Bemessung von Bauzeitverlängerungsansprüchen und als Berechnungs- bzw. Schätzgrundlage der dadurch angefallenen Mehrkosten geeignet***.“[1091] Erst nachdem ein entsprechend realitätsnaher Ursachenzusammenhang rekonstruiert und bewertet werden kann, der mit Aufzeichnungen des geplanten Soll- sowie des ausgeführten Ist-Bauablaufs übereinstimmt, lässt sich die Höhe der Ansprüche anhand des produktionsbezogenen Zeitverbrauchs ermitteln.

In einem Urteil setzt das *OLG Köln* – was unüblich ist – von einem Auftraggeber eine konkrete bauablaufbezogene Darstellung zur Darlegung eines Schadensersatzanspruchs

---

[1084] BGH, Urteil vom 21.03.2002 – Az. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570 i. V. m. BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
[1085] Vgl. BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
[1086] Der *BGH* hat mehrfach die Bedeutung der Dokumentation betont. Beispielsweise: BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960; BGH, Urteil vom 21.03.2002 – Az. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570; BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1087] Siehe *Kapitel 3.1*.
[1088] *Berger in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 4, Rdn. 25.
[1089] Siehe *Kapitel 3*.
[1090] Diese Anforderungen eines Kausalitätsnachweises und der dazugehörigen Dokumentation werden bspw. von *Roquette et al*. sowie *Lang et al*. genannt. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 601; *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 194. Siehe auch *Kapitel 3.4.1*, *Kapitel 4.4.1* und *Kapitel 4.4.2*.
[1091] Mechnig/Völker/Mack/Zielke, NZBau 2014: 87.

wegen verspäteter *Planungsleistungen* voraus.[1092] Ob Derartiges auf gestörte Ausführungsleistungen übertragen werden kann und, falls ja, inwieweit der Auftraggeber „jemals" die auftragnehmerseitigen Abläufe darzulegen hat, bleibt fraglich. Hypothetische Überlegungen, dass der Auftraggeber seine eigenen Ansprüche mit den Produktionsabläufen des Auftragnehmers nunmehr erläutern sollte, laufen sicherlich in die falsche Richtung. Schließlich entscheidet der Auftragnehmer über seine Herstellungsprozesse und die damit einhergehende Dispositionsfreiheit. Da dieses Urteil von „standardmäßigen Fällen" abweicht, entfällt die weitere Diskussion. Stattdessen wird auf *Sonntag und Sindermann* verwiesen, die diese Textpassage des Urteils aufgreifen und näher durchleuchten.[1093]

Die konkrete bauablaufbezogene Darstellung, im Kontext mit der Simulation und dem angepassten Nachweisverfahren, folgt in *Kapitel 4.5*.

4.4.4 Darlegung von Anspruchsgrund und Anspruchshöhe

Mit seinem Sachvortrag muss der Auftragnehmer über einen Kausalitätsnachweis darlegen können, dass er alles Zumutbare unternommen hat, um seine Arbeiten weiterführen zu können und nicht ohne realisierbare Gegenmaßnahme in eine Behinderung „hineingeraten" ist. In der Vergangenheit fällten die Instanzgerichte teilweise sehr umstrittene Urteile, die im folgenden Text näher vorgestellt werden. Ebenso werden Anforderungen der Fachliteratur genannt.

Gemäß *Kapitel 4.2.4* muss der Auftragnehmer zur Darlegung des Haftungsgrunds den Nachweis erbringen, dass der Auftraggeber über die hindernden Umstände außerhalb seines Risikobereichs i. S. v. § 6 Abs. 1 VOB/B rechtzeitig informiert[1094] wurde, damit dieser einer drohenden Behinderung hätte entgegenwirken oder sie verhindern können.[1095] Aus den Inhalten einer Behinderungsanzeige müssen die Gründe hervorgehen, ob und wann die Arbeiten nicht wie vorgesehen ausgeführt werden konnten.[1096]

Er muss seine ***eigene Leistungsbereitschaft***[1097] unter Beweis stellen, sobald er die Nichtannahme seiner Leistung außerhalb seines Risikobereichs sucht. Dafür hat er seine eigenen Verschuldensanteile darzustellen.[1098] Der Auftragnehmer muss seine Leistungsbereitschaft in Bezug auf den Ist-Bauablauf nachweisen. Mithilfe seiner Dokumentation hat er zu belegen, dass er zum Leisten bereit und im Stande gewesen wäre.[1099] Dies gilt ebenso für Ansprüche aus § 6 Abs. 2-4 VOB/B, § 6 Abs. 6 VOB/B und § 2 Abs. 5, 6 VOB/B.[1100] Ansonsten hat er die zeitlichen Auswirkungen von bereits anerkannten Nachträgen zu

[1092] Vgl. OLG Köln, Urteil vom 31.05.2017 – Az. 16 U 98/16, IBRRS 2017: 2535.
[1093] Vgl. Sonntag/Sindermann, BauW 2018: S. 101-106.
[1094] Hierunter zählt die Offenkundigkeit, die etwa bei Vergütungsansprüchen aufgrund einer Anordnung erfolgt ist. Aus Gründen der Nachweisbarkeit sollte der Auftragnehmer auf eine schriftliche Behinderungsanzeige zurückgreifen, falls er zeitabhängige Ansprüche begründen möchte.
[1095] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 1, Rdn. 1-6; Genschow/Stelter, 2013: S. 31-32.
[1096] Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 30.07.2013 – Az. 21 U 84/12, IBRRS 2013: 3984.
[1097] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1357; OLG Köln, Urteil vom 28.01.2014 – Az. 24 U 199/12, IBRRS 2014: 1002. Siehe Anforderungen der *Leistungsbereitschaft* in *Kapitel 4.1.6*.
[1098] Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 12.04.2011 – Az. I-24 U 29/09, IBRRS 2011: 3693 (zurückgewiesene Revision: BGH, Beschluss vom 10.01.2013 – Az. VII ZR 110/11, IBRRS 2011: 3693).
[1099] Sehr auf § 297 BGB (siehe *Kapitel 4.1.6*) und teilweise auch auf § 5 Abs. 3 VOB/B (siehe *Kapitel 4.2.2*) ausgerichtet.
[1100] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 681. Siehe auch *Kapitel 4.1.6*.

berücksichtigen.[1101] Die genannten Punkte hat das *OLG Köln* in einem (umstrittenen[1102]) Urteil für eine schlüssige Nachweisführung gefordert und darüber hinaus Folgendes verlangt:[1103]

- ***eine Erläuterung, wie der Soll-Bauablauf tatsächlich geplant wurde:***
  - welche Teilleistung in welcher Zeit erstellt werden sollte,
  - wie der Arbeitskräfteeinsatz erfolgen sollte.
- ***Erläuterungen der Inhalte des tatsächlichen Ist-Bauablaufs:***
  - ob die Baustelle mit ausreichend Kapazitäten besetzt war,
  - tatsächliche Auswirkungen einzelner Behinderungstatbestände auf den Bauablauf, [1104]
  - ob die in der Darstellung angesetzten Bauzeiten mit den in der Preisbildung vorgesehenen Mitteln hätten eingehalten werden können.[1105]

Ferner erklärt das *OLG Köln*, dass diese Anforderungen für Fristverlängerungsansprüche als taugliche Grundlage zur Ermittlung von Vergütungs-, Entschädigungs- und Schadensersatzansprüchen wegen Bauzeitverlängerung anzusehen seien.[1106]

Für die *Anspruchshöhe* muss der Auftragnehmer ebenfalls schlüssig nachweisen können, dass er gegen bereits absehbare Behinderungsfolgen handelte. Er hat darzulegen, ob und warum bestimmte Ausweichmaßnahmen nicht möglich waren, die er im Rahmen seiner Wiederaufnahme- und Weiterführungspflicht gem. § 6 Abs. 3 VOB/B hätte nutzen können. Darunter fällt die Berücksichtigung unstreitiger Umstände, die gegen eine Behinderung sprechen.[1107] Das *OLG Köln* zählt hierzu u. a. die Nutzung möglicher Pufferzeiten, das Vorziehen einzelner Bauabschnitte oder einen anderweitigen Einsatz der Arbeitskräfte.[1108]

Auch das *OLG München* betont, dass eine verpreiste Bauleistung nicht in den Risikobereich des Auftraggebers fällt, wenn sie unter realistischen baubetrieblichen Gesichtspunkten nicht rechtzeitig hätte ausgeführt werden können.[1109] Somit obliegt es dem Auftragnehmer, dass er die ***Auskömmlichkeit*** und die ***Machbarkeit*** seines geplanten Bauablaufs beweist, indem er die Plausibilität seiner Bauablaufplanung prüft.[1110] Dazu muss er den kalkulierten Zeitbedarf mit den im Bauzeitenplan enthaltenen Fristen abgleichen. Falls der vertraglich vereinbarte Bauzeitenplan unrealistisch erscheint, kann er neu entwickelt werden, so dass dieser in Form eines *realisierbaren* und *produktionsorientierten Terminplans*[1111] vorliegt. Dies ist möglich, da der Bauzeitenplan nur eine indizielle Bedeutung hat – die abstrakte Berechnung einer

[1101] Vgl. OLG Dresden, Urteil vom 06.01.2012 – Az. 1 U 13/10, IBRRS 2012: 1754.
[1102] Vgl. Markus, NZBau 2014: 688; Duve, NJW 2014: 2992; *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018, § 631, Rdn. 777.
[1103] Vgl. OLG Köln, Urteil vom 28.01.2014 – Az. 24 U 199/12, IBRRS 2014: 1002.
[1104] I. A. a. OLG Brandenburg, Beschluss vom 18.08.2009 – Az. 11 W 25/08, IBRRS 2011: 1539 und OLG Köln, Beschluss vom 28.11.2011 – Az. 17 U 141/10, IBRRS 2012: 4506 (zurückgewiesene Revision: BGH, Beschluss vom 25.10.2012 – Az. VII ZR 233/11, IBRRS 2012: 4506).
[1105] I. A. a. OLG Hamm, Urteil vom 12.02.2004 – Az. 17 U 56/00, IBRRS 2004: 0821.
[1106] Vgl. OLG Köln, Urteil vom 28.01.2014 – Az. 24 U 199/12, IBRRS 2014: 1002.
[1107] Vgl. BGH, Urteil vom 21.03.2002 – Az. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570.
[1108] Vgl. OLG Köln, Beschluss vom 27.10.2014 – Az. 11 U 70/13, IBRRS 2015: 0137.
[1109] Vgl. OLG München, Urteil vom 27.04.2016 – Az. 28 U 4738/13 Bau, IBRRS 2017: 2365.
[1110] Vgl. Drittler, 2017: Rdn. 4:25-26, 4:352 ff.
[1111] Siehe *Kapitel 3.3.3*.

Behinderung darf jedoch nicht Gegenstand eines Nachweises werden.[1112] Laut *Sonntag* muss die Behinderungs*dauer* für eine konkrete Anspruchsbegründung bekannt sein.[1113]

Zum Nachweis des Haftungsgrunds kann sich die schlüssige Darlegung einer Behinderungsdauer schwierig gestalten. Daher sprechen sich *Roquette et al*. für eine Rekonstruktion der Behinderungsdauer aus; sie schlagen eine Auswertung von Bautagebüchern oder anderen Unterlagen vor, die Auskunft zum jeweiligen Leistungsstand geben können.[1114] *Genschow und Stelter* weisen ebenfalls darauf hin, dass die Rekonstruktion des Behinderungsendes schwierig ist, weshalb ein Auftragnehmer die Wiederaufnahme der Arbeiten in jedem Fall anzeigen sollte.[1115]

Nach § 6 Abs. 3 VOB/B muss der Auftragnehmer seine Ausführungsgeschwindigkeit *optimieren*, indem z. B. seine vorhandenen Kapazitäten Überstunden oder Wochenendarbeiten ableisten.[1116] Die Regelungen des § 6 Abs. 3 VOB/B dienen zur Einhaltung der im Bauzeitenplan vereinbarten Ausführungsfristen. Das heißt, der Auftragnehmer muss flexibel reagieren, damit die Weiterführung der Arbeit möglich wird. Ein starres Festhalten an dem vorgesehenen Produktionsablauf liegt außerhalb der Vorstellung des § 6 Abs. 3 VOB/B.[1117] § 6 Abs. 3 VOB/B gewährt dem Auftraggeber aber *keinen durchsetzbaren Anspruch* auf Aufstockung der Kapazitäten, um etwa den Bauablauf zu beschleunigen.[1118]

Im Hinblick auf § 6 Abs. 3, 4 VOB/B ist vor allem die Frage relevant, ob eine ermittelte Fristverlängerung gerechtfertigt ist oder ob die Leistung innerhalb der vorhandenen Vertragsfristen (kritischer Weg) vom Auftragnehmer zum Zeitpunkt der Störung noch hätte eingehalten werden können.[1119] Um eigene Störungsanteile auszugleichen, kann der Auftragnehmer die von ihm ursprünglich eingeplanten oder während der Ausführung aufgeholten Pufferzeiten nutzen. Der Gebrauch von Pufferzeiten ist von großer Bedeutung, denn wird „[…] *die Bauzeit trotz auftraggeberseitiger Behinderungen unter Einsatz der Pufferzeiten des Auftragnehmers eingehalten, kann der Auftragnehmer hieraus* ***keine zusätzliche Vergütung oder gar einen Schadensersatz*** *generieren, da die Bauzeit nicht verlängert wurde und der Auftragnehmer weder Mehrkosten hatte noch eine vom Vertrag abweichende Leistung erbracht hat* […].“[1120]

Ob die Forderungen der teilweise sehr umstrittenen Instanzgerichte im Einzelnen überhöht oder gar fehlerhaft sind, ist an dieser Stelle kein Thema. Wegdiskutieren lassen sich die Entscheidungen jedenfalls nicht, weshalb sie in dieser Arbeit nicht außer Acht gelassen werden.

[1112] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 11.
[1113] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 43.
[1114] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 532.
[1115] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 37. Auch *Reister* erwähnt die Schwierigkeiten einer ausbleibenden Behinderungsabmeldung. Vgl. Reister, 2014: S. 454.
[1116] Vgl. *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 6; Wessel, ZfBR 2010: 529.
[1117] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 30; Wessel, ZfBR 2010: 529.
[1118] „*In Betracht kommt insoweit die Erhöhung der Arbeitsleistung der vorhandenen Kapazitäten*.“ *Döring in* Ingenstau/Korbion, 2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 6.
[1119] Vgl. Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 5.
[1120] *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 16. Siehe auch *Kapitel 4.4.5*.

4.4.5 Pufferzeiten

Kontrovers ist die Frage, wann und wem eine Pufferzeit in einem Vertragsverhältnis überhaupt gehört. Ausgangspunkt bildet jene Situation, in der der Auftraggeber eine vom Auftragnehmer ungenutzte Pufferzeit für sein Gesamtprojekt hätte nutzen können, unter der Voraussetzung, dass der Auftragnehmer seine Leistung fristgerecht und vertragsgemäß erfüllen konnte.[1121] Denn sobald der Auftragnehmer die Pufferzeiten nicht für seine eigene Arbeit benötigt, ist er über § 6 Abs. 3 VOB/B zur Abgabe der übriggebliebenen Zeitreserven verpflichtet.[1122] Laut *Markus* besteht dieser Grundsatz, da der Auftragnehmer das ihm Zumutbare unternehmen muss, um die Weiterführung der Arbeiten zu ermöglichen.[1123]

Schwieriger stellt sich hingegen die Verteilung der Pufferzeiten während der fortlaufenden Bauausführung dar. Im Rahmen seiner Disposition kann der Auftragnehmer die Pufferzeiten dazu nutzen, um eigene Verzögerungen zu kompensieren.[1124] Er braucht seine Pufferzeiten nicht an den Auftraggeber abzugeben, da der erreichbare Erfüllungszeitpunkt noch ungewiss und der Auftragnehmer möglicherweise noch im Rahmen seiner Dispositionsfreiheit auf seine eingeplanten oder erarbeiteten Zeitreserven bis zur Herstellung der Bauleistung angewiesen ist.[1125] In solchen Fällen ist der Auftragnehmer nicht verpflichtet, die vorhandenen Pufferzeiten an den Auftraggeber abzugeben. *Markus* begründet diesen Umstand aus § 6 Abs. 4 VOB/B, bei dem die Fristen u. a. über den Behinderungszeitraum verlängert werden.[1126] Allerdings entbindet dieser Umstand den Auftragnehmer nicht davon, Pufferzeiten herzugeben, wenn es ihm über § 6 Abs. 3 VOB/B zugemutet werden kann.[1127]

Lang und Rasch haben ein ***Pufferkonto*** entwickelt, worüber leistungsbezogene Pufferzeitanteile bei der Terminplanfortschreibung entkoppelt und auf ihren *jeweiligen Terminplan-Ast auf Basis eines Netzplans* hinsichtlich des *kritischen Wegs* fortgeführt werden.[1128] Das Pufferkonto beschreiben *Lang und Rasch* in Anlehnung an ein Bankkonto mit Gutschriften, Auszahlungen und Saldos für Pufferzeiten als „Guthaben".[1129] Die Führung eines Pufferkontos begründen die Autoren damit, dass bei einer alleinigen Orientierung am Ist-Bauablauf ggf. Zeitanteile zulasten des Auftragnehmers ggf. unberücksichtigt blieben.[1130] Hierdurch kann ein Verlust von Zeitanteilen zustande kommen, die der Auftragnehmer wohlmöglich zur Vertragsbildung vorsah oder während der Bauausführung erarbeitete.[1131] Durch die Führung eines Pufferkontos können erkannte

---

[1121] Vgl. Wessel, ZfBR 2010: 528.

[1122] Vgl. Markus, NZBau 2014: 95. So auch *Oberhauser*: „*Abhängig von der Verursachung der Behinderung kann der Auftragnehmer berechtigt oder aus Gründen der Schadensminderungspflicht sogar verpflichtet sein, Personal und Geräte zu reduzieren oder von der Baustelle abzuziehen.*" *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 3, Rdn. 8.

[1123] Vgl. Markus, NZBau 2014: 95.

[1124] Vgl. *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 60.

[1125] Vgl. Wessel, ZfBR 2010: 528.

[1126] Vgl. Markus, NZBau 2014: 93.

[1127] Vgl. Markus, NZBau 2014: 93.

[1128] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 147-152. Kritisch äußern sich *Roquette et al*., da der Auftragnehmer ggf. seine *Leistungsbereitschaft* auch unter Berücksichtigung verfügbarer Pufferzeiten des Ist-Bauablaufs beweisen muss. Eine rechnerische Methode würde vom tatsächlichen Hergang (bzw. der konkreten Lebenssachverhaltsschilderung) abweichen. Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 684. Ebenfalls kritisch: Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 401.

[1129] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 152.

[1130] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 144 ff.

[1131] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 144 ff.; siehe auch *Kapitel 3.2.2*.

Zeitreserven infolge einer rechnerischen Fortschreibung eines Bauablaufmodells mitgeführt und vermeintliche Verzögerungsanteile des Auftragnehmers im Einzelfall korrigiert werden.

Bei der Führung des Pufferkontos sind einige Regeln zu beachten. Laut *Lang und Rasch* dürfen keine Pufferzeiten eingetragen werden, die für einen bestimmten Zweck vorgesehen sind.[1132] Derartige Pufferzeiten entfallen automatisch, wenn sie keinen Nutzen mehr haben.[1133] Für den Eintrag in das Pufferkonto muss sich herausstellen, dass der Auftragnehmer während der Bauausführung leistungsbereit war und die in Frage kommenden Zeitreserven noch zu einer späteren Bauzeit hätte nutzen können.[1134] Pufferzeiten sind aus dem Pufferkonto zu entfernen, sobald der Auftragnehmer seine Ausführungen eigenständig verzögert.[1135] Der abschließende Aspekt betrifft die produktionstechnische Bauausführung, die in den vom Auftragnehmer angebotenen und vom Auftraggeber zugestimmten Preisen enthalten ist. *Tiesler* weist darauf hin, dass verkürzte Vorlauffristen *keine produktionstechnischen Vorgänge* des Auftragnehmers sind, die in einem Pufferkonto vermerkt werden dürfen.[1136]

Neben dem Pufferkonto des Auftragnehmers sieht *Tiesler* ebenso ein Pufferkonto für den Auftraggeber vor, in dem vertraglich vereinbarte Pufferzeiten eingetragen werden, die aus Anordnungen zur Beschleunigung einer Bauleistung entstanden sind.[1137] Hierbei handelt es sich um Zeitanteile, die dem Auftragnehmer „abgekauft" wurden. Entsprechend sind sie nicht mehr im Besitz des Auftragnehmers. Aus diesem Pufferkonto werden Pufferzeiten entnommen, sobald der Auftraggeber damit hindernde Umstände *aus seinem* Risikobereich auffangen möchte.[1138]

Ein Pufferkonto sollte im Idealfall baubegleitend geführt werden, um zielgerichtete Informationen für den Verbleib möglicher Zeitreserven zu dokumentieren. Jedoch kann ein Pufferkonto für die Darlegung eines gestörten Bauablaufs, der nachträglich rekonstruiert werden musste, hilfreich sein. Unabhängig von einer baubegleitenden Dokumentation lässt sich mit der Führung von Pufferkonten ein Überblick über den sachlogischen Verbleib der jeweiligen Zeitanteile verschaffen. Bei der Rekonstruktion eines gestörten Bauablaufs ist besonders darauf zu achten, welche Zeitreserven sich welcher Leistungsposition zuordnen lassen. Darüber hinaus sollte nach der Fertigstellung einer Bauleistung baubetrieblich und juristisch geklärt werden, ob *verbleibende* Pufferzeiten auf eine andere Bauleistung übertragen werden dürfen.

Gemäß *Kapitel 3.2.3* können sich auftragnehmerseitige Pufferzeiten ergeben, wenn sie der Auftragnehmer mit seinen kalkulierten Aufwands- und Leistungswerten „versteckt" oder wenn er mit seinen Ausführungen die im Bauzeitenplan vorgesehenen Fristen über-

---

[1132] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 149.
[1133] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 149.
[1134] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 149.
[1135] Aus diesem Grund verwenden *Lang und Rasch* den Begriff des „Zeit-/Pufferkontos". In dieser Arbeit wird der Begriff des *Pufferkontos* synonym verwendet. Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 147 ff. Beispiele zum Gebrauch eines Pufferkontos: *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 163.
[1136] Vgl. Tiesler, 2018: S. 211-212.
[1137] Vgl. Tiesler, 2018: S. 211 ff.
[1138] Vgl. Tiesler, 2018: S. 211-212, 248 ff.

schreitet.[1139] Gleichzeitig fällt eine verpreiste Bauleistung nicht in den Risikobereich des Auftraggebers, wenn sie unter realistischen baubetrieblichen Gründen nicht rechtzeitig hätte ausgeführt werden können. Somit obliegt es dem Auftragnehmer, dass er die in *Kapitel 4.4.4* beschriebene *Auskömmlichkeit* und die *Machbarkeit* seines geplanten Bauablaufs plausibel aufzeigen kann.[1140] Zuvor kenntlich gemachte oder leistungsbezogene Pufferzeiten lassen aber keine „willkürlichen Gestaltungsfreiheiten" für nachträglich ermittelte Fristverlängerungsansprüche zu.[1141] Folglich ist vordergründig der Parteiwille zu berücksichtigen.

Folglich ist der Umgang mit Pufferzeiten von individuellen Einzelfallentscheidungen abhängig, die durch einen Algorithmus allenfalls unterstützt, aber nicht hinreichend entschieden werden können. So muss erst die vorliegende Komplexität der Bauabläufe aufgeschlüsselt werden, um die Untersuchungen und Differenzierungen überhaupt voneinander abgrenzen zu können.

4.4.6 Differenzierung komplexer Behinderungssachverhalte

Im Rahmen eines Kausalitätsnachweises muss der zeitliche Mehrbedarf, der während der Vertragserfüllung aufgrund einer Behinderung entstanden ist, für einen zeitabhängigen Anspruch sachgerecht dargelegt werden. Möglicherweise vermischen sich die Bauablaufstörungen der Vertragsparteien und ihre jeweiligen materiell-rechtlichen Ansprüche. Allerdings greift die Haftung eines Anspruchs nur, wenn die Tatbestände aus einem Behinderungssachverhalt eindeutig *einem* Verursacher zugeordnet werden können.[1142] Um derartige Vermischungen aufzuschlüsseln und eine Doppelberechnung zu vermeiden, ist jeder Sachverhalt – soweit möglich – gesondert auszuwerten.[1143] In solchen Fällen differenziert die Rechtswissenschaft zwischen verschiedenen Formen der ***Mehrfachkausalität***[1144].

Duve und Richter nennen fünf verschiedene Kausalitätsformen für das *Haftungs-* und das *Schadensrecht* (siehe *Tabelle 4-2*).[1145] Die Terminologien können in der Fachliteratur und Rechtsprechung voneinander abweichen.[1146] Im *Haftungsrecht* wird zwischen folgenden Kausalitätsformen unterschieden:

- *alternative Kausalität*,
- *konkurrierende Kausalität* und
- *kumulative Kausalität*.

Während bei der *alternativen Kausalität* ein Nachweisproblem der Ursächlichkeit vorliegt, sind die Verursachungsbeiträge der ***konkurrierenden Kausalität*** oder der ***kumulativen Kausalität*** weitestgehend bekannt.[1147] Wenn zwischen der Zurechnung komplexer Sachverhalte differenziert werden soll, besteht zumeist eine *konkurrierende Kausalität* oder

---

[1139] Vgl. Genschow/Stelter, 2013: S. 25.
[1140] Siehe *Kapitel 4.4.4*.
[1141] Vgl. Schiffers/Sindermann, BauW 2017: S. 127.
[1142] Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 14.04.2005 – Az. 21 U 133/04, IBRRS 2005, 2393.
[1143] Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 14.04.2005 – Az. 21 U 133/04, IBRRS 2005, 2393; *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 365.
[1144] Synonym: ***Plurale Kausalität***. Vgl. Möhring, 2012: S. 53 ff.
[1145] Vgl. Duve/Richter, BauR 2006: 608-609, 619. Bildhafte Darstellung der Kausalitätsformen: Vgl. Tiesler, 2018: S. 47-53.
[1146] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 656.
[1147] Vgl. Duve/Richter, BauR 2006: 609.

eine *kumulative Kausalität*. Beide Kausalitätsformen unterscheiden sich in ihrer Bewertbarkeit und den daraus ableitbaren zeitlichen sowie finanziellen Behinderungsfolgen.

Da es sich bei der *konkurrierenden Kausalität* um nebenläufige (bzw. mindestens zwei voneinander entkoppelte, aber zeitparallele) Kausalitätsstränge handelt, ist die vom Auftraggeber bewirkte Bauablaufstörung als eine auftragnehmerseitige Behinderung mit ihren zeitlichen Folgen gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B vollumfänglich anzuerkennen.[1148] Ebenso kann der Auftragnehmer hieraus monetäre Ansprüche ableiten, insofern er selbst leistungsbereit war.[1149]

Im Gegensatz dazu kann im Falle einer *kumulativen Kausalität* von keiner vollständigen Entkopplung der auftraggeberseitigen und auftragnehmerseitigen Verursachungsbeiträge ausgegangen werden. Hier wirken mehrere Anteile zusammen, weshalb ein „Ursachenknäuel" vorliegt, das „entwirrt" werden muss.[1150] Solche Verzögerungsanteile dürfen i. S. v. § 254 BGB im Zuge der Nachweisführung durch eine ***Quotelung*** herausgearbeitet werden.[1151] Hierfür ist eine möglichst genaue Schätzung der Verursachungsanteile gem. § 287 ZPO möglich; eine Quotelung ist ebenso für eine finanzielle Behinderungsfolge beim Vorliegen einer kumulativen Kausalität durchzuführen.[1152]

[1148] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 662. Das Vorliegen einer auftragnehmerseitigen Behinderung wird durch die sog. „soweit-Formel" aus § 6 Abs. 2 Nr. 1 VOB B begründet (siehe Wortlaut: „*Ausführungsfristen werden verlängert,* ***soweit*** *die Behinderung verursacht ist*"). Beim Vorliegen einer Behinderung verlieren die vorgesehenen Fristen ihre Rechtswirksamkeit, worüber die *automatische* Fristverlängerung begründet wird (siehe *Kapitel 4.2.5*). Vgl. *Berger in* Beck'scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 2, Rdn. 28; Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 405.

[1149] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1642; Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 405-406; *Berger in* Beck'scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 6, Rdn. 78. Dies ist vom Einzelfall abhängig. Vgl. Langen, BauR 2011: 387 ff.

[1150] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 660-665 i. V. m. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1357.

[1151] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406; *Berger in* Beck'scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 6, Rdn. 77; *Langen* beschreibt, dass die Regelung gem. § 254 BGB zwar explizit für den Schadensersatzanspruch anzuwenden ist. Unter Berücksichtigung von § 242 BGB gilt dies aber auch für *verschuldensunabhängige Ansprüche* des Auftragnehmers. Vgl. Langen, BauR 2011: 387. Siehe auch *Kapitel 4.2.6*.

[1152] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1354; *Berger in* Beck'scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 6, Rdn. 77. Hier ist der Einzelfall zu beachten. Vgl. Langen, BauR 2011: 387 ff.

Tabelle 4-2: Kausalitätsformen des Haftungs- und des Schadensrechts für gestörte Bauabläufe[1153]

	Kausalitätsform	Allgemeine Beschreibung	Beispiel
Haftungsrecht	*Konkurrierende Kausalität* (Doppelkausalität)	Mindestens zwei verschiedene Verursacher bewirken jeweils allein einen hindernden Umstand im Bauablauf, wobei jede dieser Ursachen bereits für den Eintritt einer bestimmten Bauablaufstörung ausgereicht hätte.	Aufgrund einer defekten Mischpumpe für den Innenputz muss der Auftragnehmer drei Tage verspätet beginnen. Zeitgleich wurden seine Vorunternehmerleistungen mit drei Tagen Verspätung beendet.
	Kumulative Kausalität (Gesamtkausalität)	Mindestens zwei verschiedene Verursacher wirken zusammen hindernd auf den Bauablauf ein und erzeugen gemeinsam (also anteilig) eine gesamte Bauablaufstörung. Die Störung käme jedoch nicht zustande, wenn nur eine Ursache auf den Bauablauf einwirkt.	Bei einer Einzelvergabe ist die Produktivität eines Trockenbauers zu langsam. Mit bereits deutlicher Verspätung stellt der Trockenbauer die erste Beplankung der geplanten Leichtbauwände her. Laut Ablaufplanung sollen die Elektroarbeiten zeitnah ineinandergreifen. Doch diese Arbeiten sind aufgrund von Änderungswünschen des Bauherrn ebenfalls in der Ausführung langsamer als geplant, so dass der Trockenbauer mit einer zusätzlichen Verspätung die zweite Beplankung montieren kann, damit die Leichtbauwand verschlossen wird.
	Alternative Kausalität	Mehrere Ursachen können bereits durch ein alleiniges Wirken eine bestimmte Bauablaufstörung auslösen. Jedoch ist nicht klar, welche Ursache letztendlich die Bauablaufstörung bewirkt.	Ein Generalunternehmer wurde mit Maler- und Bodenbelagsarbeiten beauftragt. Nach den Malerarbeiten wurde der Boden verlegt. Der Auftraggeber bemerkt Beschädigungen an den abnahmereifen Wänden und vermutet, dass diese durch die Bodenbelagsarbeiten entstanden sind. Der Generalunternehmer behauptet, dass andere Nebengewerke die Wände beschädigt haben, da diese ebenfalls Zutritt zu den Räumlichkeiten hatten. Aus den Unklarheiten und der Mängelbeseitigung ergibt sich eine verlängerte Bauzeit.
Schadensrecht	*Überholende Kausalität* (Hypothetische Kausalität)	Eine Ursache kann eine bestimmte Bauablaufstörung nicht mehr bewirken, da bereits eine vorausgegangene Ursache diese Bauablaufstörung bewirkte.	Eine vom Auftragnehmer hergestellte Fertigteiltreppe verspätet sich innerhalb eines Zeitraums, währenddessen der vom Auftraggeber gestellte Kran defekt war. Trotz Verspätung der Fertigteiltreppe konnte der Einbau erst nach der Reparatur des Krans erfolgen.
	Addierende Kausalität	Eine bereits vorhandene Bauablaufstörung wird durch eine weitere Ursache verstärkt.	Die Bemusterung der Badfliesen verspätet sich um fünf Tage. Nach der Bemusterung bestellt der Fliesenleger versehentlich die falschen Fliesen, so dass sich die Bauzeit um weitere fünf Tage verlängert.

Folglich sind alle möglichen Ursachenbeiträge in Einzelfallbetrachtungen voneinander abzugrenzen, damit die daraus ableitbaren hindernden Umstände sowie die daraus resultierenden hindernden Wirkungen eindeutig voneinander getrennt sind. Somit dürfen Bauablaufstörungen, die aus der Sphäre des Auftragnehmers stammen oder anderweitig

[1153] Eigene Tabelle i. A. a. Duve/Richter, BauR 2006: 608 ff.; Langen, BauR 2011: 381 ff.; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 654-664; Tiesler, 2018: S. 54.

entstanden sind, nicht außer Acht bleiben.[1154] Aus diesen Überlegungen heraus ist es nachvollziehbar, warum der *BGH* verlangt, dass „[…] *jede einzelne Behinderung gesondert zu prüfen ist und einer eigenständigen Beurteilung unterliegt*."[1155]

Aus systemtheoretischer Sicht besteht die Notwendigkeit eines Kausalitätsnachweises in der Bewältigung und „Entschlüsselung" der Komplexität eines Bauablaufs.[1156] Hierzu muss eine *Ordnung* hergestellt werden, die den Ursachenzusammenhang hinreichend verständlich abbildet.

4.4.7 Ermittlung maßgeblicher Verzögerungsdauern durch Soll-Ist-Vergleiche

In diesem Unterkapitel werden Maßnahmen zur Durchführung des Soll-Ist-Vergleichs vorgestellt, woraus die für den zeitabhängigen Anspruch maßgebliche Verzögerungsdauer hergeleitet werden kann. Gemäß *Kapitel 4.1.4* kommt es beim Soll-Ist-Vergleich i. d. R. nicht auf den Soll-Terminplan an, der zum Zeitpunkt der Auftragserteilung erstellt wurde, sondern auf den *fortgeschriebenen Soll-Terminplan*.[1157] Dieser sollte im Wesentlichen die Ausführungsfristen (insbesondere die Vertragsfristen) und Mitwirkungshandlungen des Bauzeitenplans sowie die zeitlichen Preisbildungsfaktoren der Urkalkulation u. v. m. enthalten und muss die jeweilig neue Vertragssituation bis zum Eintritt und Wegfall eines Behinderungssachverhalts umfassen.[1158]

Um diese Aufgabe durchzuführen, ist die Fortschreibung bzw. die ***Störungsmodifizierung*** eines dynamischen Soll-Terminplans unumgänglich. Während der Fortschreibung hat sich dieser störungsmodifizierte Soll-Terminplan an der Dokumentation des tatsächlichen Ist-Bauablaufs zu orientieren,[1159] damit infolge eines Vergleichs zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können.[1160] Dies erfolgt nur über eine objektive Bewertung. Hierzu sind die verfügbaren Informationen der fortentwickelten Soll-Bauablaufmodelle an die zu untersuchenden Gegebenheiten anzupassen, indem sie unter baubetrieblichen Aspekten aus Sicht eines optimalen Beobachters auf ***Plausibilität*** überprüft sowie ggf. überarbeitet werden.

Solche Maßnahmen sind insofern zulässig, da keine Richtigkeitsvermutung für den vom Auftragnehmer erstellten *Terminplan* besteht.[1161] Zum Beispiel ist die nachträgliche Plausibilisierung eines fortentwickelten Soll-Terminplans für einen Kausalitätsnachweis legitim, da *nicht* davon ausgegangen werden kann, dass ein vom Auftragnehmer vorgelegter Bauzeitenplan detailliert genug ausgearbeitet oder gar inhaltlich zweckmäßig erstellt

---

[1154] Vgl. OLG Köln, Beschluss vom 27.10.2014 – Az. 11 U 70/13, IBRRS 2015: 0137.
[1155] BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1156] Vgl. Gnerlich, 2017: S. 86; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 548.
[1157] Vgl. Heilfort, BauR 2017: 182.
[1158] Die Fachliteratur zielt hauptsächlich auf den tatsächlichen ***Störungsbeginn*** ab, der aus der dokumentierten Behinderung abzuleiten ist und mit dem restlichen korrespondierenden Ist-Bauablauf übereinstimmen muss. (siehe *Kapitel 4.2.3*). *Sundermeier* schreibt, „[…] *dass Behinderungstatbestände stets allein anhand der Baustellenumstände zum Zeitpunkt des Störungseintritts zu beurteilen sind*." *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1968.
[1159] Vgl. Thode, ZfBR 2004: 214, 220; Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 1, 4; Drittler, 2017: Rdn. 4:276; Mechnig/Völker/Mack/Zielke, 2014: S. 87.
[1160] Vgl. *Motzke in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 4, Teil C, Rdn. 212.
[1161] Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1573 ff.; siehe hierzu *Kapitel 3.3.1*.

wurde.[1162] Ebenso können sich die technologischen und kapazitiven Abhängigkeiten sowie die ursprünglich geplanten Bauabläufe während der Ausführung ändern, wodurch die ursprüngliche Strukturierung des Bauablaufs hinfällig wird.[1163] *Roquette et al.* beschreiben den Umstand, dass oftmals nur ein vom Auftraggeber erstellter Rahmenterminplan als *Bauzeitenplan* für die Bewertung zur Verfügung steht.[1164] Die Vorgangsdauern solcher Bauzeitenpläne werden teilweise auf Grundlage von Bruttorauminhalten als Mengeneinheiten bestimmt. Deshalb können Bauzeitenpläne sehr ungenau sein. In solchen Terminplänen lassen sich etwaige Verzögerungsanteile nur bedingt einarbeiten. Teilweise wird sogar in der Baupraxis kein Bauzeitenplan vereinbart.

Entgegen dem *OLG Brandenburg*[1165] sprechen sich *einige Autoren*[1166] dahingehend aus, dass auftragnehmerseitige Ansprüche wegen Bauzeitverlängerungen durch das Fehlen eines Bauzeitenplans *nicht* zum Erliegen kommen. Laut *Roquette et al.* darf die nachträgliche Überarbeitung/Erstellung zu Recht nicht „frei erfunden" werden.[1167] Stattdessen ist auf möglichst alle *Anhaltspunkte* zu achten, die im Normalfall vorliegen und bereits bei Vertragsschluss bekannt waren. Zu berücksichtigen sind etwa *zeitliche Annahmen* der Urkalkulation oder weitere Informationen aus den Leistungsbeschreibungselementen. Diese sind plausibel und nachvollziehbar im neu aufgestellten Soll-Terminplan einzuarbeiten.[1168] Eine entsprechende Vorgehensweise begründen *Roquette et al.* damit, dass sich die Rechtsprechung und die Fachliteratur für die nachträgliche Vorlage im Falle einer *fehlenden Urkalkulation* aussprechen, solange die Inhalte der vertraglichen Bauleistungen in sich schlüssig und plausibel abgebildet werden können. Dieser Sicht ist zuzustimmen, da auch bei der Preisbestimmung zusätzlicher Leistungspositionen auf ortsübliche Preise zurückgegriffen werden darf.[1169]

Markus beschreibt, dass die *Arbeitskalkulation* zur Plausibilisierung genutzt werden kann, da diese eine Weiterentwicklung der Urkalkulation darstellt und möglicherweise als die realistischste Soll-Kostenvorgabe anzusehen ist.[1170] *Tiesler* geht auf den geplanten Kapazitätseinsatz ein,[1171] der zusammen mit den Soll-Leistungsmengen sowie den geplanten

---

[1162] Vgl. *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Rdn. 102.
[1163] Vgl. Reister, 2014: S. 478; *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1848; *Sonntag in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 6, Rdn. 59.
[1164] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 570; siehe *Kapitel 3.3.3*.
[1165] Vgl. OLG Brandenburg, Urteil vom 02.12.2015 – Az. 11 U 102/12, IBRRS 2015: 3225.
[1166] Vgl. *Oberhauser in* BeckOK VOB/B, St. 31.10.2017: VOB/B § 6 Abs. 4, Rdn. 6; Mechnig/Bolz, IBR 2016: 76; Heilfort, BauR 2017: 179; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Rdn. 96 ff.; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 570 ff.; *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 8, Rdn. 58, 60; *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1928-1931; Schiffers, 1998: S. 298; Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1566-1601 ff. Hintergründe ergeben sich daraus, dass ein hypothetisch ungestörter Soll-Bauablauf ohnehin oftmals „gefunden" werden muss. Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 83-86. Darüber hinaus kommt es bei der Darlegung von Entschädigungsansprüchen auf *die Dauer des Annahmeverzugs* an. Sie ist der Dokumentation des Ist-Bauablaufs zuzuordnen. Damit aber diese Verzugszeit infolge einer Nachweisführung stichhaltig isoliert wird, sollte aus baubetrieblicher Sicht ein Soll-Ist-Vergleich vorgenommen werden, um bspw. versteckte Pufferzeiten zu identifizieren.
[1167] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 586.
[1168] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 570-574; *Vygen/Joussen in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Rdn. 96 ff.
[1169] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 571-574.
[1170] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 83-84.
[1171] Vgl. Tiesler, 2018: S. 226-227.

Zeitaufwandswerten wesentliche Aspekte zur Ermittlung der Soll-Vorgangsdauern darstellt.[1172] Dazu werden die Einzelauswirkungen von Bauablaufstörungen i. d. R. neben den Bauleistungen vorgangsbezogen in die Terminpläne eingearbeitet. Damit der störungsmodifizierte Soll-Terminplan die in *Kapitel 3.3.1* genannten Anforderungen an Bauzeitenpläne möglichst erfüllt, können die Vorgänge hinsichtlich ihrer zeitlichen Anfangs- und End-Lagen folgendermaßen plausibilisiert werden:

- Verschiebung (auf der Zeitachse),
- Verzögerung/Beschleunigen (Stauchen oder Strecken der Vorgangsdauer),
- Unterbrechung (Aufteilen der Vorgangsdauer in Teilstücke),
- Überlagerung bzw. Überlappung (Nebenläufigkeit der Vorgänge),
- Detaillierung/Abstrahierung (Zerlegen und Zusammenfassen der Ablaufabschnitte),
- Ergänzungen (bspw. neue Behinderungsvorgänge oder Fristen als Meilensteine),
- Umstrukturierung (Wahl der Anordnungsbeziehungen) und
- Erläuterungen (Informationen aus dem Soll- und Ist-Bauablauf).

Es kann erforderlich sein, dass die leistungsbezogenen Ressourcen sowie Bauverfahren aus den Bau-Ist- und den Bau-Soll-Umständen zu berücksichtigen sind.

Bei der Fortschreibung des Soll-Terminplans werden Ist-Daten sukzessiv im Rahmen einer Modifizierung eingearbeitet. Dadurch können mehrere Soll-Terminpläne in Betracht kommen, die je nach Untersuchungsfall als maßgeblich zu erachten sind. Unter Berücksichtigung des kritischen Wegs lassen sich die Fristüberschreitungen als Abweichungen feststellen. Unterdessen können nicht kritische Vorgänge kritisch werden.[1173] Dazu sind verschiedene Varianten im Zuge der Plausibilitätsprüfung durchzuführen.

In der Fachliteratur wurden unterschiedliche Nachweismethoden zur Bewertung der Kausalität ausgearbeitet. Alle verfolgen im Prinzip die Fortschreibung eines Soll-Terminplans, der Bewertungen aus Gegenüberstellungen mit dem Ist-Terminplan ermöglicht. In der vorliegenden Arbeit werden die Nachweismethoden aber nicht vertieft. Hierzu liefern *Möhring* oder *Tiesler* aussagekräftige Publikationen.[1174]

4.4.8 Herausforderungen bei der Fortschreibung der Soll-Bauzeit

Sundermeier schreibt, dass der über § 6 Abs. 3, 4 VOB/B ermittelte Verlängerungszeitraum i. d. R. zur Berechnung entstandener Mehrkosten herangezogen wird.[1175] *Tiesler* zeigte diese Vorgehensweise der Gutachterpraxis in einer Studie.[1176] Gegebenenfalls ist dies *nicht* zielführend, wenn zwischen einzelnen Anspruchsgrundlagen differenziert werden soll (siehe *Kapitel 4.4.6*).

Grundsätzlich ergibt sich der maßgebliche Zeitraum einer finanziellen Behinderungsfolge aus der Differenz zwischen der hypothetisch fortgeschriebenen Soll-Bauzeit und der tatsächlichen Ist-Bauzeit.[1177] Die Anspruchshöhe hängt von der fortgeschriebenen Soll-Bauzeit ab, die den geplanten Arbeitsaufwand widerspiegelt. Wenn nun ein Soll-Terminplan

[1172] Siehe *Kapitel 6*.
[1173] Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 1-5.
[1174] Vgl. Möhring, 2012: S. 73-101; Tiesler, 2018: S. 89-138.
[1175] Vgl. *Sundermeier in* Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Rdn. 1762.
[1176] Vgl. Tiesler, 2018: S. 163.
[1177] Siehe *Kapitel 4.4.7*.

i. S. v. § 6 Abs. 3, 4 VOB/B sukzessiv fortgeschrieben wird, sind darin im Regelfall Vorlauffristen oder Beaufschlagungen etwaiger Wintermonate enthalten, die mit den ursprünglich geplanten Rahmenbedingungen zur Leistungserfüllung nichts mehr gemein haben. Der Zuschlag ist eine angemessene Schätzung und keine baubetriebliche Folgewirkung.[1178] Der Sinn und Zweck eines Kausalitätsnachweises liegt in der *Zurechenbarkeit* und *nicht* in der Verschiebung einer Dauer. Ob die Vergütung trotzdem über den Verlängerungszeitraum anzusetzen ist, sei dahingestellt. Dieses Thema wird, da es eine Kostenfrage ist, hier nicht weiter vertieft.

Weiterhin folgt eine Untersuchung, inwieweit eine *vorkalkulatorische Preisfortschreibung*[1179] mit den Kostenansätzen der Urkalkulation für eine baubetriebliche Bauzeitanalyse geeignet ist. Die Vorgehensweise einer vorkalkulatorischen Preisfortschreibung ist im Hinblick auf eine baubetrieblich-kausale Darlegung umstritten.[1180] Sie ist u. a. deshalb umstritten, weil bei der Fortschreibung zusätzlicher Leistungen i. S. v. § 2 Abs. 6 VOB/B teilweise auf ortsübliche Preise zurückgegriffen wird, die der Auftragnehmer während seiner Angebotserstellung möglicherweise nicht voraussehen konnte.[1181] Die Befürworter der vorkalkulatorischen Preisfortschreibung begründen, dass allein durch die Änderung oder Erweiterung der Leistung ebenso die kalkulatorischen Aufwands- und Leistungswerte als Preisbestandteile der betroffenen Leistungsposition mitberücksichtigt werden.[1182] Darunter fallen die jeweiligen Produktivitätsfaktoren der geplanten Bauleistungen, die z. B. die Arbeitsstunden der einzusetzenden Arbeitskräfte oder Gerätestunden usw. umfassen.

Bei der vorkalkulatorischen Preisfortschreibung wird *kritisiert*, dass der Mehr- und Minderaufwand einer möglichen Bauzeitverlängerung von *einer realitätsnahen Betrachtung* abweicht und die damit verbundenen Mehr- und Minderkosten *nicht angemessen* berücksichtigt werden.[1183] Die Aufwands- und Leistungswerte der Preisbildung besitzen eine indizielle Bedeutung zur Bestimmung der *verpreisten (Soll-)Produktivität* und sind im Rahmen der Preisfortschreibung für den konkret zu ermittelnden Aufwand relevant.[1184] *Franz* argumentiert: „*Der Mehraufwand ist* […] *anhand der eingetretenen Modifikation der Leistung gegenüber der vertraglich vereinbarten Leistung konkret zu ermitteln. Es muss festgestellt werden, in welchem Maße sich der Aufwandswert erhöht hat. Dieser Mehraufwand kann nicht aus der Urkalkulation hergeleitet werden. Der geänderte Aufwand wird auf Nachweis vergütet. Eine kalkulatorische Fortschreibung verbietet sich.*“[1185] Die Argumentation *gegen* die vorkalkulatorische Preisfortschreibung stützt sich auf diese

[1178] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 405; *Berger in* Beck’scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 4, Rdn. 15.
[1179] Siehe *Kapitel 4.4.8*.
[1180] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 61; Althaus, BauR 2012: 359-379.
[1181] Vgl. Franz/Kues, BauR 2010: 678; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 52-55.
[1182] Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 222; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 61; Weise, NJW-Spezial 2018b: 492-493.
[1183] Vgl. *Schade/Schmid in* Motzke/Bauer/Seewald, 2018: § 5, Teil C, Rdn. 344, Fn. 3463; Zanner/Saalbach/Viering, 2014: S. 104-105; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 861 ff., 911 ff.; Althaus, ZfBR 2007: S. 414 ff.; Althaus, BauR 2012: 363-364; Franz/Kues, BauR 2010: S. 678-687; Franz, BauR 2012: 393; Tiesler, 2018: S. 164, 292-293.
[1184] Vgl. *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 222.
[1185] Franz, BauR 2012: 393.

Überlegung. Folglich würden unplausible Annahmen das baubetriebliche Argumentationsgerüst eines Kausalitätsnachweises in der Sachlogik sprengen,[1186] vor allem, wenn diese auf einer bloßen Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Bauzeiten beruhen.

Die Fortschreibung spekulativ ermittelter Preise ist von höchst hypothetischer Natur, denn sie berücksichtigen keine realistischen oder angemessenen Ergebnisse zur Entstehung und zum Umfang einer Bauablaufstörung.[1187] Laut *Althaus* können sich die vorkalkulatorischen Leistungsansätze in der Praxis als zu hoch oder als zu niedrig gegenüber der tatsächlichen Ausführungszeit erweisen.[1188] Schließlich führt der Auftragnehmer seine Preisgestaltung prognoseartig aus und kann diese frei bestimmen.[1189] Bei der vorkalkulatorischen Preisfortschreibung ist im Zuge eines Kausalitätsnachweises anzunehmen, dass der streitgegenständliche Lebenssachverhalt des Soll-Bauablaufs sich als ein prognoseartiger Tatsachenkomplex darstellt, der grundsätzlich ein erdachtes – und kein wirklichkeitsgetreues – System beschreibt.

Es ist selbsterklärend, dass die Störungsmodifikation komplexer Bauabläufe, bei der abstrakte Soll- und tatsächliche Ist-Informationen miteinander „vermischt" werden, zu inkonsistenten Ergebnissen führt. Die Einarbeitung und Orientierung am Ist-Bauablauf dürfte regelmäßig dazu beitragen, dass auf Grundlage einer Gegenüberstellung argumentiert wird, die fernab jeglicher wirklichkeitsgetreuen Betrachtung liegt. *Tiesler* zeigt aus baubetrieblicher Sicht, dass es bei der Bewertung von Bauablaufstörungen gerade auf eine realitätsnahe Bauzeitanalyse ankommt; so würde die Fortschreibung spekulativ ermittelter Zeitdauern zwar den Preis als Angebot weiterhin berücksichtigen, jedoch kaum noch die zeitliche Kausalität.[1190]

Im Jahr 2013 entschied der *BGH*: „*Gehen die Parteien übereinstimmend davon aus, dass die Berechnung des neuen Preises im Wege einer Fortschreibung der dem Vertrag zu Grunde liegenden Kalkulation* […] (*und nicht anhand tatsächlicher oder üblicher Kosten) zu erfolgen hat, ist das Gericht daran gebunden*."[1191] Das Kammergericht äußert zu der Entscheidung: „*Für den Fall, dass der BGH doch die Auffassung vertreten sollte, die Mehrvergütung nach § 2 Abs. 5 und 6 VOB/B sei in dem Sinne aus der Kalkulation des Unternehmers abzuleiten, dass im Streit der Vertragsparteien über die Höhe der Mehrkosten des Unternehmers, also die kalkulierten und nicht die tatsächlichen Kosten maßgeblich seien, vermag sich der Senat dem nicht anzuschließen*."[1192]

Ob die Preisfortschreibung letztendlich ausschließlich auf eine tatsächliche oder vorkalkulatorische Weise erfolgt, wurde vom *BGH* nicht eindeutig entschieden – laut der Fachliteratur werden für beide Varianten Vor- und Nachteile genannt.[1193] Das neue

[1186] Vgl. Althaus, BauR 2012: 359-379; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 1379 ff.; siehe *Kapitel 4.5*.
[1187] Vgl. Tiesler, 2018: S. 296 ff.
[1188] Vgl. Althaus, BauR 2012: 364.
[1189] Vgl. Franz/Kues, BauR 2010: 678.
[1190] Vgl. Tiesler, 2018: S. 299. Beim Nachweisverfahren von *Tiesler* werden daher die kausalen und preisbildenden Zusammenhänge durch einen Kontroll-Balken voneinander entkoppelt.
[1191] BGH, Urteil vom 14.03.2013 – Az. VII ZR 142/12, IBRRS 2013: 1570 (erster Leitsatz).
[1192] KG, Urteil vom 10.07.2018 – Az. 21 U 30/17, IBRRS 2018: 2231 (aktueller Stand: nicht rechtskräftig).
[1193] Vgl. *Kapellmann in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 2, Rdn. 213; *Kues in* Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB/B § 2, Rdn. 222; *Jansen in* Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: § 2 Abs. 5, Rdn. 61-62.

Bauvertragsrecht gewährt ebenso eine Wahlfreiheit für beide Varianten bezüglich *tatsächlich erforderlicher Kosten*.

Die Problemstellung wird undifferenzierter, indem nicht nur rechenbare Preise, sondern prinzipiell auch ***Preisabsprachen*** laut § 2 VOB/B erlaubt sind, die gänzlich von den vorkalkulatorischen sowie von den plausiblen Soll-Bestimmungen abweichen können. Hierüber lassen sich Soll-Termine vereinbaren, die ggf. von den tatsächlich erforderlichen (plausiblen) Annahmen losgelöst sind. Obwohl Preisabsprachen mit der Fortschreibung der Soll-Bauzeit einhergehen, bleiben weiterhin Preis- und Kostenfragen außen vor.

Ferner besteht bei der Fortschreibung der Soll-Bauzeit eine Diskrepanz zwischen der baurechtlichen und der baubetrieblichen Sichtweise. Aus *baurechtlicher Sicht* lassen sich die Aufwands- und Leistungswerte als Bestandteil der äquivalenten Vergütung im Gegenseitigkeitsverhältnis des Schuldrechts verstehen. Aus *baubetrieblicher Sicht* stellen sie Produktivitätskennzahlen zur Prognose einer Produktionszeit mit eventuellen Pufferzeiten als Sicherheitszuschläge dar.

Erkenntnisse für die Simulation:

Simulationsanwendungen benötigen i. d. R. *realitätsnahe* Aufwands- und Leistungswerte, da die Stärken der Simulation vorwiegend in der Plausibilisierung dynamischer Prozesse liegen. Eine rein hypothetische Fortschreibung eines Soll-Bauablaufs ließe keine Validierung des Simulationsmodells zu. Dies würde den Einsatz der Simulation für eine Ex-post-Bewertung gestörter Bauabläufe weitestgehend sinnentleeren.

Im folgenden *Kapitel 4.6* wird eine Zwischenlösung angestrebt mit dem Vorschlag eines *Benchmarkings*[1194] über simulierte Ausführungsprozesse. Der Fokus ist auf baubetrieblich zu prüfende Aufwands- und Leistungswerte gerichtet, die aus der Urkalkulation zu entnehmen und zweckmäßig im Simulationsmodell einzubinden sind. Wie sich Preise im Einzelnen zusammensetzen oder sich aus der Urkalkulation Vorgangsdauern ableiten lassen, ist kein Thema dieser Arbeit. Hier wird auf die Fachliteratur verwiesen.[1195]

4.4.9 Zwischenfazit

Zur Durchführung eines baubetrieblichen Kausalitätsnachweises existiert kein allgemeingültiger Lösungsansatz. Sachbezogen und zutreffend formuliert *Drittler* ein grundlegendes Prinzip mit der Fragestellung: „*Warum veränderte sich der Bauablauf von Soll nach Ist?*“[1196] Dafür muss die „[…] *Ermittlung des Aufwands, den der Auftragnehmer gehabt hätte, wäre er nicht behindert worden,* […] *so wirklichkeitsnah wie möglich sein*.“[1197] Darauf aufbauend ist zwischen Anspruchsgrund und Anspruchshöhe zu differenzieren.

[1194] Näheres folgt in *Kapitel 8.3*.
[1195] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 909 ff.
[1196] Drittler, 2017: Rdn. 4:208.
[1197] Drittler, 2017: Rdn. 4:222.

Zusammenfassend sollten nachvollziehbare Gegenüberstellungen zwischen Soll- und Ist-Informationen stattfinden, die möglichst

- zeitabhängige Ansprüche gem. *Kapitel 4.3* baubetrieblich untermauern;
- auf aussagekräftigen Behinderungsanzeigen gem. § 6 Abs. 1 VOB/B beruhen;
- eine Terminplanfortschreibung inkl. Zuschlägen gem. § 6. Abs. 2-4 VOB/B erlauben;
- die Wiederaufnahme- und Weiterführungspflicht gem. § 6 Abs. 3 VOB/B, als Ausprägung der Schadensminderungspflicht gem. §§ 242, 254 BGB (Pufferzeiten, Kosten, Umstellung), nicht außer Acht lassen;
- den kritischen Weg als Bewertungsmaßstab für Pufferzeiten beachten (Fristen);
- die Auskömmlichkeit der Preisbildung berücksichtigen;
- Behinderungsanteile aus dem Risikobereich des Auftraggebers, des Auftragnehmers sowie neutrale Behinderungsanteile enthalten;
- neue Vertragsbestandteile aufnehmen können;
- Gegenüberstellungen zwischen ungestörten und gestörten Sachverhalten ermöglichen;
- neutrale Vereinbarungen hinsichtlich des Soll-Bauablaufs berücksichtigen;
- auf einer objektiv-realisierbaren Darstellung basieren (nicht auf hypothetischen Annahmen);
- rechenbar bzw. reproduzierbar sein müssen;
- sich am Ist-Bauablauf orientieren (Dokumentation, Protokolle etc.);
- die *Leistungsbereitschaft des Auftragnehmers*[1198] im Bau-Soll und Bau-Ist berücksichtigen;
- unrealistische Bauausführungen identifizieren können;
- einen produktionsorientierten Bauablauf zur Plausibilisierung betrachten und
- verständliche oder erklärende Ergebnisse durch prüfbare Anhaltspunkte aufzeigen können.

Darüber hinaus sind möglichst alle relevanten Informationen ihrer jeweiligen Semantik angemessen, d. h. objektiv in die Bauzeitanalyse einzubeziehen. In den weiteren Unterkapiteln folgen wichtige Vorüberlegungen für den Lösungsansatz.

[1198] Die Leistungsbereitschaft gilt als allgemeiner Beweislastgrundsatz, den der Auftragnehmer laut *Kapellmann et al.* nicht darzulegen oder zu beweisen hat. Vgl. Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1642 (und Rdn. 1357). Für eine baubetriebliche Abgrenzung verschiedener Störungsanteile kann dies dennoch sinnvoll sein, weil dadurch die geplanten Absichten des Auftragnehmers überhaupt erst ersichtlich werden. Vgl. Franz/Möhring/Gnerlich/Tiesler, 2018: S. 139.

4.5 Zusammenfassende Erkenntnisse und Arbeitshypothesen

4.5.1 Verständnis von einer „konkreten bauablaufbezogenen Darstellung“

Die vom *BGH* geforderte *konkrete bauablaufbezogene Darstellung*[1199] wird von Baubetrieblern und Juristen unterschiedlich interpretiert.[1200] In dieser Arbeit unterliegt sie einem baubetrieblichen Verständnis. Hierbei kommt es auf einzelfallbezogene Rekonstruktionen realisierbarer Bauabläufe an, mit denen Ursachenzusammenhänge sachlogisch aufzuzeigen sind.[1201] Solche Rekonstruktionen sind mit dem Erkenntnisgewinn aus *Kapitel 2.1.4* – „*wo Ordnung ist, da ist auch Information*“ – zusammenzubringen.

Laut *Drittler* ist der Nachweis einer Bauzeitverlängerung gem. *Kapitel 4.2.3* erst dann „konkret“, wenn aufgezeigt werden kann, wie eine Behinderung im Bauablauf *tatsächlich* wirkte.[1202] Dieser Aussage ist zuzustimmen. Hinsichtlich einer systemanalytischen Herangehensweise, gem. *Kapitel 2.1*, findet hierzu eine differenziertere Betrachtung statt. Demnach kann der Nachweis einer „tatsächlichen Wirkung“ aufgrund allgemeiner objektiver Begutachtungen grundsätzlich allenfalls eine „logische Wirkung“ sein.[1203] Schon allein aus Beobachtungsgründen heraus können Soll- oder Ist-Bauabläufe niemals naturwissenschaftlich exakt – dafür aber sachlogisch – rekonstruiert werden.[1204]

Entsprechend sind die baubetrieblichen Nachbildungen bestenfalls in Form von wirklichkeitsnahen Bauablaufmodellen möglich. Sie können hinreichend genau mit den Angaben der streitgegenständlichen Dokumentation korrelieren und zugleich ablaufbezogen, sachlogisch kausal aufgebaut sein. Mithilfe dieser Ablauflogik sind, falls erforderlich, mehrere vertragsrechtliche Aspekte zu untermauern oder substantiierte Zusammenhänge zum Ausdruck zu bringen. Erst dann kann von einem schlüssigen Vorhandensein „tatsächlicher Wirkungen“ ausgegangen werden.

Diese aus dem Nachweis gewonnene Ablauflogik bleibt so lange authentisch, bis sie durch eine fundierte Einwendung unwiderlegbar „erschüttert“ wird.[1205] Insgesamt lässt sich eine logische Wirkung nur auf ihre Gültigkeit anhand nachweisbarer Tatsachenbehauptungen prüfen. *Möhring* definiert hierzu passend einen „[…] *tagegenauen realisierbaren* [Bauablauf] *in erweiterter Form eines produktionsorientierten Detailterminplans* [zur] *Darlegung der baubetrieblichen Zusammenhänge* […] *an die Gegebenheiten des jeweiligen*

[1199] Siehe *Kapitel 4.4.3*.

[1200] Vgl. Roquette/Bescher, BauR 2018: 429-430.

[1201] Vgl. Möhring, 2012: S. 129-131. *Möhring* beschreibt, dass der Begriff „konkret“ auf die Tatsächlichkeit abstellt. Vgl. Möhring, 2012: S. 130.

[1202] Vgl. Drittler, BauR 2017: 1935. „*Immer wenn der Bundesgerichtshof „konkret“ sagt, meint er: mit der Wirklichkeit übereinstimmend oder im anspruchsausfüllenden Nachweisbereich der Wirklichkeit zumindest möglichst nahe kommend. Das erfordert per se die Berücksichtigung aller Behinderungswirkungen, jener aus dem Risikobereich des Auftraggebers und aus dem Risikobereich des Auftragnehmers*.“ Drittler, 2017: Rdn. 4:288.

[1203] Zur Schadensberechnung gem. §§ 249 ff. BGB schreibt z. B. *Magnus*: „*Eine konkrete Berechnungsweise, die genau ermittelt, welche Einbuße der Geschädigte im Einzelnen erlitten hat, entspricht auch am besten dem Ausgleichszweck des Schadensrechts, denn nur dieser konkrete Schaden soll ausgeglichen werden.* [...] *Praktikabilitätsgründe und die Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Ergebnis führen jedoch in einigen Fällen dazu, dass der Geschädigte statt der konkreten eine abstrakte Berechnung wählen kann und unter Umständen sogar wählen muss*.“ *Magnus in* NK-BGB, 2016: Vorbem. §§ 249-255, Rdn. 111.

[1204] Vgl. *Markus in* Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB/B § 6, Rdn. 86.

[1205] Vgl. Roquette/Bescher, BauR 2018: 422 ff. Siehe auch Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1577, 1642.

Leistungsbereiches, aus welcher sich der geplante (Soll) und der tatsächliche (Ist) Ablauf zwischen jedem tatsächlichen Störereignis erkennen [lässt]. *Zudem ist der tatsächliche Ablauf mit baubetrieblichen Instrumenten zur Erfassung und Beweissicherung zu verifizieren* […]."[1206] So kann der Begriff „konkret" auf folgende baubetriebliche These eingegrenzt werden:

These 1 – Der Begriff „konkret"

Alle dokumentierten *Tatsachen* sind *konkrete Informationen*. Bei einer baubetrieblichen Nachweisführung müssen diese in eine *objektive Ordnung* überführt werden, damit sie eine zusammenhängende Gesamtinformation bilden. Sie beschreiben indikative Systemzustände und lassen sich *nur* aus *gegenständlichen Dokumenten* vom zeitnah dokumentierten Bau-Soll und Bau-Ist entnehmen, die zur Sachverhaltsaufklärung *kommentiert* werden dürfen. Zusammen mit *bestimmten* oder *bestimmbaren Terminen* bilden sie ***konkrete Anhaltspunkte***. Unlogisch erscheinende oder nicht begründbare Informationen sind hingegen weder plausibel noch konkret.

Gemäß der *These 1* setzt sich ein Anhaltspunkt aus einer beliebigen Menge konkreter Informationen zusammen. Jeder Anhaltspunkt erhält genau einen bestimmten oder einen bestimmbaren Termin. *Abbildung 4-8* skizziert, wie mehrere konkrete Informationen aus einem Dokument entnommen und einem Anhaltspunkt zugewiesen werden können. Zusätzlich wird die zeitliche Verteilung der konkreten Informationen über die termingebundenen Anhaltspunkte illustriert.

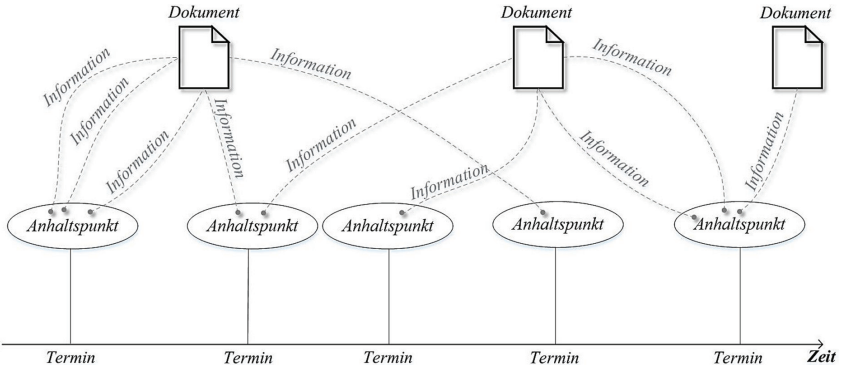


Abbildung 4-8: Zeitliche Verteilung konkreter Informationen mit Anhaltspunkten[1207]

Alle Informationen aus verfügbaren Dokumenten, die einem bestimmten Termin angehören, sind als Anhaltspunkte zu gestalten. Bei der Auswertung der Dokumente kann es vorkommen, dass sich mehrere konkrete Informationen einen identischen Termin – und damit einen Anhaltspunkt – teilen. Sollten die konkreten Informationen inhaltlich verschiedene Sachverhalte wiedergeben, können sie bei identischen Terminen trotzdem in

[1206] Möhring, 2011: S. 40. *Möhring* bezieht sich auf die VOB/B und führt aus, dass der Behinderungsanzeige und deren Abmeldung eine zentrale Bedeutung zukommt.
[1207] Eigene Darstellung.

einem Anhaltspunkt zusammengefasst werden (eine Unterscheidung lässt sich später anhand ihrer Quellen vornehmen). Demzufolge können alle geplanten

- vertragsrechtlichen Bestandteile des Soll-Bauablaufs,
- terminbestimmenden Informationen der Leistungsbeschreibungselemente,
- vereinbarten Nachträge und Vertragstermine oder
- nachweisbare Absprachen usw.

als Soll-Anhaltspunkte ausgearbeitet werden. Zudem lassen sich terminbestimmbare Informationen als Soll-Anhaltspunkte realisieren. Dies können Produktionsfaktoren der geplanten Arbeitsaufgaben sein, mit denen sich vorgangsbezogene Fertigungsdauern berechnen lassen, wie Zeitbedarfswerte der Urkalkulation oder einzusetzende Kapazitäten.

Für ein Ist-Bauablaufmodell sind terminierte Informationen zu erfassen, um daraus Ist-Anhaltspunkte zu bilden. Sie können aus Bautagesberichten, Bauplänen oder Fotos stammen, die mit einem bestimmten Termin übereinstimmen. Bei Störungsursachen sollten Ist-Anhaltspunkte möglichst konkrete Informationen über Verursacher, Eintrittszeitpunkt, die Dauer und den Umfang einzelfallbezogen zusammenfassen. Weitere Anhaltspunkte können aus Leistungsständen des tatsächlich dokumentierten Ist-Bauablaufs gewonnen werden. Sobald sich den Dokumenten Informationen für eine bestimmte Zeitdauer entnehmen lassen, wie z. B. eine Behinderungsanzeige und ihre Abmeldung, sind daraus *zwei Anhaltspunkte* zu bilden: einen für den Anfang und einen für das Ende. Sollten sich zusätzlich Zwischenstände zu vereinzelten Terminen zweifelsfrei aus den Dokumenten ergeben, dürfen diese ebenfalls als konkrete Informationen verwendet werden. Wenn nötig, wird dafür ein neuer Anhaltspunkt erstellt.

Die Bildung von Anhaltspunkten ist ein rein zeitbezogenes und (zunächst) zusammenhangloses Ordnungsschema. Es definiert termindiskrete Systemzustände in einer chronologischen Sortierung. Hier existieren weder Systemteile noch Systemgrenzen und keine Wirkungsbeziehungen, die in ihrer vorliegenden Form produktionsbezogene Ausführungsprozesse darstellen. Um daraus ein Bauablaufmodell zu bilden, muss ein sachlogischer Zusammenhang zwischen konkreten Informationen hergestellt werden. Der Detaillierungsgrad der konkreten Informationen bzw. deren Betrachtungstiefe ist vom Beobachter festzulegen. Je detaillierter der Informationsgehalt gewählt wird, umso genauere Aussagen sind in einer späteren Bauzeitanalyse möglich; dieser darf dennoch nicht zu detailliert gewählt werden, damit „der Blick aufs Wesentliche“ erhalten bleibt.[1208] *Roquette et al*. merken hierzu an, dass bei baubetrieblichen Gutachten durchaus ein feinerer Detaillierungsgrad erforderlich werden kann als vergleichsweise bei einem Nachtragsangebot.[1209]

Zusammenfassend werden mit dem Wort „konkret“ die Informationen belegbarer Dokumente und deren sachlogischer Zusammenhang verstanden. Darüber hinaus umfasst „konkret“ auch diejenige Ablauflogik, bei der aufgrund einer Behinderung eine Bauzeitverlängerung eintreten musste. Hieraus wird übergangsweise die *These 2* für das Wort „bauablaufbezogen“ gebildet:

[1208] Vgl. Möhring, 2012: S. 148.
[1209] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 585.

These 2 – Der Begriff „bauablaufbezogen“

Erst wenn die konkreten Informationen in einem in sich schlüssigen und sinngemäßen Zusammenhang stehen, liegt eine ***Plausibilität*** vor. Falls dies nicht gelingt, liegt eine ***Nichtplausibilität*** vor. Die Plausibilität steht für die *Ablauflogik* und *Gültigkeit* eines rekonstruierten Bauablaufs. Die Anhaltspunkte dienen der Plausibilität als Orientierungshilfen und letztendlich als Argumentationsgrundlage für das folgerichtige Ineinandergreifen verschiedener Ausführungsprozesse. Abzugrenzen von der Plausibilität ist die ***Machbarkeit***. Mit ihr wird eine *angemessene Produktivität* beschrieben. Von einer ***Nichtmachbarkeit*** wird gesprochen, wenn z. B. ein plausibler Bauablauf nach angemessener und fachlich begründeter Beurteilung zu schnell oder zu langsam voranschreitet.

Zur nachträglichen Bewertung von Bauabläufen können die Plausibilität, die Nichtplausibilität sowie die Machbarkeit oder Nichtmachbarkeit Ergebnisse einer Bauzeitanalyse sein.

Die *These 2* schafft indirekte Voraussetzungen zur Erstellung einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung, indem auf die Plausibilität eines Bauablaufmodells eingegangen wird. *Mechnig et al*. beschreiben, dass mit dem Begriff „bauablaufbezogen“ „[…] *den Besonderheiten der tatsächlichen Entwicklung des Bauablaufs Rechnung getragen werden muss, also dass insbesondere auch anderweitige Störungen, die der Auftraggeber nicht zu vertreten hat* […,] *ersichtlich werden müssen*.“[1210] Dieser Aussage ist zuzustimmen. Bei einer Nachweisführung sollte auf den jeweiligen Einzelfall eingegangen werden, damit keine vom Untersuchungsziel abweichende Analyse stattfindet. Gleichzeitig ist eine realitätsnahe Rekonstruktion eines fortgeschriebenen Soll-Bauablaufmodells erforderlich, das sich für die Gegenüberstellung mit einem Ist-Bauablaufmodell eignet. Daher muss eine sukzessive Anpassung zwischen Soll- und Ist-Bauablaufmodell ermöglicht werden.

Es ist empfehlenswert, dass ein Behinderungssachverhalt baubetrieblich kausal nachgebildet wird, damit sich dieser möglichst plausibel darstellt. Die zu untersuchende Baustellensituation muss – unter Berücksichtigung der Tatbestandsvoraussetzungen der jeweiligen Anspruchsgrundlage – angemessen bzw. dem Zweck entsprechend rekonstruiert werden. Zum Untersuchungszweck zählen auch vom Auftragnehmer verursachte Bauablaufstörungen. Ihr logischer Hergang ist ebenso plausibel zu rekonstruieren. Mit dieser Vorgehensweise sollten eine klare Abgrenzung zwischen mehreren Verursacheranteilen und ihre zeitliche Auswirkung auf den Bauablauf, in Verbindung mit den jeweiligen materiellrechtlichen Ansprüchen, erreicht werden können.

Für die einzelfallbezogenen Bauzeitanalysen müssen die konkreten Informationen der Soll- und Ist-Bauabläufe derartig aussagekräftig in ihrer Gesamtheit sein, um infolge eines Soll-Ist-Vergleichs die Anforderungen der freien Beweiswürdigung gem. § 286 ZPO zu erfüllen.[1211] Ebenso sind die konkreten Informationen beim Nachweis der adäquaten haftungsausfüllenden Kausalität zu berücksichtigen. Die Darlegungserleichterung aus § 287 ZPO führt „[…] *nicht dazu, dass der Auftragnehmer eine aus einer oder mehreren*

[1210] Mechnig/Völker/Mack/Zielke, NZBau 2014: 87. Die Aussagekraft des Zitats wurde inhaltlich begrenzt. *Mechnik et al*. gehen auf eine „grafische Darstellung“ ein.
[1211] Siehe *Kapitel 4.4.2*.

Behinderungen abgeleitete Bauzeitverlängerung nicht möglichst konkret darlegen muss."[1212] *Jansen und von Rinteln* heben hervor, dass die Ergebnisse einer Bauzeitanalyse mit einzelfallbezogenen Plausibilitätskontrollen überprüft werden müssen, da eine genaue Abbildung des Bauablaufs trotz einer ausreichenden Dokumentation nicht ohne Weiteres möglich sei.[1213]

Für diese Plausibilitätskontrolle sind **alle relevanten Systemzustände, die sich zwischen den Anhaltspunkten befinden, baubetrieblich zu *approximieren*** (siehe *Abbildung 4-9*). Die Approximation soll dazu beitragen, dass baubetriebliche Wirkungen nicht unüberlegt aus dem Zusammenhang gerissen werden und sich der *Lebenssachverhalt*[1214] in seiner zusammenhängenden Gesamtheit logisch darstellt. Dazu sind die Wirkungsbeziehungen der Soll- sowie Ist-Bauablaufmodelle möglichst realitätsnah abzubilden, damit die konkreten Informationen der Anhaltspunkte in folgerichtigen Abhängigkeiten zueinander stehen – nur so lässt sich aus konkreten Informationen ein produktionsbezogener Soll- und/oder Ist-Bauablauf plausibel rekonstruieren bzw. **bauablaufbezogen** darstellen.

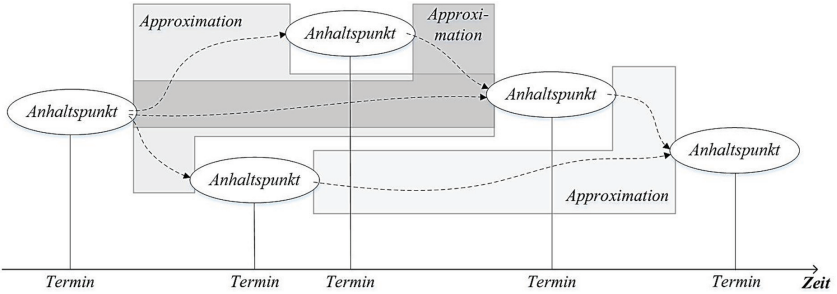


Abbildung 4-9: Abstrakte Skizze einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung[1215]

Die Approximation ist für Soll- sowie für Ist-Bauablaufmodelle gleichermaßen geeignet. Sie zeigt noch keinen Soll-Ist-Vergleich auf, sondern eine dafür angemessene Ausgangssituation, die als Grundlage für das entwickelte Nachweisverfahren dient.

Möglicherweise erscheinen dokumentierte Daten über den geplanten Soll-Bauablauf auf den ersten Blick interpretationswürdiger als die des tatsächlichen Ist-Bauablaufs. Die Interpretationswürdigkeit des Soll-Bauablaufs lässt sich anhand der Dispositionsfreiheit des Auftragnehmers verdeutlichen, die zum Zeitpunkt der Auftragserteilung unbekannt ist. In der Regel wird sie wie weitere Ursachen, die für das „natürliche Schwanken" der Ausführungsprozesse[1216] verantwortlich sind, prognoseartig in der Arbeitsvorbereitung berücksichtigt.

[1212] BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1213] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 781.
[1214] Siehe *Kapitel 4.4.1*.
[1215] Eigene Darstellung.
[1216] Vgl. AbouRizk/Halpin, 1990: S. 576.

Vergleichsweise dazu kann der Ist-Bauablauf ebenfalls ein Stück weit unvollständig oder gar falsch dokumentiert worden sein, da dieser sich nur aus stichpunktartigen Momentaufnahmen zusammensetzt, die teilweise auf einer ungenauen Datenerfassung beruhen. Beispielsweise zeigt eine nicht repräsentative Umfrage der Bauhaus-Universität Weimar, dass nur *22 %* der *26* befragten Bauleiter ihre Bautagesberichte täglich führen.[1217] Eine weitere nicht repräsentative Umfrage der Universität Kassel gibt ein tendenziell ähnliches Ergebnis wieder.[1218] Laut der Umfrage führen ca. *28,57 %* der befragten *21* Architekten und Ingenieure eine tägliche Dokumentation durch.[1219]

Darüber hinaus sollten die Befragten grob abschätzen, wie viel Prozent aller Bauablaufstörungen überhaupt während einer Dokumentation erfasst werden *können*. Demnach gehen *23,81 %* der Befragten davon aus, dass sich zwischen *40* und *60 %* aller Bauablaufstörungen dokumentieren lassen.[1220] Insgesamt *19,05 %* schätzen, dass zwischen *80* und *100 % aller* Bauablaufstörungen erfasst werden können.[1221] In der anderen Studie geben *14 %* der Befragten an, dass die Genauigkeit des tatsächlichen Bauablaufs durch das Bautagebuch wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden kann.[1222] Demnach führt der überwiegende Teil der Befragten keine tägliche Dokumentation durch. Sie nehmen an, dass der tatsächliche Ist-Bauablauf nur unscharf erfasst werden kann.

Mehrere Autoren vertreten die Meinung, dass die manuelle Erfassung von Ist-Daten regelmäßig zu Ungenauigkeiten bei der Nachbildung virtueller Baustellensituationen führen, weshalb diese korrektiv anzupassen sind.[1223] Selbst bei einer automatisierten Dokumentation können „Lücken" in späteren Rechtsfragen entstehen, da die Erfassungsinstrumente für bestimmte Datentypen voreingestellt sind. Somit können auch bei automatisierten Ansätzen zur Erfassung von Ist-Leistungsständen ungenaue Beobachtungsgründe vorliegen. *Song und Eldin* nennen mögliche Gründe, indem sie darauf eingehen, dass gerade bei komplexen Bauprojekten höhere Kosten infolge einer manuellen Datensammlung entstehen können.[1224]

Demnach wird deutlich, dass neben Daten über den Soll-Bauablauf auch Daten über den Ist-Bauablauf ggf. nicht in vollständiger und widerspruchsfreier Form vorliegen.[1225] Aus diesem Grund sollten die Ist-Informationen hinreichend auf Plausibilität und Machbarkeit geprüft werden, bevor sie für einen Kausalitätsnachweis als Vergleichsgröße dienen. Jedoch ist die Verwendung von absolut(!) fehlerfreien Informationen keine Voraussetzung einer glaubwürdigen Nachweisführung.[1226] Streng genommen ist die Verwendung unscharfer Informationen im Rahmen der freien Beweiswürdigung sogar zulässig, solange nicht die

[1217] Vgl. Rutzen, 2009: S. 58.
[1218] Die Rücklaufquote lag bei *4,76 %*. Vgl. Daban/Kashefi, 2016: S. 17.
[1219] Vgl. Daban/Kashefi, 2016: S. 46.
[1220] Vgl. Daban/Kashefi, 2016: S. 46.
[1221] Vgl. Daban/Kashefi, 2016: S. 46.
[1222] Vgl. Rutzen, 2009: S. 64-65.
[1223] Vgl. AbouRizk/Halpin, 1990: S. 576 ff.; Choi, 2011: S. 765; Szczesny/König, 2015: S. 2; Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: S. 4; Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 18.
[1224] Darum streben sie eine automatisierte Datenerfassung an. Vgl. Song/Eldin, 2012: S. 32-33.
[1225] *Diederichs und Streckel* beschreiben, dass selbst mit einem (ungestörten) Soll-Bauablauf ein Soll-Ist-Vergleich *nicht* gelingen muss. Für die Abweichungen nennen sie unscharfe Leistungs- bzw. Zeitaufwandswerte sowie unterschiedliche Ausführungsreihenfolgen beider Bauabläufe. Vgl. Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 2. Vergleichbare Herausforderungen liegen bei der Durchführung von Simulationsstudien vor (siehe *Kapitel 8.3.4*).
[1226] Siehe *Kapitel 4.4.1* und *Kapitel 4.4.2*.

Wahrheitspflicht verletzt wird; ob letztendlich ein Anspruch mit unscharfen Anhaltspunkten „für wahr zu erachten sei", ist eine andere Frage, die in strittigen Fällen durch das Ermessen des Gerichts zu klären ist.[1227] Der Senat des *BGH* meint, dass die Darlegung des Auftragnehmers bereits dann ausreichend ist, „[…] *wenn diejenigen Tatsachen vorgetragen werden, die in Verbindung mit einem Rechtssatz geeignet und erforderlich sind, das geltend gemachte Recht zu begründen*. […] *Maßgeblich ist nicht die Fülle der Details. Vielmehr kommt es darauf an, ob sich aus der Darstellung des Auftragnehmers nachvollziehbar ergibt, dass und in welchem Umfang eine Pflichtverletzung eine Behinderung verursacht hat*."[1228] Dennoch dürfen sich keine Widersprüche infolge eines zu abstrakten Vortrags ergeben.[1229] Selbsterklärend ist daher die Bedeutung einer sorgfältig geführten Dokumentation,[1230] mit der die vom *BGH* geforderte baustellenbezogene Darstellung der Ist- und Soll-Bauabläufe überhaupt erst möglich wird.[1231]

Zusammenfassend wird unter „bauablaufbezogen" die Entwicklung eines realisierbaren Bauablaufmodells verstanden, das aus Anhaltspunkten abzuleiten ist. Die Bezeichnung trifft gleichermaßen auf den Soll- und den Ist-Bauablauf zu.[1232] Folglich sind die Soll- sowie die Ist-Bauablaufmodelle auf Plausibilität und Machbarkeit zu validieren. Diese Prüfung kann über die Auslastung der geplanten oder tatsächlich auf der Baustelle eingesetzten Produktionsfaktoren im Zusammenspiel mit der voranschreitenden Baustellensituation erfolgen. Zur Nachweisführung ist sowohl der Soll- als auch der Ist-Bauablauf jeweils in Form einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung nachzubilden bzw. nach den in den *Thesen 1* und *2* genannten Anforderungen zu prüfen.

These 3 – Der Begriff „Darstellung"

Unter der Bezeichnung „Darstellung" wird *nicht zwingend* ein grafisch aufgezeigter Bauablauf in Form eines Balken- oder Netzplans verstanden. Vielmehr wird darin die Schaffung einer *objektiven Ordnung* gesehen, die es einem Betrachter ermöglicht, ein Systemverhalten und/oder den Systemaufbau anhand eines Modells nachzuvollziehen. Das gewählte Darstellungsmedium dient lediglich dem Verständnis und sollte den sachlichen Inhalt möglichst leicht verständlich zum Ausdruck bringen können.

Die in *These 3* genannte Darstellung kann ein Balken- oder ein Netzplan sein – muss es aber nicht zwangsläufig.[1233] Bei zeitbezogenen Ansprüchen dürfen die Sachverhalte und Berechnungsergebnisse aus Soll- und Ist-Informationen mithilfe einer Zeitperspektive dargestellt werden, was z. B. einem Balkenplan, ausgearbeitet als Terminplan, entspricht. Auch eine Darstellung in Textform könnte bereits ausreichen. Allerdings ist eine solche Darstellungsweise nicht empfehlenswert, da sich hierüber komplexe Lebenssachverhalte kaum übersichtlich gestalten lassen und daher weniger verständlich sind. In diesem

[1227] Vgl. *Prütting in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 286, Rdn. 8, 28-31, 35-40; *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 286 Rdn. 2-4a.
[1228] BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218.
[1229] Vgl. BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
[1230] Vgl. BGH, Urteil vom 20.02.1986 – Az. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
[1231] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1232] Vgl. *Jansen/von Rinteln in* Kniffka, St. 12.03.2018: § 631, Rdn. 776.
[1233] *Diederichs und Streckel* nutzen z. B. Liniendiagramme für die Darstellung ihrer Nachweisführung. Vgl. Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 1-5.

Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass der *BGH* eine grafische Darstellung durch Balken- oder Netzpläne grundsätzlich *erlaubt* – um ihre Aussagekraft zu erhöhen, dürfen diese Darstellungsmethoden laut *BGH* zusätzlich erläutert werden.[1234]

Außerdem sollten Tatsachenbehauptungen *nicht* durch pauschale Formulierungen zusammengefasst werden,[1235] denn es ist auch nicht Aufgabe des Gerichts, den entscheidungsrelevanten Sachverhalt aus einer losen Menge von Schriftsätzen, Tabellen usw. zusammenzusuchen.[1236] *Roquette und Bescher* beschreiben aus juristischer Sicht, dass es in gerichtlichen Auseinandersetzungen vorerst ausreicht, wenn nur der „Grundsachverhalt" in einen Bauprozess eingebracht und daraufhin substantiiert bestritten wird.[1237] Hierzu nennen *Franz et al*. baubetriebliche Reibungspunkte, die gegen eine derartige Vorgehensweise sprechen.[1238]

Infolge dessen ist es bei der Nutzung eines BIM-Modells *nicht* zu empfehlen, den Bauteilmodellen vereinzelte Dokumente zuzuweisen, da diese Vorgehensweise ggf. eine spätere Suche innerhalb der virtuellen Umwelt erfordert. Stattdessen ist das in *Abbildung 4-8* vorgeschlagene chronologische Ordnungsschema besser geeignet, bei dem bestenfalls eine Bauteilverknüpfung im Sinne eines 4D-Modells erfolgt.[1239] Die Dokumente sind dort über den Zeitverlauf zu finden, während das „restliche Modell" die baustellenbedingten Umstände verdeutlicht und numerische Berechnungen ermöglicht.

Im Hinblick auf die Verwendung computergestützter Simulationen, als Werkzeug zur Nachweisführung gestörter Bauabläufe, ist die Abbildungsart eine Frage der Anzeigeform von Zustandsgrößen über eine Zeitperspektive – abhängig von der vorhandenen *Usability*[1240]. Hierüber lassen sich verschiedene Ordnungsstrukturen der Berechnungsergebnisse handhaben und veranschaulichen. Seit dem 01.01.2018 sind derartige Überlegungen für die Gerichtspraxis nicht auszuschließen, da sich die Vorschrift der Zivilprozessordnung für elektronische Dokumente des § 130a ZPO änderte. Durch das Inkrafttreten können alle Dokumente, die

- für die Bearbeitung der Behörde *geeignet* sind und
- qualifiziert-signiert oder
- auf sicherem Übermittlungsweg eingereicht werden,

im Zivilprozess Einsatz finden.[1241] Neben Auskünften, Aussagen oder Erklärungen Dritter zählen dazu auch Sachverständigengutachten.[1242] Weiterhin ist die Papierform grundsätzlich

[1234] Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
[1235] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 284, Rdn. 37.1; Beuermann, IBR 2018: 484.
[1236] Vgl. BGH, Beschluss vom 12.12.2013 – Az. IX ZR 299/12, IBRRS 2014: 0534. *Kniffka* beschreibt, dass Klagen in Bauprozessen durchaus mehr als *100 Schriftseiten* umfassen können. Vgl. *Kniffka in* Kniffka/Koeble, 2014: Teil 8, Rdn. 56. Siehe auch *Kapitel 4.4.1*.
[1237] Vgl. Roquette/Bescher, BauR 2018: 426.
[1238] Vgl. Franz/Möhring/Gnerlich/Tiesler, 2018: S. 136-137.
[1239] I. A. a. Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: S. 391, 395-396.
[1240] Benutzerfreundlichkeit.
[1241] Vgl. *Wöstmann in* HK-ZPO/Saenger, 2017: ZPO 130a, Rdn. 1-3; *Fritsche in* MüKoZPO, ZPO § 130a, Rdn. 4.
[1242] Vgl. *Wöstmann in* HK-ZPO/Saenger, 2017: ZPO 130a, Rdn. 1; *Von Selle in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO § 130a, Rdn. 2.

möglich,[1243] gem. § 298 ZPO sogar Pflicht, falls die Akten in Papierform geführt werden.[1244] In solchen Fällen wäre ein Ausdruck digitaler Bauzeitanalysen notwendig.

4.5.2 Schwachstellen der Netzplantechnik aus systemtheoretischer Sicht

In Anlehnung an *Kapitel 2.1.5* bis *Kapitel 2.1.8* finden in realen Systemen teilweise alternierende und zyklische Wechselwirkungen statt, die sich durch ein komplexes Systemverhalten bemerkbar machen. Häufig werden diese Wirkungen in Form nacheinander geschalteter Kausalketten interpretiert.[1245] Um komplexe Bauabläufe zu rekonstruieren, kommen regelmäßig triviale Planungsmethoden wie die Netzplantechnik zum Einsatz.[1246] Deren Berechnungsergebnisse werden i. d. R. mithilfe vernetzter Balkenpläne gem. *Kapitel 3.2* dargestellt. Auf dieser Basis erfolgen die Gegenüberstellungen zwischen Soll- und Ist-Bauzeiten, die die Kausalitäten von Bauablaufstörungen verdeutlichen sollen. Zwar beschreiben *Roquette et al*., dass die Realität durch einen Terminplan nachzubilden ist und die konkrete bauablaufbezogene Darstellung daher immer „modellhaft" ausgearbeitet wird.[1247] Doch handelt es sich beim Netz***plan*** und beim Balken***plan*** um ***Planungswerkzeuge***. Mit ihnen sollen geplante Absichten oder Zwischenstände festgehalten werden, damit eine in der Zukunft liegende Prozessabfolge möglichst auf diese Weise – also „wie geplant" – ausgeführt wird.

Planungswerkzeuge dienen in erster Linie als Orientierungshilfe zur Steuerung und Überwachung von Bauabläufen. Für eine einfach handhabbare Nutzung ist das Berechnungskonzept eines Netz- oder Balkenplanmodells sehr stark auf eine Zeitbetrachtung reduziert, die bedarfsweise erläutert werden kann. Neben der Bestimmung von Vorgangsabfolgen eignen sie sich für zeitbezogene Gegenüberstellungen, Veranschaulichungen oder zur vorgangsbezogenen Dokumentation. Weniger geeignet sind sie hingegen zur Analyse komplexer Prozessabfolgen.

Aus systemtheoretischer Sicht bilden der Soll- und der Ist-Bauablauf jeweils ein eigenständiges System. Beide Systeme bestehen grundsätzlich aus vielen verschiedenen zeitdiskreten Informationen, die unterschiedliche Systemzustände über die Bauzeit hervorbringen. Zeitpunkte, Zeitdauern und auf die Zeit reduzierte Wirkungsbeziehungen sind lediglich eine Teilmenge aller möglichen Systeminformationen. Es handelt sich um Zeitinformationen, die ausschließlich zur Messung von Zeitabweichungen relevant sind. Die bloße Gegenüberstellung von Zeitinformationen führt zu Aussagen über zeitabhängige *Korrelationen*[1248]. Beispielsweise kann nur wiedergegeben werden, dass möglicherweise ein Vertragstermin überschritten wurde. Ob diese Korrelation eine baubetriebliche Kausalität wiedergibt, womit Verursacheranteile klar voneinander getrennt werden, lässt sich mit einem auf die Zeit reduzierten Soll-Ist-Vergleich kaum stichhaltig erklären. Vielmehr ist

---

[1243] Vgl. *Fritsche in* MüKoZPO, 2016: ZPO § 130a, Rdn. 2.
[1244] Vgl. *Bacher in* BeckOK ZPO, St. 01.07.2018: ZPO, § 298; *Huber in* Musielak/Voit, 2018: ZPO § 298, Rdn. 2.
[1245] I. A. a. Ulrich/Probst, 1995: S. 36-56. In der baurechtlichen Literatur wird der Begriff „Kausalkette" häufiger genannt. Hierbei handelt es sich *nicht* um baubetriebliche Wirkungen, sondern um die folgenden und aufeinander aufbauenden Nachweisschritte:
Verletzungshandlung → Rechtsgutverletzung → Schaden (siehe *Kapitel 4.4.2*).
[1246] Auf komplexe und triviale Wirkungen wird u. a. in *Kapitel 2.1.5* und *Kapitel 2.1.8* eingegangen.
[1247] Vgl. Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 560-561.
[1248] Siehe *Kapitel 2.1.6*.

eine geeignete baubetriebliche Analyse erforderlich, bei der mehrere Informationen in einem komplexen Ursache-Wirkungs-Zusammenspiel zu betrachten sind (siehe *These 2*). Der Kausalitätsnachweis ist vor allem über die Pragmatik relevanter Informationen zu führen, die in ihrer Aussagekraft dem Beweismaß als „Messlatte" genügen müssen. Die Relevanz einer Information hängt vom Einzelfall ab und ist vom jeweiligen Beobachter zu wählen und ggf. durch weitere erklärende Informationen zu bekräftigen.

Komplexe Systeme können für ihre inhaltlich unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Beziehungen äußerst viele zeitveränderliche Schnittstellen besitzen. Erst wenn realitätsnahe Bedingungen und Berechnungen in angemessenen Zeitabständen erfolgen, lässt sich ein entsprechendes Systemverhalten hinreichend genau nachbilden. Dies gilt besonders für komplexe Bauabläufe. Aus baubetrieblicher Sicht ist die realitätsnahe Darstellung eines aussagekräftigen Bauablaufs in den produktionsbezogenen Ausführungsprozessen und deren Startbedingungen wiederzufinden. Dafür sollten detailliertere Informationen als Anhaltspunkte gewonnen werden (siehe *Kapitel 4.14* und *Kapitel 4.4.7*). Sie müssen Aufschluss über Bauverfahren, Baustoffe, Mensch und Maschine sowie Pläne, Termine, technologische Ablaufreihenfolgen, Anordnungen usw. wiedergeben können,[1249] die im Sinne der REFA-Methodenlehre in einem räumlichen und zeitlichen Rahmen eine Arbeitsaufgabe verwenden oder verändern (siehe *Kapitel 2.1.11*).

Jeder systemtheoretische Prozess dauert an – demnach ist die Zeit eine verbrauchbare Ressource. Das bedeutet, jeder Ausführungsprozess erfordert eine Zeitdauer, bis die jeweilige Arbeitsaufgabe beginnt und abgeschlossen ist. Deshalb kann eine reine Zeitdarstellung wenig über die Vernetzungsnotwendigkeit der Prozesse eines Systems aussagen – insbesondere dann nicht, wenn die Kausalität durch determinierte Vorgaben „geplant" wird. Die Modellierung eines *dynamischen* Systemverhaltens findet hierdurch nicht statt. Gemäß *Abbildung 4-10* kann die Netzplantechnik nur einen statischen Zustandsraum darstellen.[1250]

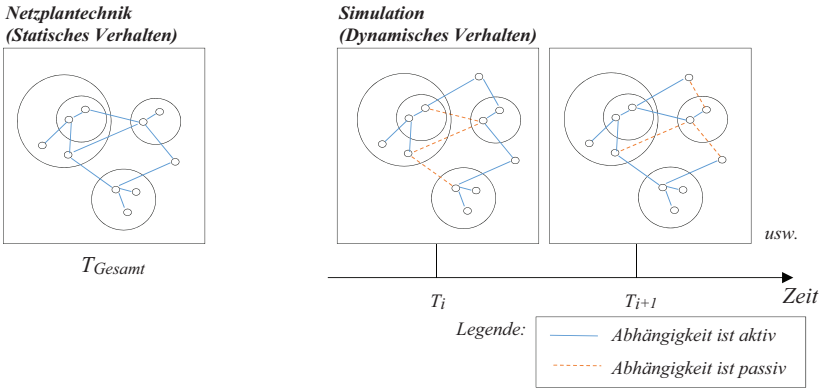


Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der Zeitzustände zwischen Netzplantechnik und Simulation[1251]

[1249] Vgl. Schiffers, 1998: S. 287.
[1250] Vgl. Dang, 2014: S. 15.
[1251] Eigene Darstellung.

Letztendlich ist die Dynamik als wesentliche Grundvoraussetzung für eine plausible Nachweisführung anzusehen, um komplexe Zusammenhänge sachlogisch darstellen zu können. Demgemäß beschrieben *Senior und Halpin* bereits im Jahr 1998, dass Netzpläne vornehmlich für die Formulierung von vertragsrechtlichen, zeitlichen Handlungsspielräumen und Simulationsmodelle zur Analyse von Produktionsprozessen geeignet sind.[1252]

Der oftmals erwähnte Kritikpunkt, die Simulation könne aufgrund ihrer komplexen Wirkungsberechnungen wohlmöglich bewusst fehlerhaft eingefügte Abstraktionen „verschleiern", ist abwegig. Dem sei entgegenzuhalten, dass die Simulation regelmäßig Einsatz findet, wenn dynamische Wirkzusammenhänge plausibel analysiert werden sollen. Vielmehr ist die manuelle Eingabe kausaler Abhängigkeiten durchaus aufwändiger und fehleranfälliger.[1253] Beispielsweise können falsche Anordnungsbeziehungen übersehen oder hingenommen werden. Darum sind für die Analyse komplexer Systeme jene Berechnungsmethoden besser geeignet, die eine Beobachtung mit einer anschließenden Bewertung (inkl. bedarfsweiser Überarbeitung) zwingend voraussetzen. Dies sind Grunddisziplinen einer Simulationsstudie.[1254] In ihr werden regelmäßig die Simulationsdaten sowie die Modellstruktur auf Plausibilität geprüft. Für ein brauchbares Modell sind solche Tests unerlässlich, da es sonst keine korrekten Ergebnisse durchgängig erzielen kann. Der Simulationsanwender nimmt im Vergleich zur Netzplantechnik notwendigerweise die Rolle eines Beobachters ein. Er ist immer damit beschäftigt, das Modellverhalten experimentell zu hinterfragen, damit es möglichst fehlerfrei funktioniert.[1255] Eine solche Prüfung erfolgt zwangsläufig, insbesondere dann, wenn die Simulation unerwartete Ergebnisse erzielt. Bei der Anwendung der Netzplantechnik können dagegen solche Prüfungen aufgrund (un-)gewollter Werteingaben relativ leicht übersehen und/oder übergangen werden. Manipulationen erfolgen bereits durch manuelle vorgangsbezogene Kapazitätszuweisungen, damit sich eine gewollte Abfolge einstellt.[1256] Besonders schwierig lassen sich komplexe Bauabläufe rekonstruieren, da sie ggf. mehrere kritische Wege aufweisen.[1257] Durch die Nutzung der Netzplantechnik ist es aufgrund geringer Flexibilität der Ablaufstruktur eher unwahrscheinlich, dass während der Modellierung eine machbare Produktivität geprüft wird.[1258]

Schließlich ist das komplexe Zusammenspiel aller produktionsbezogenen Prozesse in einer objektiven Betrachtung auszuwerten. Erst wenn eine solche Analyse gelingt, ist es sinnvoll, eine Zeitdarstellung zur Überprüfung von Terminüberschreitungen und anderen Zeitmessungen heranzuziehen. Nur so können die Ursächlichkeit einer Zeitabweichung und die daraus resultierenden Folgen hinreichend baubetrieblich ermittelt werden. Aus diesen Überlegungen heraus wird die folgende *These 4* gebildet.

[1252] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 72.
[1253] Vgl. Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406; Zeiß, 2009: S. 2-3, 6-7; Möhring, 2012: S. 113. Ähnlich: Samkari, 2014: S. 32-33; Arashpour/Wakefield/Blismas/Lee, 2013: S. 1; Košturiak/Gregor, 1995: S. 5.
[1254] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 18-48.
[1255] Vgl. Sterman, 2001: S. 21.
[1256] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 72.
[1257] Vgl. Maduranga/Palamakumbura/Dissanayake, 2016; Diederichs/Streckel, NZBau 2009: 1-5.
[1258] Vgl. Eden/Williams/Ackermann/Howick, 2000: S. 295 ff.

These 4 – Vorteile der Simulation

Ein Kausalitätsnachweis ist vorwiegend über die Aussagekraft aller Anhaltspunkte und der darin enthaltenen Informationen zu führen. Erst mit der Verwendung und Gewinnung dieser Informationen lassen sich überhaupt Tatsachen hinreichend genau begründen oder widerlegen. Eine Zeitdarstellung eignet sich nur zur Überprüfung von Zeitabweichungen. Für aussagekräftige Kausalitätsnachweise ist ein Simulationsmodell geeignet, da

- komplexe und realitätsnähere Wirkungszusammenhänge aufgezeigt werden können;
- es sich dynamisch verhält, was zwangsläufig zu einer objektiven Bewertung führt und ggf. unerwartete Ergebnisse aufzeigt;
- ein feingliedrigerer Detaillierungsgrad numerisch bewältigt werden kann;
- es streng mathematisch rechnet und
- variable Eingaben experimentell untersucht werden können.

4.5.3 Nachteile einer rein zeitbezogenen Darstellung

Die folgenden Betrachtungen gehen auf die Netzplantechnik ein, die vorwiegend zur Begutachtung gestörter Bauabläufe zum Einsatz kommt. Da die Netzplantechnik i. d. R. als Berechnungsgrundlage für vernetzte Balkenpläne genutzt wird, folgt im weiteren Text eine Betrachtung über Balkenpläne.

Ein wesentlicher Nachteil der Netzplantechnik ist in der äußerst abstrakten Modellbildung mit ausschließlich zeitbezogenen *Elementen*[1259] sowie *Beziehungsarten*[1260] wiederzufinden.[1261] Sie präferiert kein bestimmtes Untersuchungsfeld und ist wahlweise auf unterschiedliche Fachgebiete anwendbar.[1262] Zum Beispiel deutet die beliebige Gestaltung einer aufgaben- oder objektbezogenen Projektstruktur auf eine unbestimmte und vielseitige Einsatzmöglichkeit des Netzplans hin. Insgesamt lässt sich mit der Netzplantechnik nur ein stark idealisiertes Modell erstellen. Ursächlich dafür ist der Abstraktionsgrad der Netzplantechnik, bei der ein bestimmter Start- und Endzustand eines Vorgangs errechnet und auf eine Zeiteinheit projiziert wird.[1263]

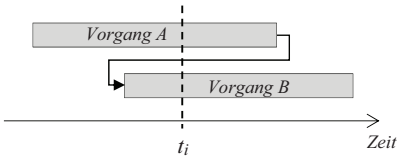
Gemäß *Kapitel 2.1.9* entstehen in komplexen Systemen regelmäßig neue Strukturen. Ihre kausalen Wirkungsbeziehungen sind teilweise nebenläufig oder auch *zyklisch*[1264]. Als Beispiel wiederholt sich das Einpressen von Spundbohlen fortwährend, solange keine nennenswerten geometriebedingten Abweichungen oder andere neue Produktionsbedingungen auftreten. Darüber hinaus werden bei Bodenbelagsarbeiten häufig mehrere Räume mit gleichen Baumaterialien in sich wiederholenden Arbeitsschritten ausgestattet. Bei beiden genannten Beispielen sind die zyklischen Arbeitsaufgaben in den dynamisch voranschreitenden Kapazitäten wiederzufinden. Aus systemtheoretischer Sicht abstrahieren sie sich selbst regelnde Teilsysteme innerhalb der Baustellenumgebung. Die Nebenläufigkeit

[1259] Vorgangsknoten oder Ereignisse.
[1260] Anordnungsbeziehungen.
[1261] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 2.
[1262] Folgende Regel existiert in der *DIN 69900*: „*Die Beschriftung der Darstellungselemente muss den Bedürfnissen nach Identifizierung und Information gerecht werden.* [...] *Weiterhin können Informationen über Ressourcen, Schranken, Sperrintervalle, Sollintervalle und sonstige Informationen angegeben werden*." DIN 69900, 2009: S. 19.
[1263] Hieraus entstehen die Balken in Balkenplänen.
[1264] Zyklen bzw. Schleifen sind laut *DIN 69900* nicht zulässig. Vgl. DIN 69900, 2009: S. 12.

ist z. B. in zeitparallel genutzten oder ungenutzten Ausweichmöglichkeiten vorhanden. Gemäß *Kapitel 4.4.6* ist es im Nachhinein beim Zusammenspiel zwischen zyklischen und nebenläufigen Wirkungsbeziehungen oftmals nicht leicht nachvollziehbar, welche Ursache zu welchem Sachverhalt führte oder führen musste. In solchen Fällen würde eine Vorwärts- und/oder Rückrechnung eines Netzplans zu einer endlosen Aufgabe führen und an seine Grenzen stoßen. In einer Simulation hingegen können solche Betrachtungen in Schleife geschaltet und situative Abbruchkriterien definiert werden.[1265]

Ein Balken in einem Balkenplan ist lediglich ein Hinweis darauf, dass etwas Veränderliches geschieht bzw. ein dynamischer Prozess mit wechselnden Zuständen stattfinden muss. Eine Prozessbenennung erfolgt durch die Bezeichnung der Tätigkeit. Was genau während einer Vorgangsdauer passiert, entfällt bei dieser Beschreibung vollständig und ermöglicht einen gewissen Interpretationsspielraum.[1266] Sollte ein Vorgang in zwei Teile zerlegt werden, weil etwa ein Behinderungssachverhalt innerhalb einer Vorgangsdauer einzuarbeiten ist, bleibt die Frage offen, was der Balken eigentlich über die Zeitachse abbildet – handelt es sich um den einfachen zeitlichen Verlauf des Vorgangs und/oder um seinen prozentualen Fortschritt?[1267] Bei solchen Aufgaben sind mindestens zwei neue Anknüpfungspunkte für weitere Anordnungsbeziehungen zu definieren. Jeder Anknüpfungspunkt stellt einen „versteckten" Zustand eines erreichten oder zu erreichenden Baufortschritts dar, der sich „irgendwo" im zu zerlegenden Vorgang befindet. *Schiffers und Sindermann* beschreiben, dass derartige Anknüpfungspunkte oftmals nicht in einem fortzuschreibenden Bauzeitenplan existieren, woraus sich notwendigerweise Freiheiten bei der Schaffung von Anordnungsbeziehungen ergeben, die es weder im Vertragsterminplan noch in der Baudurchführung gibt.[1268] Die Netzplantechnik bietet hierfür keine Hilfsmittel an. Hier sind kapazitive, technologische oder räumliche Abhängigkeiten evtl. mit Zeitabständen zu berücksichtigen.

Letztendlich können die maßgeblichen Systemzustände der daran anschließenden Anordnungsbeziehungen nur objektiv *geschätzt* werden. *Abbildung 4-11* geht auf weitere Fragestellungen ein.



Welche Referenzzustände haben die beiden Vorgänge zum Zeitpunkt t_i? Welche Teilvorgänge könnten dann stattfinden? Welche Fertigungsrichtung verbirgt sich im Detail? Wie sieht die entsprechende Geometrie aus? Ist der gezeigte zeitliche Versatz beider Vorgangsbalken baubetrieblich möglich und sinnvoll gewählt?

Abbildung 4-11: Fehlende Referenzzustände während einer Vorgangsdauer[1269]

Aufgrund der vorgangsbezogenen Zustände sind unterschiedliche Wirkungsbeziehungen zwischen den Vorgängen möglich. So wechseln bspw. Malerarbeiten erst den Fertigungsort, wenn alle Vorarbeiten für die ausstehenden Flächen abgeschlossen sind. Grundsätzlich ist

[1265] Vgl. Senior/Halpin, 1998: S. 72.
[1266] Laut *Rösch und Dresp* können aber modellbasierte Analysemethoden „automatische" Anpassungen durchführen, falls Bauteilgeometrien oder erforderliche Materialien versuchsweise verändert werden. Vgl. Rösch/Dresp, 2017: S. 264.
[1267] Siehe prozentualen Leistungsfortschritt über eine Zeitachse in *Kapitel 2.1.8* und *Kapitel 4.2.3*.
[1268] Vgl. Schiffers/Sindermann, BauW 2017: S. 125.
[1269] Eigene Darstellung.

auch ein paralleles Arbeiten möglich. Das wäre der Fall, sobald zwei Maler-Kolonnen die gleiche Leistung im selben Bauabschnitt, aber in getrennten Räumen durchführen.

Zudem können auch Einflüsse entstehen, wenn z. B. in einem Flur Betonwerksteinarbeiten für den Bodenbelag stattfinden und aufgrund des aushärtenden Mörtels keine weiteren Arbeiten möglich sind. Unter Umständen wirkt sich dies passiv auf den Zutritt zu weiteren Räumen aus, die ebenfalls nicht bearbeitet werden können. Zeitgleich könnten andere Arbeitsflächen frei zugänglich und bearbeitbar sein. Derartige Umstände sind identifizierbar, wenn parallel arbeitende Kolonnen als Teilsysteme aufgrund von Raum- oder Kapazitätskonflikten den Bauablauf eigenständig umstellen.[1270]

Besonders bei großen Ausbauprojekten zeichnen sich entsprechende Wechselwirkungen dadurch aus, dass die Kolonnen augenscheinlich einer sehr wechselhaften Fertigungsrichtung nachgehen und ihre Arbeitsplätze vermeintlich „sprunghaft", z. B. bei Ausbauarbeiten „von Raum zu Raum", fortführen.[1271] Bei den Ausführungsarbeiten schreitet eine Kolonne nur „grob" in ihrer Fertigungsrichtung voran. In der Regel verfolgen die einzelnen Arbeitskräfte geometrisch verteilte Teilaufgaben und helfen sich gelegentlich gegenseitig aus. *Rösch und Dresp* erwähnen, dass im Rahmen einer modellbasierten Arbeitsweise virtuelle Fertigungsabschnitte mit parametrischen Mengenanteilen definiert werden können, die einen Einfluss auf die simulierten Produktionsabläufe ausüben.[1272] Solche zeitlich geometrischen Bedingungen lassen sich mit der Netzplantechnik *nicht* berücksichtigen.[1273]

Die Netzplantechnik sieht vier verschiedene Anordnungsbeziehungen vor, um die Ausführungsprozesse eines beliebigen Projekts mithilfe von Vorgängen und/oder Meilensteinen zeitlich aufeinander abzustimmen. Sie sind für *rein zeitbezogene Prozessreihenfolgen* vorgesehen, die vom Anwender auch ohne Plausibilitätsprüfungen trivial vorgegeben werden können. Mit einer Anordnungsbeziehung ist die Verschiebung eines Vorgangs in seine relative zeitliche Lage gegenüber einem anderen Vorgang oder Meilenstein möglich. *Abbildung 4-12* erläutert das Prinzip anhand der Sprungfolge, indem der *Vorgang A* den *Vorgang B* in eine diametrale Lage verschiebt. Dass der Anfang einer Tätigkeit (Leistungsstand *0 %*) eine Voraussetzung für den Abschluss einer anderen Tätigkeit (Leistungsstand *100 %*) ist, widerspricht allerdings der Kausalität eines *Lebenssachverhalts*[1274]. Demzufolge eignet sich die Sprungfolge zur Planung einer „rechtzeitigen" Ablaufstruktur.

[1270] Vgl. Dang, 2014: S. 84 ff.
[1271] Vgl. Ibbs/Liu, 2005: S. 12-15.
[1272] Vgl. Rösch/Dresp, 2017: S. 261.
[1273] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 1-2.
[1274] Siehe *Kapitel 4.4.1*.

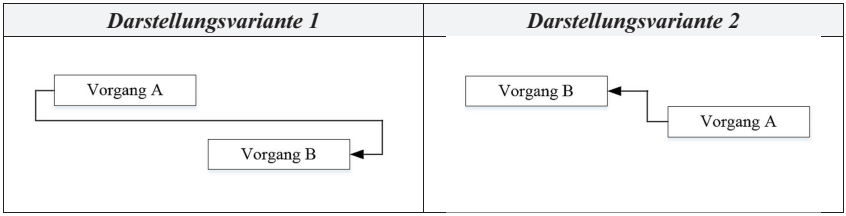


Abbildung 4-12: Veranschaulichung der Sprungfolge[1275]

Die Endfolge ist ebenfalls ein Hilfsmittel der Planung. Bei ihr wird vorausgesetzt, dass zwei Vorgänge zeitgleich enden, solange diese nicht durch einen konstanten Zeitabstand zueinander in ihrer Lage verschoben sind. Eine kausale Wirkungsbeziehung lässt sich hiermit nicht bestimmen. Vielmehr kann ein gewolltes Ende zwischen zwei Vorgängen geplant werden. Auch die Anfangsfolge entspricht dieser Logik. Mit ihr wird ein Zeitpunkt manifestiert, der dazu beiträgt, dass zwei Vorgänge zeitgleich beginnen, solange diese nicht durch einen konstanten Zeitabstand zueinander versetzt sein sollen.

Die Normalfolge entspricht am ehesten einer kausalen Wirkungsbeziehung.[1276] Aber auch diese Anordnungsbeziehung ist stark vom Willen und der Fähigkeit des Anwenders der Netzplantechnik abhängig. Mit der Normalfolge wird das Ende eines Vorgangs mit dem Anfang seines Nachfolgers verknüpft. Dazwischen liegt die vollständige Vorgangsdauer, was eher einer Idealvorstellung entspricht.[1277] *Eschenbruch und von Rinteln* gehen auf die Schwierigkeiten ein, dass mit der Normalfolge keine ausführungsorientierten „[…] *Spielräume zum Beispiel aus Zeitpuffern unterschiedlichster Genese berücksichtigt* [werden]. *Die Auswirkungen auf die tatsächlichen Bauabläufe vor Ort sind damit nicht ohne Weiteres festzustellen.*“[1278] Demzufolge ist es möglich, dass nebenläufige Vorgangsknoten durch die Normalfolge aufgrund des Netzplanmodells vollständig voneinander entkoppelt werden. Dadurch können zeitparallele Kausalitätsstränge innerhalb eines Netzplanmodells entstehen, die in ihrer zeitlichen Lage unabhängig voneinander beweglich sind.[1279] Diese Eigenschaft resultiert aus den Anordnungsbeziehungen, die lediglich Zeitabhängigkeiten sind. In einem Balkenplan stellen sich die Kausalitätsstränge als überlappende Vorgangsbalken dar (siehe *Abbildung 4-13*).

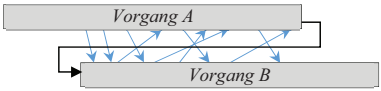


Abbildung 4-13: Überlappende Abhängigkeiten zwischen zwei Vorgängen[1280]

[1275] Eigene Darstellung.
[1276] Vgl. Rösch/Dresp, 2017: S. 262.
[1277] Vgl. Tommelein/Riley/Howell, 1999: S. 305; Su/Issac/Lucko, 2018: S. 2.
[1278] Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406.
[1279] Vgl. Su/Issac/Lucko, 2018: S. 7.
[1280] Eigene Darstellung.

Die zeitliche Verschiebung der Kausalitätsstränge kann bei der Rekonstruktion eines Bauablaufs zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Der Nachteil wird deutlich, wenn eine Normalfolge einen zusätzlichen Zeitabstand erhält. In einem Kausalitätsstrang würden sich alle darauf folgenden Vorgänge maximal um den vorgegebenen konstanten Zeitabstand verschieben. *Drittler* kritisiert zu Recht, dass durch die Einarbeitung von Behinderungen in einem starren Netzplan lediglich zeitliche Verschiebungen stattfinden, die sich aus der zeitlichen Lage und Dauer der Vorgänger ergeben.[1281] *Leinemann* betont methodische Fehler. So können Widersprüche dadurch entstehen, „[…] *dass so getan wird, als seien alle aufgetretenen Störungen gleichrangig und ohne jede wertende Betrachtung als abgeschlossene Vorgänge hintereinander zu setzen. Eine einmal eingetretene Verzögerung kann bei dieser Betrachtung nie mehr eingeholt werden. Das ist nicht nur baubetrieblich unrealistisch, sondern auch vertragsrechtlich falsch*."[1282] *Eschenbruch und von Rinteln* heben hervor, dass es sich bei der Netzplantechnik um eine idealisierte Darstellung handelt, bei der komplexe „[…] *Situationen mit mehreren kritischen Wegen, Sekundärverzögerungen und komplexe Rückwirkungen oder Zusammenhänge zwischen einzelnen Baustellenabläufen*, […] *üblicherweise nicht berücksichtigt* [werden]."[1283] Zum Beispiel bekräftigen *Eden et al.*, dass die Produktivität der Ressourcen einen kritischen Weg erst kritisch werden lässt.[1284]

Abhängigkeitsbeziehungen, die sich je nach momentaner Baustellensituation automatisch ergeben, werden in der Netzplantechnik nicht explizit vorgesehen. Es findet keine automatisierte Rekonfiguration des Netzplanmodells statt (gemeint ist das automatisierte Herausbilden neuer Elemente und Strukturen in Form von Anordnungsbeziehungen oder Teilvorgängen, die durch Bedingungen und Berechnungsregeln begrenzt werden). Folglich lässt sich mit der Netzplantechnik kein natürliches, dynamisches oder gar emergentes Systemverhalten nachbilden. Falls eine Wirkungsbeziehung innerhalb eines Kausalitätsstrangs berücksichtigt werden sollte, muss der Anwender einen korrigierenden Eingriff vornehmen.[1285] Dafür muss er die Baustellensituation möglichst vollständig durchdenken. Im Anschluss wird von ihm abverlangt, dass er die Auswirkungen im weiteren Bauablauf weitestgehend kennt. Laut *Ben-Alon und Sacks* lässt sich das emergente Systemverhalten komplexer Baustellen am plausibelsten virtuell durch Agenten abbilden.[1286]

Weiterhin muss der Anwender seine Gedankengänge sachlogisch auf eine Zeitperspektive projizieren. Treten jedoch Änderungen bei der Erstellung des Netzplans auf, sollte er ab dem betroffenen Zeitpunkt alle weiteren Vorgänge erneut auf ihre Plausibilität prüfen und ggf. entsprechende Anpassungen durchführen. Die Nachbildung eines komplexen Systems mithilfe der Netzplantechnik kann daher äußerst anspruchsvoll sein, da möglichst alle unterschiedlichen Wechselwirkungen berücksichtigt werden sollten. Letzteres beschreibt *Abbildung 4-15*. Hier sind mögliche Abhängigkeiten zwischen zwei parallel verlaufenden Vorgangsbalken symbolisch eingezeichnet. Die vorhandene Normalfolge würde solche Restriktoren nicht beachten.

[1281] Vgl. Drittler, 2017: Rdn. 4:331 ff. So auch *Möhring*. Vgl. Möhring, 2012: S. 133.
[1282] Leinemann, NZBau 2009b: 626.
[1283] Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406.
[1284] Vgl. Eden/Williams/Ackermann/Howick, 2000: S. 295.
[1285] Gerade bei der Fortschreibung von Terminplänen kann diese Aufgabe mehrfach erforderlich werden.
[1286] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 13, 26.

Um die Fehleranfälligkeit eines Modells zu reduzieren, können Prozesse in gröbere Arbeitspakete zusammengefasst werden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass durch die Herabsenkung des Detaillierungsgrads eine Abstrahierung des Modells stattfindet. Gegebenenfalls werden wesentliche Punkte einer Nachweisführung nicht mehr ausreichend berücksichtigt – im ungünstigsten Fall sind widersprüchliche oder sogar fehlerhafte Analyseergebnisse denkbar.

Die genannten Schwächen der Netzplantechnik können hinderlich sein, wenn das Modellverhalten realitätsnah untersucht werden soll, da jeder Vorgang auf das Bauablaufmodell unterschiedlich einwirkt. Tests mit dem entwickelten Simulator zeigten, dass außerplanmäßige Ereignisse die Komplexität eines Bauablaufmodells erhöhen. Ausschlaggebend dafür ist der Umstand, dass bei jedem Störereignis die Ordnungsstruktur eines geplanten Bauablaufmodells verändert wird und somit Umstrukturierungen unumgänglich sind. Diese können wiederum eine komplexe „Kettenreaktion" auslösen, so dass sich teilweise bei bereits wenigen Bedingungen eine unerwartete Ablauffolge herausbildet. In solchen Fällen lassen sich die betroffenen Vorgänge und ihre maßgeblichen Zustände nur schätzen, solange die Dokumentation keine Klarheit schaffen kann. Hiermit kann der tatsächliche Lebenssachverhalt weder von der Netzplantechnik noch von der Simulation rekonstruiert werden. Im Gegensatz zur Netzplantechnik kann die Simulation aber umfassendere Einzelschritte durchlaufen und genauere Analyseergebnisse zur Plausibilität und Machbarkeit liefern.[1287]

Grundsätzlich besteht das Risiko, dass eine Anordnungsbeziehung bei der Zerlegung eines vorhandenen Soll-Vorgangs zum falschen Zeitpunkt eingearbeitet wird. Dieses Risiko liegt vor allem dann vor, wenn eine bereits gehemmte oder beschleunigte Leistung untersucht werden soll. In diesem Zusammenhang beanstanden *Eschenbruch und von Rinteln* zusätzlich die Darstellungsform der üblichen Nachweisverfahren, indem die Unterstellung erleichtert wird, „[…] *dass stets eine vollständige Unterbrechung der Leistung vorgelegen hat*."[1288] Möglicherweise bilden sich aber im Inneren der Vorgänge andersgeartete Zustände und Abhängigkeiten zu anderen Vorgängen. Mit der Netzplantechnik lassen sich diese Umstände durch eine Vorgangsverlängerung oder eine parallele Verschiebung des Nachfolge-Vorgangs nicht berücksichtigen (siehe *Abbildung 4-14* und *Abbildung 4-15*). Darüber hinaus ist nicht ersichtlich, wie die Verlängerung und/oder Verschiebung zustande gekommen ist und warum bestimmte Anteile des Balkens sich wann verschoben haben. Bei einer konkreten bauablaufbezogenen Darstellung sollten die zeitlichen Lagen der Vorgänge zusätzlich erläutert werden.

[1287] Vgl. Eden/Williams/Ackermann/Howick, 2000: S. 295.
[1288] Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406.

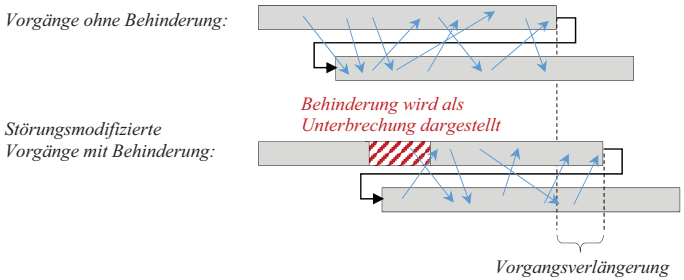


Abbildung 4-14: Überlappende Abhängigkeiten infolge einer Behinderung[1289]

Aufgrund ihrer Abstraktion kann die Netzplantechnik fehleranfällig sein. In einem Balkenplan sehen alle Vorgänge optisch gleich aus. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass alle Vorgänge miteinander verglichen werden können, da ein Balken die zeitliche Auswirkung eines Arbeitspakets darstellt. Folglich kann *das Betonieren einer Geschossdecke* oder *die Baustelleneinrichtung* jeweils als gleich aussehender Vorgangsbalken beschrieben werden. Diese würden sich nur in der Vorgangsbeschreibung voneinander unterscheiden. Rein theoretisch(!) könnten diese Vorgänge aufgrund ihres gleichen Erscheinungsbilds fälschlicherweise miteinander verglichen werden.

Zudem besteht bei der Netzplantechnik das Risiko, dass die Weiterführungs- und Wiederaufnahmepflicht gem. § 6 Abs. 3 VOB/B unberücksichtigt bleibt, z. B. dann, wenn diverse Zustände eines Vorgangs übersehen oder falsche Beziehungen zwischen den Vorgängen gewählt werden. Überdies kann der gleiche Fehler dazu führen, dass unkritische Vorgänge kritisch werden. Es ist nicht auszuschließen, dass eine Behinderung überhaupt keine Auswirkung auf einen betroffenen Vorgang ausübt, da bei der Berechnung einer Störungsmodifikation um die Behinderung „drum herum“ geplant wird.

Mit der Netzplantechnik oder den Balkenplänen sind eindeutige *geometrische Bezüge* zu den beschriebenen Bauteilen nicht darstellbar. Die der Terminplanung zugrundeliegenden logischen Randbedingungen bzgl. der Ausführungszeiten und Reihenfolgen lassen sich, wie bereits erwähnt, nur durch Langtexte in den Vorgangsbeschreibungen im Balkenplan einbringen. Detaillierte Vorgangsbeschreibungen sind zwar hilfreich, jedoch ist eine Interpretation beim Lesen weiterhin erforderlich, da die Darstellungsart der Netzplantechnik sowie des Balkenplans *abstrakt* bleibt.

Der durch eine Störung bedingte Systemzustand ist grundsätzlich irreversibel und wird durch ein Wirkungs- bzw. Störungspotential im Sinne einer *Autokorrelation*[1290] zeitveränderlich fortgeschrieben. Das Störungspotential lässt sich während der Bauausführung ggf. durch Beschleunigungsmaßnahmen (Lenkungen) korrigieren – diese können ausschließlich kontinuierlich erfolgen und sind ein Teil der vernetzten Wirkungen gem. *Kapitel 2.1.2*. In der Regel werden die Störungen sowie die baubetrieblichen Beschleunigungsmaßnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingeleitet. Eine klare Abgrenzung zwischen mehreren Störungen oder Beschleunigungsmaßnahmen ist

[1289] Eigene Darstellung.
[1290] Siehe *Kapitel 2.1.6*.

weitestgehend kaum möglich (siehe *Kapitel 2.1.8* i. V. m. *Abbildung 4-15*). Die Trennung primärer und sekundärer Wirkungen kann zur Darlegung von Ansprüchen wegen Bauzeitverzögerungen erforderlich sein.[1291] Im Gegensatz zur Netzplantechnik, bei der z. B. Vorgangsknoten als Behinderungsvorgänge ausgearbeitet werden, lassen sich mit einem geeigneten Simulationsmodell überlagernde Störungspotentiale plausibilisieren, die in spätere Vorgangsdefinitionen mit einfließen. In *Abbildung 4-15* sind die Folgewirkungen symbolisch als Pfeile in den gezeigten Vorgangsbalken dargestellt. In der Grafik wird exemplarisch gezeigt, dass zwischen dem *Vorgang 3* und dem *Vorgang 5* eine Wirkungsbeziehung aufgrund einer oder mehrerer Behinderung/en entstehen kann, deren Anteile jedoch nicht durch die Anordnungsbeziehungen erfasst werden.

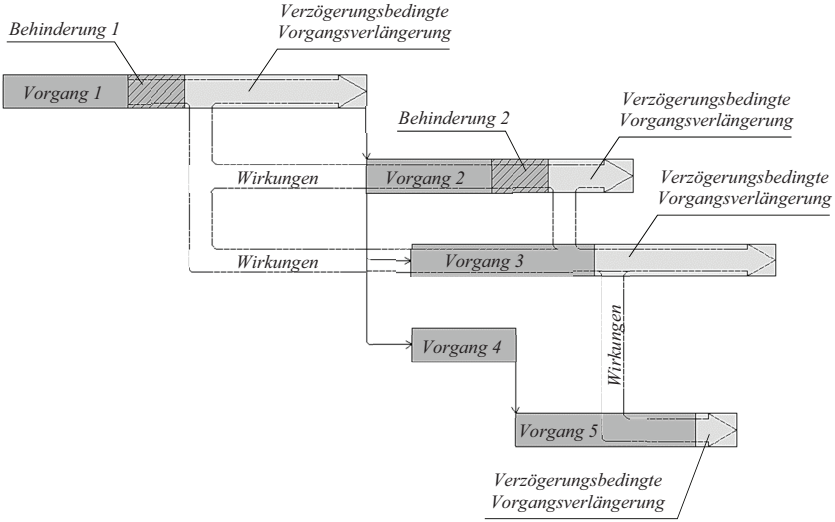


Abbildung 4-15: „Unsichtbare" Wirkungen in Vorgangsbalken und Folgewirkungen[1292]

Eden et al. thematisieren derartige Umstände und erläutern anhand ihrer Praxiserfahrung, dass kleine Ursachen große Wirkungen erzielen können und sich diese eher durch den Einsatz von Simulationen anstatt der Netzplantechnik nachweisen lassen.[1293] *Eschenbruch und von Rinteln* gehen auf nicht dynamische – also konstante – Zustandsräume von Netzplänen ein. Sie schlussfolgern: „*Ein Terminplan kann deshalb nicht mehr als die Visualisierung und Plausibilisierung (eine Modellbildung) einer zuvor ermittelten Terminfortschreibung auf der Basis von baubetrieblichen und juristischen Begründungen sein. Die Darstellungsweise führt fast zwingend zu Ungenauigkeiten, die ergänzend eine Endkontrolle anhand des Ist-Ablaufs unabdingbar machen*."[1294]

[1291] Vgl. KG, Urteil vom 19.04.2011 – Az. 21 U 55/07, IBRRS 2011: 5286; siehe auch Valavanoglou/Heck, 2016: S. 2.
[1292] Eigene Darstellung.
[1293] Vgl. Eden/Williams/Ackermann/Howick, 2000: S. 292 ff., 295-297.
[1294] Eschenbruch/von Rinteln, NZBau 2010: 406.

4.6 Vorüberlegungen zum simulationsbasierten Soll-Ist-Vergleich

4.6.1 Anhaltspunkte als Indikatorgrößen zur Fortschreibung

Um die Gültigkeit eines Simulationsmodells zu bestimmen, wird das Modellverhalten anhand eines tatsächlich existierenden Systems geprüft bzw. *verifiziert* und *validiert* (siehe *Kapitel 2.2.5*). Hierfür existieren verschiedene Techniken,[1295] die im Wesentlichen wie klassische Soll-Ist-Vergleiche funktionieren. Beispielsweise empfiehlt die *VDI-Richtlinie 3633-1*, dass die Validierung eines Simulationsmodells anhand der Ist-Daten durchzuführen ist, sobald ein bereits existierendes System vorliegt.[1296] Eine solche Vorgehensweise entspricht weitestgehend der störungsmodifizierten Fortschreibung gestörter Soll-Bauabläufe im Zuge von Soll-Ist-Vergleichen.[1297]

Laut *Bossel* ist ein Simulationsmodell durch Indikatorgrößen – *vergleichbar mit Anhaltspunkten* – des tatsächlichen Ist-Systems zu erweitern, um mit ihnen die Gültigkeit eines entwickelten Modells zu prüfen.[1298] Damit beschreibt er eine Vorgehensweise, bei der das Modell durch vergleichbare Leistungsstände erweitert werden muss, damit die Gegenüberstellung gelingt. „*Wo nicht alle Indikatorgrößen* [bzw. Anhaltspunkte] *bereits beobachtet oder berechnet werden, müssen also die Systembeobachtung oder das Simulationsmodell erweitert werden. Bei der Simulation müssen u. U. zusätzliche Modellformulierungen eingeführt werden, aus denen sich die notwendigen Indikatorgrößen* [bzw. die relevanten Inhalte der Anhaltspunkte] *ergeben*.“[1299] Diese von *Bossel* beschriebene Vorgehensweise ist als zweckmäßig und sinnvoll zu erachten. So müssen die Soll- sowie Ist-Anhaltspunkte als *Indikatorgrößen* einen vergleichbaren Referenzzustand abbilden, damit sie sich inhaltlich einander gegenüberstellen lassen. Dazu müssen die in einem Ist-Anhaltspunkt enthaltenen konkreten Informationen auch im Soll-Bauablauf wiedergefunden werden. Diese Vorgehensweise wird im entwickelten Nachweisverfahren durch die Herausbildung von *Markern* übernommen (siehe *Kapitel 8.2.3*). Möglicherweise sind aufgrund von Störungen derartige Vergleiche nicht „ohne Weiteres“ durchführbar, da die Anhaltspunkte entweder im Soll- oder im Ist-Bauablauf nicht vorhanden sind.

[1295] Zum Beispiel zählen *Rabe et al*. verschiedene Techniken auf, bei denen die Gültigkeit der Simulationsergebnisse mit Ist-Werten überprüft wird: ***1. Ereignisvaliditätstest:*** „*Der Ereignisvaliditätstest* […] *vergleicht das Auftreten von Ereignissen im Simulationsmodell mit der Realität*.“ (vgl. S. 98); ***2. Sensivitätsanalyse:*** Die entsprechende „[…] *Richtung der Auswirkung muss mit Beobachtungen in der Realität übereinstimmen.*“ (vgl. S. 102); ***3. Statistische Techniken:*** „[…] *mit statistischen Techniken* [können Modelle] *unter Zuhilfenahme von Vergleichswerten aus einem realen System validiert werden* […].“ (vgl. S. 104); ***4. Ursache-Wirkungsgraph:*** „*Mit dem Ursache-Wirkungs-Graph* […] *wird die Beziehung zwischen Ursachen und ihren Wirkungen im System abgebildet. Dann wird geprüft, ob sich diese Beziehungen im Modell wiederfinden*.“ (vgl. S. 108). Die Methodik ist zu vergleichen mit Kausalitätsanalysen unter der Verwendung von *System-Dynamics*. ***5. Validierung von Vorhersagen:*** „*Das Modell wird zunächst genutzt, um eine Vorhersage zu treffen. Anschließend wird die Richtigkeit dieser Vorhersage am realen System überprüft*.“ (vgl. S. 109); ***6. Vergleich mit aufgezeichneten Daten:*** „*Ist ein reales System vorhanden, so können Ein- und Ausgabedaten dieses Systems, die in der Vergangenheit aufgezeichnet wurden, zum Test verwendet werden.*“ (vgl. S. 111).
Seiten zitiert aus: Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008.

[1296] Vgl. VDI-3633, Blatt 1, 2014: S. 38.

[1297] Vgl. Bossel, 2004: S. 231-233. Analog: Mechnig/Völker/Mack/Zielke, NZBau 2014: 87; Drittler, 2017: Rdn. 4:261-262.

[1298] Vgl. Bossel, 2004: S. 233.

[1299] Bossel, 2004: S. 233. Siehe weiter: Bossel, 2004: 295.

Auf weitere Einzelheiten des entwickelten Nachweisverfahrens wird in *Kapitel 8* näher eingegangen.

4.6.2 Zusammenfassung – Einsatz der Simulation

Die vorausgegangenen Betrachtungen zeigen, dass „juristische Kausalitäten" bestehen müssen, um die Ausfüllung von Tatbestandsvoraussetzungen des geltenden Rechts zu bewerten. Für die Argumentationslinie muss der jeweilig dargelegte Sachverhalt logisch und verständlich dargestellt sein. Eine solche Sachverhaltsschilderung ist mit einer „baubetrieblichen Kausalität" zu erzielen, die den jeweils einzelnen Untersuchungsfall betrifft. Im Hinblick auf den wirklichen – also realen – nachgebildeten Untersuchungsfall handelt es sich in der Sache vielmehr um eine *Korrelation*. Dies deshalb, da ein Untersuchungsfall niemals vollständig nachträglich 1:1 nachgebildet werden kann. Dennoch ist der Untersuchungsfall aus den verfügbaren Daten konkret – also dahingehend kausal – auszuarbeiten. Entsprechend kann diese Kausalität ein Stück weit von der Wirklichkeit abweichen, die jedoch nicht frei erfunden werden darf.

Ziel der Kausalitätsfragen ist, dass in der Sache ein „angemessenes Maß" an Objektivität erreicht wird. Trotz möglicher Abweichungen des simulierten Modellverhaltens von der Realität mögen diese Anforderungen für einige Simulationsanwender ungeeignet erscheinen, denn sie beabsichtigen i. d. R. die Modellierung eines wirklichkeitsgetreuen Systemverhaltens. Dazu führen sie am Simulationsmodell regelmäßig Plausibilitätsprüfungen infolge der *Verifizierung* und *Validierung* aus, bis ein Modell zuverlässig funktioniert bzw. ein möglichst brauchbares Äquivalent zwischen Modell- und Systemverhalten vorhanden ist. Dies ist allein durch die Verwendung eines BIM-Gebäudemodells gegeben. Laut *Liu et al*. besteht ein hohes Maß an menschlichem Urteilsvermögen, wenn BIM-Gebäudemodelle zur Modellierung einer Bauablaufsimulation genutzt werden.[1300] Wie hoch diese Anforderungen aus naturwissenschaftlicher Sicht sind und mit welchen Schritten sich diese erreichen lassen, ist ebenfalls abhängig von einem gewissen Maß an Subjektivität bzw. objektiver Einschätzung.

Letztendlich sind diese Prüfungen der *Verifizierung* und *Validierung* nur deshalb erforderlich, weil das zu überprüfende Modellverhalten möglicherweise nicht das Systemverhalten zufriedenstellend abbildet. Die Notwendigkeit zur Überprüfung der Funktionstauglichkeit der Simulationsmodelle wird im Lösungsansatz genutzt, um einen möglichst hohen Grad an Aussagekraft zu erreichen. Dazu beruht das in *Kapitel 8* vorgestellte Nachweisverfahren insbesondere auf baubetrieblichen Einschätzungen. Der wesentliche Mehrwert besteht gegenüber einem mit der Netzplantechnik „geplanten" Bauablauf darin, dass ein simulierter Sachverhalt immer zwangsläufig hinterfragt werden muss (siehe *These 4* des *Kapitels 4.5.1*), da die Simulation sonst nicht zuverlässig funktioniert.

So sollen durch die Validierung und Verifizierung der im Bauablaufmodell vorhandenen Restriktoren sowie Produktivitätsfaktoren baubetriebliche Aussagen zur Machbarkeit der Ausführungsarbeiten gewonnen werden. Aussagen zur *Machbarkeit* und *Nichtmachbarkeit* von Ausführungsprozessen (oder Teilprozessen) sind erreichbar, wenn ihre Produktivität

[1300] Vgl. Liu/Altaf/Lei/Lu/Hussein, 2015: S. 048-2.

mithilfe eines *Benchmarkings*[1301] überprüft wird. Um aussagekräftige Ergebnisse zur *Plausibilität* oder *Nichtplausibilität* zu erreichen, sind die Analysen möglichst objektiv und wertneutral zu führen. Das Ziel besteht darin, mithilfe der vorhandenen Daten diese Aussagen zu treffen.

Laut *Borrmann* ermöglicht BIM eine Vielzahl plausibler Darstellungs- und Analysemöglichkeiten und ist für ein Sammeln und Strukturieren von Informationen prädestiniert.[1302] Damit beschreibt er Voraussetzungen, die zur *These 3* passen. *Lu und Olofsson* meinen, dass BIM-Modelle ideale Voraussetzungen für die Synchronisation von Konstruktionsänderungen bieten.[1303] *Chou und Yang* sowie *Valavanoglou et al*. äußern, dass diese Eigenschaften für Analysenmethoden terminbezogen ausgearbeitet werden können.[1304] Des Weiteren lassen sich Bauablaufsimulationen mit BIM-Gebäudemodellen zur Vorgangsberechnung verknüpfen.[1305] Dadurch stellt *These 1* zudem eine wesentliche Schnittstelle zwischen den Anforderungen einer Bauzeitanalyse und den Möglichkeiten des Building Information Modeling dar. Aspekte der *These 2* können durch den Einsatz von BIM-Gebäudemodellen unterstützt werden. Die Ansätze eignen sich daher zur digitalen Erstellung baubetrieblicher Gutachten für die Nachweisführung materiell-rechtlicher Ansprüche aus gestörten Bauabläufen.

[1301] Hierunter wird die Gegenüberstellung von objektiv bekannten mit objektiv ermittelten bzw. berechneten Produktivitätskennzahlen verstanden. Dies betrifft gewichtete Aufwands- oder Leistungswerte (siehe *Kapitel 5.2.6*).
[1302] Vgl. Borrmann, 2015: S. 6. Siehe auch Rösch/Dresp, 2017: S. 263-264.
[1303] Vgl. Lu/Olofsson, 2014: S. 76.
[1304] Vgl. Chou/Yang, 2017: S. 062048 4; Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: S. 396.
[1305] Vgl. Tauscher/Smarsly/König/Beucke, 2014: 745-752; Lu/Olofsson, 2014: S. 73-83.

5 Entwurf und Architektur der Entwicklungen

In diesem Kapitel wird ein Softwarekonzept vorgestellt, bei dem ein BIM-basierter Simulator bauablaufbezogene Berechnungen für ein baubetriebliches Nachweisverfahren durchführt. Das Konzept zielt auf eine digitale Arbeitsweise ab, die zur Ausarbeitung baubetrieblicher Gutachten über gestörte Bauabläufe geeignet ist. Für diesen Ansatz mussten der Simulator sowie das Nachweisverfahren – die ***Soll-zu-Ist-Modifikation*** – neu entwickelt und aufeinander abgestimmt werden. Die grundlegenden Vorüberlegungen des Softwarekonzepts fanden bereits in *Kapitel 4.5* mit der Modellierung von *Anhaltspunkten* und den approximierten baubetrieblichen Wirkungsbeziehungen statt. Mithilfe des Softwarekonzepts können die anhand der Anhaltspunkte ermittelbaren Zeitwirkungen für die konkrete bauablaufbezogene Darstellung simuliert und bewertet werden.

5.1 Übersicht des Softwarekonzepts

5.1.1 Systemarchitektur

Die Soll-zu-Ist-Modifikation ist Bestandteil eines konzeptionellen Softwaresystems (siehe Architektur in *Abbildung 5-1*). Im Hintergrund der Anwendung arbeitet ein nicht sichtbarer *Simulator*, der mit der *Soll-zu-Ist-Modifikation* über das *BIM-Gebäudemodell* verknüpft ist. Daneben wird das BIM-Gebäudemodell über einen *BIM-Modell-Viewer* in eine interaktive 3D-Geometrie und/oder 4D-Visualisierung mit der Soll-zu-Ist-Modifikation synchronisiert. Der Simulator kann komplexe Wirkungsberechnungen für baubetriebliche Bauzeitanalysen ausführen. Er nutzt Daten des BIM-Gebäudemodells, die vom Anwender über den BIM-Modell-Viewer oder über die Soll-zu-Ist-Modifikation eingegeben werden. Der Simulator führt seine Berechnungen mit einer ereignisgesteuerten Simulationszeit aus. Seine Ablauflogik basiert auf der in *Kapitel 2.3.4* vorgestellten Petri-Netz-Methode.

In der Bauzeitanalyse *steuert* der Anwender die simulierten Ausführungsprozesse etappenweise. Letztere *regeln* sich selbst gem. *Kapitel 4.5.2* anhand der vorgegebenen Eingaben. Als Simulationsergebnisse werden Ausführungsdauern sowie Fertigungsreihenfolgen errechnet, die über das BIM-Gebäudemodell in die Soll-zu-Ist-Modifikation für baubetriebliche Bewertungen einfließen. Die erzielten Simulationsergebnisse lassen sich grafisch und teilweise auch sprachlich ausgeben. Bei dem entwickelten und hier vorgestellten Softwarekonzept wird vorgesehen, dass der Anwender seine Eingaben über spezialisierte Unterprogramme bzw. Software-Module durchführt, die entweder im BIM-Modell-Viewer oder in der Darstellung der Soll-zu-Ist-Modifikation gem. *Kapitel 5.1.2* eingebettet sind. Die baubetriebliche *Validierung* und *Verifizierung* der Simulations*ergebnisse* erfolgt über die Nutzung des baubetrieblichen Nachweisverfahrens. Hingegen wird die *Verifizierung* des Simulations*modells* durch den Simulator sichergestellt.

Für die Soll-zu-Ist-Modifikation wurde eine spezielle Zeitdarstellung entworfen, damit darin die umfangreichen numerischen Simulationsergebnisse übersichtlich gezeigt werden können. Jedoch ist die vorgeschlagene Softwarearchitektur der Soll-zu-Ist-Modifikation keine zwingende Voraussetzung. Das reine Nachweisverfahren lässt sich auch ohne Computerunterstützung – also händisch – durchführen.[1306] Eine manuelle Arbeitsweise kann allerdings mit einem erhöhten Arbeitseinsatz verbunden sein, weshalb eine computer-

[1306] Vgl. Weigel, 2017: Masterarbeit.

gestützte Untersuchung zu empfehlen ist. Demzufolge wird im Folgenden davon ausgegangen, dass fortwährend eine digitale Arbeitsweise stattfindet, bei der die komplexen Simulationsberechnungen für baubetriebliche Bauzeitanalysen genutzt werden.

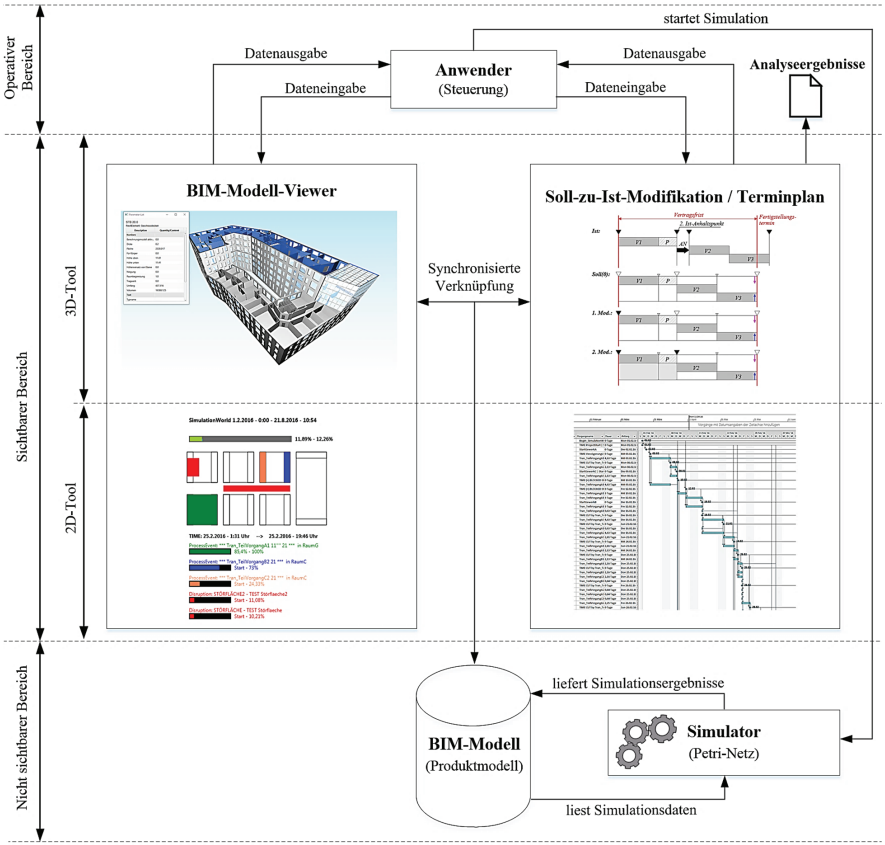


Abbildung 5-1: Übersicht der Systemarchitektur(en)[1307]

Im weiteren Text wird ausschließlich der Fokus auf die *zeitlichen Wirkungen* infolge von Bauablaufstörungen gelegt. Dabei dient die Soll-zu-Ist-Modifikation der Analyse von Produktionsprozessen und zur Messung bauzeitlicher Abweichungen. Zusätzlich wird in dieser Arbeit eine Methodik für die *Strukturierung* dokumentierter und sachlogischer Informationen vorgeschlagen. Der entworfene Lösungsansatz umfasst allerdings kein konkretes Darlegungskonzept bauzeitlicher Ansprüche; bspw. wird nicht darauf eingegangen, wie ein Formular auszuarbeiten ist, damit ein bestimmter Rechtsanspruch übersichtlich und vollständig dargelegt oder bewiesen werden kann.

[1307] Eigene Darstellung. Im sichtbaren Bereich werden zwei prototypische Entwicklungen vorgestellt, die voneinander unabhängig sind. *Kapitel 7.3.1* liefert näheres zum *2D-Tool*.

5.1.2 Interdisziplinäre Entwurfsansätze

Das Modellierungskonzept orientiert sich *grob* an einer ***Digital Audio Workstation*** (DAW). Eine DAW ist ein etabliertes Konzept für eine Software, mit der sich Audiospuren aufnehmen, abmischen und veröffentlichen lassen. Im Gegensatz zu einer analogen Tonbandaufnahme, wie sie noch in den 1980er Jahren üblich war, ermöglicht es der gegenwärtige Stand der Technik, dass eine Musikaufnahme viel differenzierter aufgenommen und bearbeitet werden kann. Mit einer DAW ist eine digitale Aufnahme und gezielte Weiterverarbeitung diverser Interpreten eines musikalischen Werks möglich. Darüber hinaus können verschiedene digitale Tonspuren getrennt voneinander aufgenommen werden, damit sich innerhalb eines Gesamtprojekts teilweise mehrere zusammengestellte Aufnahmen für einen Interpreten aufzeichnen lassen. Dafür kann innerhalb einer DAW eine Tonspur zerteilt, erneut eingespielt oder verändert werden, und zwar so lange, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis zustande gekommen ist. Solche Modifizierungen lassen sich zudem für vereinzelte Teilstücke einer Tonspur vornehmen. Beispielsweise können einzelne Tonspuren oder Teilstücke beliebig aus dem Gesamtprojekt herausgegriffen und verschoben, modifiziert, ausgeblendet, gelöscht oder neu eingespielt werden.

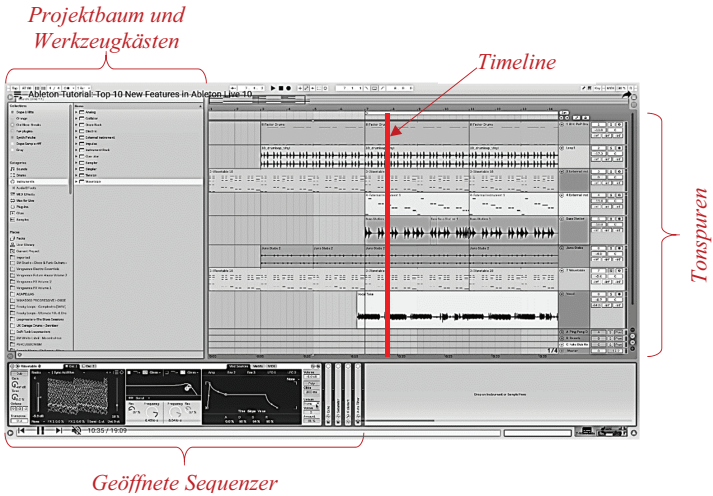


Abbildung 5-2: Screenshot einer kommerziellen DAW mit ihren Sequenzern[1308]

Für sehr spezielle Modifikationen, z. B. Halleffekte, Equalizer, Vocoder, Kompressoren, Synthesizer etc., kann der Anwender einer DAW auf sog. ***Sequenzer*** zurückgreifen, die in Abhängigkeit von ihren Funktionalitäten auf das Gesamtprojekt auf eine Tonspur und/oder auf vereinzelte Teilstücke anzuwenden sind (siehe *Abbildung 5-2*). Über die Sequenzer greift der Anwender auf eine vorgefertigte Modullösung innerhalb der Simulationsanwendung zu. Sie besitzen häufig eine vorgefertigte Benutzeroberfläche zur Parametrierung der Effekteinstellungen. In der Regel bleiben die Einstellungen des Sequenzers erhalten und können bei Bedarf neu angepasst werden. Für ein *schnelleres Arbeiten* sind Gruppierungen

[1308] Kommentierter Screenshot von *Ableton Live 10*. Siehe www.ableton.com/de/shop/live/ [zuletzt abgerufen am 16.09.2018].

mehrerer Tonspuren oder die Zusammenfassung von Teilstücken möglich. Mit solchen Gruppierungen können mit einer Sequenzereinstellung mehrere voneinander unabhängige Aufnahmen modifiziert werden.

Als zeitliche Orientierungshilfe ist in jeder DAW eine sog. ***Timeline*** vorhanden, worüber Abfragen diskreter Zeitpunkte aus dem Gesamtprojekt möglich sind (siehe *Abbildung 5-2*). Mithilfe der Timeline können bereits eingespielte Tonspuren zu frei wählbaren Zeitpunkten beliebig oft abgespielt werden. Auch die Zeitpunkte für Modifizierungen lassen sich mit der Timeline auswählen. Hierüber kann der Anwender bestimmen, ob dann eine benutzergesteuerte Modifikation beginnen oder enden soll.

Darüber hinaus bewegt sich die Timeline beim Ausführen zeitproportional zur Simulationszeit fort, damit der Anwender prüfen kann, wann welche Tonspur einen Beitrag innerhalb des Gesamtprojekts leistet. Um die Auswirkungen besser erkennen zu können, lässt sich ein Teilbereich des Gesamtprojekts markieren und in Schleife fortan wiederholen. Hierdurch kann die Überprüfung der Anwendungsergebnisse des Benutzers intensiviert werden.

Abbildung 5-2 zeigt einen Screenshot einer kommerziellen DAW. In ihr sind mehrere Sequenzer geöffnet und in der Benutzeroberfläche eingebettet. Die Timeline wird durch einen senkrechten Strich hervorgehoben, der sich beim Ausführen der DAW von links nach rechts – mit der Simulationszeit – fortbewegt.

Da die Eingabemaske eines Sequenzers häufig wie ein analoges Gerät gestaltet ist, nimmt der Anwender diesen bei seinen Eingaben ggf. *nicht* als Simulationsanwendung wahr. Das Konzept zur Nichtwahrnehmung einer Simulationssoftware wird ebenso bei *technischen* Simulationsanwendungen beabsichtigt. Das Ziel besteht darin, dass ein Anwender, der kein Simulationsexperte ist, sich schnell zurechtfinden soll, indem er intuitive Eingaben vornimmt.[1309]

Die gewählte Darstellungsmethodik des Softwarekonzepts orientiert sich an der „üblichen Bedienungsoberfläche“ einer DAW. In dem für die Kausalitätsnachweise entwickelten Simulator lassen sich spezialisierte Unterprogramme, ähnlich wie Sequenzer, integrieren. Der Anwender soll mit diesen Unterprogrammen die Soll-zu-Ist-Modifikation auf ähnliche Weise steuern und so die baubetrieblichen Nachweise führen. Darüber hinaus wird dem Benutzer mit der digitalen Arbeitsweise ein umfangreicher Zugriff auf die digitalen Berechnungsergebnisse ermöglicht.[1310]

[1309] Entsprechende Überlegungen für Bauablaufsimulationen thematisieren *AbouRizk und Hajjar*. Vgl. AbouRizk/Hajjar, 1998: S. 604 ff. Ähnlich: Vgl. Chahrour, 2007: S. 604 ff. Im Gegensatz dazu soll dem Anwender bei dem vorgeschlagenen Lösungsansatz kein vorgefertigtes, sondern ein leicht erlernbares Benutzeroberflächenkonzept angeboten werden. Allerdings wurde die Usability im Rahmen der vorliegenden Arbeit *nicht* vollständig ausgearbeitet. Stattdessen wurden ihre Voraussetzungen untersucht. Auch *Samkari* betont die Bedeutung derartiger *nichtfunktionaler Anforderungen* für Simulationsanwendungen. Vgl. Samkari, 2014: S. 53 ff., 58-59.

[1310] Siehe prototypische Implementierung in *Kapitel 6*.

5.1.3 Darstellungskonzept

Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation wird von der Zeitdarstellungsmethodik eines Balkenplans abgesehen, weil der entwickelte Simulator sehr feingliedrige Vorgangsdauern und umfangreiche Abhängigkeiten berechnet. Zum Beispiel verarbeitete der Simulator bei dem im *Kapitel 7* vorgestellten Beispielprojekt *21.584 Elemente* für kapazitätsabhängige Arbeitsaufgaben. Das heißt, in dieser Menge waren *keine* Vorgänge enthalten, die ohne Kapazitäten auskommen, wie Trocknungsvorgänge, blockierte Arbeitsbereiche oder diskrete Zeitabhängigkeiten. Der Grund für diese große Anzahl der Elemente lässt sich u. a. auf die Simulationszeit zurückführen, deren kleinste Zeitschritte im Minutenbereich voranschreiten. Darüber hinaus sind die Elemente außerordentlich stark miteinander vernetzt.

Im Rahmen eines Tests waren die durch einen vernetzten Balkenplan abgebildeten Simulationsergebnisse nicht mehr überschaubar. So wurden einerseits die Vorgangsbalken und Meilensteine in zahlreiche neue Zeilen geschrieben, andererseits überlagerten sich die als Pfeile dargestellten Anordnungsbeziehungen (Normalfolgen) aufgrund ihrer großen Anzahl gegenseitig. Letztendlich wäre die manuelle Durchführung eines Soll-Ist-Vergleichs nicht mehr wirtschaftlich gewesen. Daher ist die Gesamtdarstellung des simulierten Bauablaufmodells durch einen vernetzten Balkenplan ungeeignet.[1311]

Diese Unüberschaubarkeit, die auf die Möglichkeiten des Simulators zurückzuführen ist, hatte unmittelbare Auswirkung auf die Bauzeitanalysen sowie auf die Zeitdarstellungsmethodik der Soll-zu-Ist-Modifikation. Insgesamt sieht das alternative Darstellungskonzept ineinander verschachtelte ***Vorgangsintervalle*** vor, die aus hintereinander angeordneten ***Segmenten*** bestehen (siehe *Abbildung 5-3*). Jedes Vorgangsintervall besitzt einen eigenen internen *kritischen Weg*, der sich durch die Simulation automatisch einstellt – hierauf wird im folgenden Unterkapitel näher eingegangen.

Genau wie ein Vorgangsbalken eines Balkenplans stellt ein Vorgangsintervall des Darstellungskonzepts einen andauernden Prozess eines Sachverhalts auf einer Zeitachse dar. Ein wesentlicher Unterschied zu einem Vorgangsbalken besteht darin, dass sich ein Vorgangsintervall ggf. aus mehreren Segmenten zusammensetzt. Ein Vorgangsintervall lässt sich mit einem Sammelvorgang vergleichen. Jedes Vorgangsintervall erhält eine eigene untereinander angeordnete ***Spur***. Darin sind die Segmente enthalten, die zusammen ein konkretes Vorgangsintervall bilden.

Jedes Vorgangsintervall besitzt innerhalb seiner Spur einen Start- und einen Endzeitpunkt. Im Gegensatz zu einem Vorgangsbalken können die Vorgangsintervalle ineinander verschachtelt sein. Mit diesem Schema lassen sich einerseits *Hierarchiestufen* bzw. ***Intervallebenen*** bilden und andererseits Gruppierungen vornehmen. Somit entspricht eine Spur einem Ablaufabschnitt im Sinne der REFA-Methodenlehre.[1312] Darüber hinaus kann ein Segment als ein interaktives Element gestaltet werden, das innerhalb der *Systemarchitektur*[1313] einen umfassenden Zugriff auf das vernetzte Berechnungsmodell ermöglicht.

[1311] Siehe z. B. *Abbildung 5-5* mit einem kleinen Ausschnitt der Simulationsergebnisse in einer Balkenplandarstellung.
[1312] Siehe *Kapitel 2.1.11*.
[1313] Siehe *Kapitel 5.1.1*.

Jedes Segment besitzt zwei *Anhaltspunkte* als Start- und Endbedingung.[1314] Unter Umständen teilen sich *mehrere* Segmente *einen* Anhaltspunkt. Das ist dann der Fall, wenn mehrere Anhaltspunkte auf einen zeitgleichen Termin fallen. Neben einer manuellen Eingabe lassen sich derartige Situationen auf die Berechnungsmethodik des Simulators zurückführen. Er zerlegt alle Segmente, die einen Anhaltspunkt überlappen, in jeweils zwei neue Segmente. Dabei wird das überlappende Segment zum Zeitpunkt des Anhaltspunkts geschnitten. *Abbildung 5-3* verdeutlicht die Zusammenhänge.

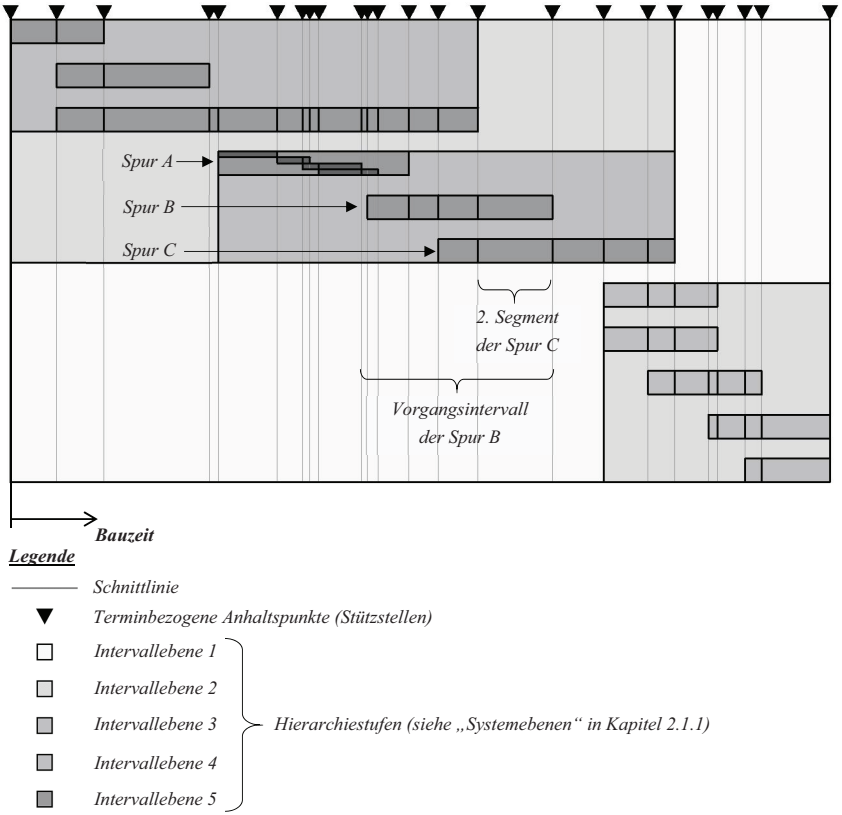


Abbildung 5-3: Zeitdarstellung durch produktionsbasierte Vorgangsintervalle[1315]

Es gilt die Regel: **Immer wenn ein beliebiges Element zu einem Termin beginnt oder endet, findet eine Zerlegung des gesamten Bauablaufs statt**. Zwei neu geschaffene Segmente, die aufgrund der Zerlegung aus einem ursprünglichen Segment zustande gekommen sind, behalten weiterhin ein und denselben Inhalt, wie z. B. die Arbeitsaufgabe eines bestimmten Ausführungsprozesses. Unterschiedlich sind nur ihre Zustands-

[1314] Siehe *Kapitel 5.5.1*.
[1315] Eigene Darstellung.

beschreibungen, die aufgrund des Prozessfortschritts ggf. voneinander abweichen. Beide Segmente teilen sich daher den Anhaltspunkt, der durch die Zerlegung entstanden ist. Diese „Salamitaktik“[1316] bietet den Vorteil, dass alle untereinanderliegenden bzw. zeitparallelen Segmentzustände zu einem zeitdiskreten Anhaltspunkt ganzheitlich erfasst werden. Dadurch wird ein Zustandsraum im Sinne einer Petri-Netz-Markierung gebildet.[1317]

Bei der Softwareentwicklung in *Kapitel 6* wurde darauf geachtet, dass die Zustandsbeschreibungen der zusammengeführten Anhaltspunkte weiterhin getrennt voneinander erhalten bleiben, damit sie separat ausgewählt werden können. Als Lösungsvorschlag lassen sich die Zustandsbeschreibungen der Soll- und Ist-Anhaltspunkte in einem *Zustandscontainer* hinterlegen. Diese werden daraufhin in übergeordnete *Termincontainer* einsortiert.

Termincontainer assoziieren bestimmte Termine. Dazu sind sie entweder aufgrund eines bestehenden Anhaltspunkts bereits vorhanden oder müssen ggf. neu erstellt werden. Mithilfe der Termincontainer lassen sich beliebige Zustandscontainer – und somit die Inhalte der aufeinanderliegenden Anhaltspunkte – beliebig aufnehmen sowie abgeben. Diese Konstruktion hat den Vorteil, dass die Termincontainer zeitlich fixiert sind und die Inhalte der Zustandscontainer nicht miteinander vermischt werden. Dieses Prinzip wurde durch den entwickelten Simulator erfolgreich getestet. Eine derartige Vorgehensweise ist aber für eine händische Anwendung der Soll-zu-Ist-Modifikation irrelevant.[1318]

In *Abbildung 5-4* wird das genannte Prinzip der Container grafisch vorgestellt. Hier ist zu sehen, wie Zustandscontainer in Termincontainern enthalten sind. Auf eine konkrete Bezeichnung der Container wird in der Abbildung verzichtet.

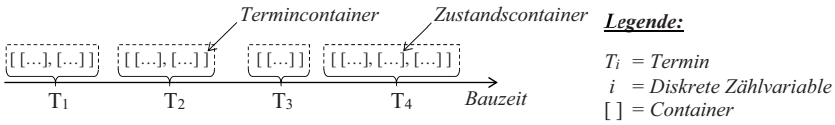


Abbildung 5-4: Differenzierung der Informationen mithilfe von Containern[1319]

Zeitdiskrete Bedingungen können von der Soll-zu-Ist-Modifikation durch ***meilensteinähnliche Anhaltspunkte*** berücksichtigt werden, die ebenfalls Vorgangsintervalle sind – allerdings ohne Zeitdauern. Ihre Start- und Endtermine werden in einem einzelnen Anhaltspunkt zusammengefasst. Dies deshalb, da sich beide Termine einen diskreten Zeitpunkt teilen müssen. Sie zerlegen ebenfalls ein überlappendes Segment im Sinne der oben genannten „Salamitaktik“.

Als Besonderheit besitzt jedes Vorgangsintervall zwei Start- und zwei Endtermine. Sie lassen sich nur erkennen, wenn die beiden Start- oder die beiden Endtermine zeitlich auseinander liegen. Mit dieser Konstruktion können Zeitabstände zwischen Segmenten und anderen Vorgangsintervallen gebildet werden. In *Abbildung 5-3* ist exemplarisch ein Zeitabstand für das Ende des letzten internen Vorgangsintervalls der „Spur A“ zu sehen.

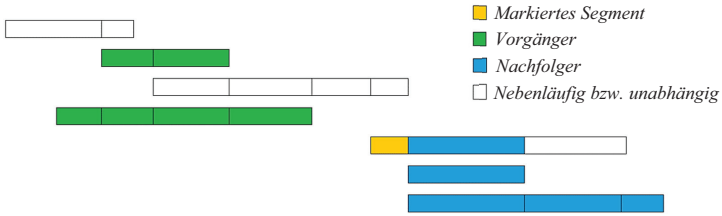
[1316] I. A. a. Axelson, St. 02.03.2017 (siehe *Kapitel 2.4.9*).
[1317] Siehe *Kapitel 2.3.4*.
[1318] Ein vergleichbares Prinzip wird vom Simulator bei der Zerlegung von Segmenten angewandt (siehe *Kapitel 6.3.7*).
[1319] Eigene Darstellung.

5.1.4 Weiterführende Konzepte der Zeitdarstellung

Alternativ zu den Pfeilen können die Segmente eingefärbt werden, um so die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgangsintervallen zu visualisieren. In *Abbildung 5-5* wird dieses digitale Visualisierungskonzept gezeigt. Erfolgt z. B. die Markierung eines Segments durch einen Mausklick (orange dargestellt), werden seine unmittelbaren Vorgänger (grün dargestellte Segmente) sowie seine unmittelbaren Nachfolger (blau dargestellte Segmente) farbig hervorgehoben.

Mit diesem Visualisierungskonzept könnten prozess-, ressourcen- oder geometriebedingte Abhängigkeiten ggf. kombiniert oder voneinander getrennt aufgezeigt werden. Eine solche Visualisierungstechnik würde dazu beitragen, dass sich gerade bei stark vernetzten Modellen eindeutigere Assoziationen hervorheben lassen, als es vergleichsweise mit einer Pfeildarstellung möglich wäre.[1320]

Visualisierung der Abhängigkeiten durch ein Farbschema (Ausschnitt beispielhafte Darstellung)



Visualisierung der Abhängigkeiten durch Verknüpfungspfeile (Ausschnitt Simulationsergebnis)

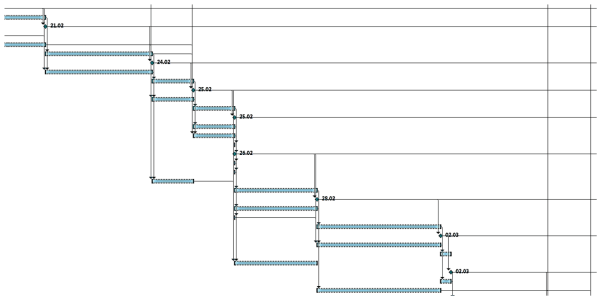


Abbildung 5-5: Gegenüberstellung – Anordnungsbeziehungen mit einem farbigen Schema[1321]

Zur Erklärung ist in *Abbildung 5-5* das farbige Visualisierungskonzept gegenüber einem simulierten Balkenplan mit Anordnungsbeziehungen zu sehen.

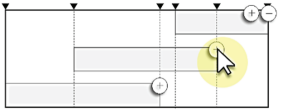
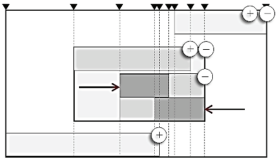
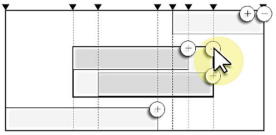
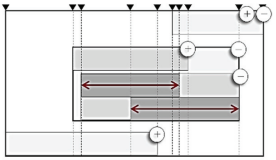
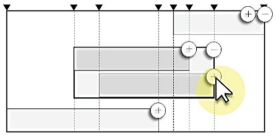
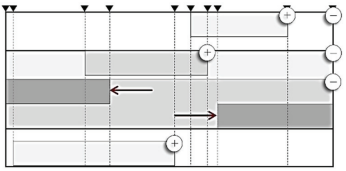
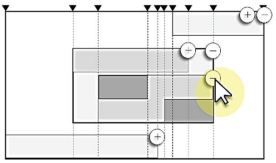
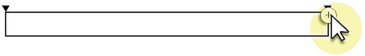
Im Vergleich zur Netzplantechnik sieht das entworfene Darstellungskonzept aufgrund simulationsbedingter Vernetzungen keine Terminplanzweige vor. Vielmehr lassen sich die kritischen (Teil-)Bauablaufmodelle durch ineinander verschachtelte Vorgangsintervalle

[1320] Diese Visualisierungsmethodik wurde bei der prototypischen Entwicklung *nicht* ausgearbeitet.
[1321] Eigene Darstellung.

voneinander abgrenzen. In Abhängigkeit von ihrer Betrachtungstiefe sind sie jeweils als kritisch anzusehen. Der Anwender kann hierüber die kritischen Teilabläufe filtern.

Der kritische Verlauf eines jeden Vorgangsintervalls ist durch seinen Start- und einen Endtermin begrenzt und passt sich über seine *internen* Vorgangsintervalle an. Die kleinsten Vorgangsintervalle sind als elementar anzusehen. Mit der folgenden *Tabelle 5-1* werden diese Zusammenhänge und die digitale Arbeitsweise in acht aufeinander aufbauenden Einzelbildern veranschaulicht. Die Einzelbilder sind spaltenweise, von oben nach unten, zu lesen.

Tabelle 5-1: Beispielhafte Szenarien zur interaktiven Gestaltung der Vorgangsintervalle[1322]

Benutzergesteuertes Öffnen der Vorgangsintervalle	**Anpassungen der Vorgangsintervalle und benutzergesteuertes Schließen des Vorgangsintervalls**
Bild 1: *Öffnen eines Vorgangsintervalls bis in die 3. Intervallebene* 	***Bild 5:*** *Ineinanderverschiebung der kleinsten Vorgangsintervalle* 
Bild 2: *Geöffnetes Vorgangsintervall mit sichtbarer 3. Intervallebene* 	***Bild 6:*** *Streckung der kleinsten Vorgangsintervalle* 
Bild 3: *Öffnen eines weiteren Vorgangsintervalls bis in die 4. Intervallebene* 	***Bild 7:*** *Auseinanderverschiebung der kleinsten Vorgangsintervalle* 
Bild 4: *Geöffnetes Vorgangsintervall mit sichtbarer 4. Intervallebene* 	***Bild 8:*** *Schließung der 1. Intervallebene* 

[1322] Eigene Darstellung.

Die internen Vorgangsintervalle existieren auch dann, wenn sie bei der alleinigen Darstellung eines übergeordneten Vorgangsintervalls nicht sichtbar sind (siehe *Teilbild 8* in *Tabelle 5-1*). Im Inneren eines solchen Vorgangsintervalls können sie nebenläufig sein oder sich gegenseitig bedingen, so dass *Überlappungen* oder *Verschiebungen* zustande kommen. Neben den *Zeitabständen* sind *nur* bei den *kleinsten* internen Vorgangsintervallen auch *Unterbrechungen* möglich. Demgegenüber treten bei einem übergeordneten Vorgangsintervall grundsätzlich *keine* Unterbrechungen auf. Vielmehr umschließt es alle internen Vorgangsintervalle und erhält dadurch sein zusammenhängendes Grundgebilde aufrecht (siehe *Tabelle 5-1*). Mit dem beschriebenen Konstrukt sind zeitliche Verschiebungen, Streckungen oder Stauchungen des übergeordneten Vorgangsintervalls möglich, sobald eine Modifizierung an den internen Vorgangsintervallen stattfindet.

Die Soll-zu-Ist-Modifikation zielt insbesondere auf den *kritischen Anfangstermin* sowie den *kritischen Endtermin* eines beliebigen Vorgangsintervalls ab. Für Überprüfungen verlängerter Ausführungsfristen ist auf diese zeitdiskreten Termine zu achten. Der Anwender kann prinzipiell frei wählen, welche Vorgangsintervalle er untersuchen möchte. Über ein Petri-Netz-Modell lassen sich beliebige Vorgangsintervalle in Gruppen bündeln.[1323] Dadurch erhält der Anwender die Möglichkeit, innerhalb eines bestehenden Bauablaufmodells beliebige Vorgangsintervalle in einem ***Gruppenintervall*** zusammenzufassen. Gemäß der vorausgegangenen Beschreibung besitzt jedes Gruppenintervall einen eigenen kritischen Weg.

5.2 Konzeptionelle Anforderungen eines geeigneten Simulators

5.2.1 Vorüberlegungen zu den Produktionsabläufen

Die Funktionalität der digitalen Arbeitsweise wird nachstehend anhand einer konzeptionellen Beschreibung vorgestellt. Vorab erfolgt eine Abgrenzung der Bauzeitanalyse über Arbeitsabläufe im ***Ausbau***.[1324]

Der Ausbau zeichnet sich insbesondere durch viele *Schnittstellen* zwischen seinen Gewerken und anderen *Gewerkegruppen*[1325] aus, die u. a. zeitgleich auf der Baustelle tätig sind.[1326] Im Hinblick auf die Schnittstellen beschreibt *Möhring* zu den Ausbaugewerken eine „[…] *innige Verzahnung mit anderen Gewerken, z. B. Elektroarbeiten, Heizungsbau etc.,* [bei denen] *massive Abhängigkeiten gegenüber Vorleistungen von anderen Ausbaugewerken* [vorhanden sind].“[1327] Dazu schildert *Racky*, dass die Ausführungsprozesse insbesondere durch *zweckmäßige Abhängigkeitsbeziehungen* geprägt sind, als vergleichsweise beim *Rohbau* mit seinen vermehrt *zwingenden Abhängigkeitsbeziehungen*.[1328] Entsprechend betont *Heilfort* die hohe Leistungsflexibilität des Ausbaus gegenüber den eher starren technischen Abläufen im Rohbau.[1329] Dies erlaubt, beim Eintritt von Bauablaufstörungen, nahezu immer alternative

[1323] Durch die Bildung von *Sub-Netzen* (siehe *Kapitel 6.3.1*). Eine entsprechende Gruppierung wurde infolge der prototypischen Implementierung *nicht* getestet.
[1324] Siehe *Tabelle 2-2* – Übersicht möglicher Gewerkegruppen für Büro- und Verwaltungsgebäude in *Kapitel 2.1.11*.
[1325] Entsprechend sind gewerkeübergreifende Schnittstellen mit Arbeitsaufgaben aus dem Rohbau, der Gebäudehülle oder der Gebäudetechnik möglich.
[1326] Vgl. Dang, 2014: S. 80.
[1327] Möhring, 2012: S. 127.
[1328] Vgl. Racky, 1997: S. 41.
[1329] Vgl. Heilfort, BauR 2003: 1646-1647.

Ausweichmöglichkeiten ausstehender Arbeitsaufgaben.[1330] Entsprechend können andere Arbeitsabschnitte oder Geschosse vorgezogen werden.

Die Bauablaufplanung der Ausbauarbeiten erfolgt zwar vornehmlich geschoss- oder abschnittsweise, doch werden die Arbeitsaufgaben im Grunde eher *raumweise* ausgeführt.[1331] Bei einer raumweisen Betrachtung offenbart sich gerade bei größeren Bauwerken eine realitätsnahe Fertigungsrichtung. Währenddessen können die auszuführenden Arbeitsaufgaben, je nach prozessabhängigen Anforderungen *und* geometrischen Besonderheiten der Räume, in unterschiedlichen Geschwindigkeiten voranschreiten.[1332] Oftmals sind die vorliegenden Bauzeitenpläne terminlich so „eng gestrickt", dass nur geringe Platz-/Zeitkontingente für die rechtzeitige Erfüllung der Bauleistungen zur Verfügung stehen. Dadurch wird von den Ausbauarbeiten eine räumliche und zeitliche Variabilität abverlangt, was sie für eine stark ausgeprägte Komplexität prädestiniert.[1333]

Lang und Rasch beschreiben den Trend zu einer immer kürzeren Gesamtprojektbauzeit, wodurch besonders störungsanfällige Bauabläufe entstehen.[1334] Die Störungsanfälligkeit der Ausbaugewerke ist i. d. R. groß und nimmt gegen Projektende zu, weil sich bereits vorausgegangene Bauleistungen mitunter verspäteten. Solche Baustellensituationen führen dazu, dass ein Gewerk, sobald es seine Fertigungsrichtung ändert, unmittelbar die Produktionsprozesse seiner Nach- und/oder Nebengewerke beeinflussen kann. Daraufhin sind Folgewirkungen auf weitere Gewerke im Sinne eines „Dominoeffekts" möglich. Im Verlauf der Ausbauarbeiten werden häufig nachzuarbeitende Mängel entdeckt.[1335] Dies kann bereits der Ausgangspunkt des oben beschriebenen Dominoeffekts sein (siehe weitere Beispiele in *Kapitel 4.5.2*). Grundsätzlich ist der Ausbau abhängig von den vorausgegangenen Arbeiten und unterliegt teilweise einer besonders komplexen Eigendynamik.

Die Dynamik der Ausbauarbeiten ist hauptsächlich auf die Verrichtung der eingesetzten Arbeitskräfte zurückzuführen.[1336] Sie begeben sich zu den jeweiligen Arbeitsbereichen und führen dort, unter Berücksichtigung situativer Umstände, ihre Arbeitsaufgaben aus. Dabei gehen sie einer vordefinierten Fertigungsrichtung nach, die sich jedoch aufgrund von Bauablaufumstellungen ändern kann.[1337] Für die realitätsnahe Simulation von Ausbauarbeiten muss das oben beschriebene dynamische Verhalten der Kapazitäten in einer entsprechenden Bauwerksgeometrie simuliert werden.

Ben-Alon und Sacks betonen, dass sich die Grenzen bestehender Forschungsmodelle überwinden lassen, wenn die Bauablaufsimulationen in realistischen virtuellen Umgebungen stattfinden.[1338] Ihrer Meinung nach kann dies durch die Gestaltung der Umgebung eines BIM-Gebäudemodells geschehen, das sowohl den Prozess als auch das Produkt beschreibt.[1339] Im Rahmen der Simulation ist es daher erforderlich, dass sich die darin abzubildenden

[1330] Vgl. Racky, 1997: S. 43; Heilfort, BauR 2003: 1649.
[1331] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 62.
[1332] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 22.
[1333] Vgl. Voigtmann, 2014: S. 1-3, 32-33.
[1334] Vgl. *Lang/Rasch in* Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Teil B, Rdn. 1.
[1335] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 22.
[1336] Vgl. Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: S. 22.
[1337] Vgl. Tommelein/Riley/Howell, 1999: S. 304.
[1338] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 14.
[1339] Vgl. Ben-Alon/Sacks, 2017: S. 14.

Kapazitäten nahezu eigenständig innerhalb eines BIM-Gebäudemodells fortbewegen. Dort müssen sie in lokalen Arbeitsbereichen die virtuellen Arbeitsaufgaben ausführen. Ein derartiges Verhalten lässt sich simulieren, wenn die Kapazitäten durch Agenten abgebildet werden, die einerseits die Ausführung eines Produktionsprozesses *bezwecken*[1340] und andererseits eine definierbare Fertigungsrichtung beibehalten.

Von den nachgebildeten Ausbauarbeiten wird abverlangt, dass sie sensitiv auf die modellierten Störungssachverhalte reagieren. Zu den *Reaktionen* zählen besonders zeitliche Änderungen der simulierten Produktionsprozesse, wie

- Verschiebungen,
- Unterbrechungen,
- Leistungserweiterungen oder -reduzierungen,
- Beschleunigungen oder Verzögerungen (bzw. Produktivitätsänderungen).

Bei der Entwicklung des Simulationsansatzes war es wichtig, dass sich diese zeitlichen Änderungen entweder eigenständig durch die Agenten infolge ihrer Verhaltenslogik oder durch gezielte Vorgaben des Anwenders einstellen. Weiterhin ist für das simulationsbasierte Nachweisverfahren grundsätzlich zu gewährleisten, dass eine sinngemäße Modellierung der dokumentierten Bauablaufstörungen möglich ist.

Die Modellierung der Bauablaufstörungen darf nicht ausschließlich nach den rechtlichen Ansprüchen geschehen, sondern nach den Sachverhaltsschilderungen, die in ihrer Charakteristik individuell sind. Dies lässt sich in den Simulationsberechnungen dann berücksichtigen, wenn sie authentisch abstrahiert werden. Beispielsweise soll der entwickelte Simulationsansatz dazu verhelfen, dass

- Vorgänge nicht nur mit einem Ende oder einer bestimmten Dauer definiert werden müssen,
- keine zwingenden Zuweisungen von Kapazitäten an die einzelnen Vorgangsknoten stattfinden,
- ein ganzheitlicher Rückgriff auf die Bauteilmengen des Gebäudemodells möglich ist und
- situative Konfliktprüfungen erfolgen, die dazu führen, dass sich die Agenten der jeweiligen Situation automatisch anpassen.

5.2.2 Anforderungen an ein Geometriemodell für Ausbauarbeiten

Neben raumbildenden Arbeitsaufgaben im Ausbau, wie Trockenbauarbeiten, sind insbesondere oberflächenbezogene Arbeiten von Innenräumen vorzufinden. Letztere wären bspw. Bodenbelagsarbeiten, Fliesen- und Plattenarbeiten, Natur- und Werksteinarbeiten, Putz- und Stuckarbeiten oder Maler- und Lackiererarbeiten.

Zudem umfasst der Ausbau eine objektbezogene Ausstattung der Räume. Dazu zählen u. a. Geländerarbeiten, die Montage von Innentüren und Leuchtmitteln, der Einbau von Holz- und Stahltreppen oder deren Oberflächenbehandlungen.

[1340] Das heißt, den Produktionsprozess veranlassen. Sie müssen ursächlich für die Berechnung eines Produktionsprozesses sein.

Die Raumseiten sind i. d. R. durch die Oberflächen der umschließenden Bauteile begrenzt. Für die Ausführungsprozesse der Ausbauarbeiten sind dies im Wesentlichen Wände, Decken sowie Böden. Jedoch erfordert die Definition eines Innenraums nicht zwingend ein angrenzendes Bauteil. Raumseiten können lediglich einen geometrischen Bereich trennen.[1341]

Oft müssen die Raumseiten aufgrund der auszuführenden Arbeitsaufgaben in Teilflächen gegliedert werden. Die „klassischen" Teilflächen sind Bauteilöffnungen. Zum Beispiel befinden sich an den Raumseiten von Wänden mitunter Türen oder Fenster, sowie von Böden und Decken, Treppenlöcher oder Versorgungsschächte. In Abgrenzung zu den Übermessungsregeln der VOB/C unterbrechen diese Bauteilöffnungen in der Realität die Arbeitsgegenstände, so dass dort keine Produktionsprozesse stattfinden. Allerdings stellen diese eine geometrische Änderung des Arbeitsgegenstands dar, die in einigen Fällen an den Übergangsstellen einen erhöhten Arbeitsaufwand abverlangen. Ferner sind weitere Teilflächen der Raumseiten aufgrund des Bauentwurfs möglich. So kann der Bodenbelag innerhalb eines Raums verschieden ausgestattet sein. Entwurfsmäßige Unterschiede des Bodenbelags bestehen gelegentlich beim Übergang zum Brandabschnitt in Fluren. Aber auch die Oberfläche einer Wand setzt sich ggf. aus mehreren Teilflächen zusammen, z. B. bei einer partiellen Holzvertäfelung.

Die Unterteilung von Raumseiten kann sich außerdem aus dem gewählten Bauverfahren ergeben. Möglicherweise erfolgen verschiedene Teilprozesse einer Bauleistung an unterschiedlichen Teilbereichen des Arbeitsgegenstands. Denkbar sind zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen beim Einbau von Bodenfliesen im Bereich eines Abflusses. Gleichwohl können ablauforganisatorische Gründe, etwa beim abschnittsweisen Voranschreiten des gewählten Bauverfahrens, ausschlaggebend sein, dass eine Raumseite in Teilflächen unterteilt wird. Ein weiterer Aspekt zur Bildung von Teilflächen lässt sich in möglichen Schlechtleistungen (bzw. Baumängeln) oder verzögerten Arbeitsaufgaben wiederfinden, die nur unvollständig fertiggestellt wurden. Solche Umstände bestehen bei Malerarbeiten, wenn u. a. die Wände in einer unzureichenden Qualität verputzt sind oder Elektrokabel frei liegen.

Diese vorausgegangenen Überlegungen bieten für die Darstellung eines realitätsnahen BIM-Gebäudemodells, zur gutachterlichen Rekonstruktion von Ausbauarbeiten, wichtige Ansätze. Einige kommerzielle BIM-Modellierungsumgebungen stellen keine rein (teil-)flächenbezogenen Modelle bereit. Daher wurden im entwickelten Simulator prototypische Überlegungen ausgearbeitet, die genau diese „Lücke" ausfüllen. Demzufolge wurde lediglich die 3D-Grafik einer kommerziellen BIM-Modellierungsumgebung genutzt, um die rein (teil-)flächenbezogenen Modelle bereitzustellen.

5.2.3 Leistungsmengen-Normierungskonzept virtueller Bauteilmodelle

Gemäß *Kapitel 3.2.3* sind Mengen zeitbestimmende Größen der *Vorgangsberechnung*. Zur Simulation einer realisierbaren Produktivität müssen die für eine glaubwürdige Bauzeitanalyse relevanten Bauteilmengen aus der Geometrie des BIM-Gebäudemodells entnommen

[1341] Zum Beispiel lässt sich ein Schacht geschossweise in Räume unterteilen. Denkbar ist auch eine Kantine, die aus einem Empfangs- und Essensbereich besteht, ohne dass ein Bauteil diese Bereiche voneinander trennt.

werden können. Eventuell bilden aber die in einem BIM-Modell verfügbaren Geometriegrößen (bzw. ***BIM-Mengen***) weder ***Soll-Mengen*** noch ***Ist-Mengen*** angemessen ab.

Von den BIM-Mengen sind die *Leistungsmengen*[1342] abzugrenzen, die zwar mit den oben genannten Soll- und Ist-Mengen übereinstimmen, sich allerdings auf die Leistungspositionen inkl. der dort angegebenen Mengeneinheiten des Einheitspreisvertrags beziehen. Die ***Soll-Leistungsmengen*** stellen einen wesentlichen Teil des vertraglich vereinbarten Leistungsversprechens zwischen dem Auftragnehmer und dem Auftraggeber dar.[1343] Vertragsrechtlich relevant sind auch die tatsächlichen ***Ist-Leistungsmengen*** für die Abrechnung (auch: *Abrechnungsmenge*).

Je nach *Abrechnungsvereinbarung*[1344] kann die Betrachtung der maßgeblichen Mengen für die Vergütung vertraglich festgelegt werden. Hinsichtlich eines Kausalitätsnachweises bestehen jedoch folgende Fragen: Welche Mengen sind maßgeblich für die baubetriebliche Kausalität? Sind die objektiv ermittelten Mengen die preisbildenden Leistungsmengen oder die aus der Geometrie von den Bauteilmodellen ableitbaren Mengen kausale Größen? Bei einem fehlenden gemeinsamen Aufmaß verdichten sich die Fragestellungen.[1345] Im Hinblick auf einen Kausalitätsnachweis bestehen damit vergleichbare Schwierigkeiten wie bei der vorkalkulatorischen Preisfortschreibung.[1346] Diese Fragestellungen sollten juristisch geklärt werden.

Es ist davon auszugehen, dass die BIM-Mengen allenfalls zur Abrechnung *nach einer Vereinbarung* geeignet sein können. Zur baubetrieblichen Bauzeitanalyse sollten sie jedoch *nicht ungeprüft* herangezogen werden, weil die virtuelle unbearbeitete Bauwerksgeometrie theoretisch von den Soll- und/oder von den Ist-Mengen und somit vom Vertragsinhalt abweichen kann. Um einen *realisierbaren Hergang* zu rekonstruieren, ist das BIM-Modell auf die maßgeblichen Mengen anzupassen. Aus diesem Grund wird weiterhin davon ausgegangen, dass nur die *objektiv ermittelten Leistungsmengen* sachlogische Angaben zu den Soll-Umständen liefern können. Entsprechend werden sie als maßgebliche Größen zur baubetrieblich *kausalen Vorgangsberechnung* zugrunde gelegt.

Im folgenden Text wird ein baubetriebliches ***Leistungsmengen-Normierungskonzept*** vorgestellt, wie ***externe Mengen*** (gemeint sind Soll- *oder* Ist-Leistungsmengen) in einem BIM-Gebäudemodell proportional abgebildet werden können. Mit dieser Maßnahme lassen sich die oben beschriebenen Ausführungsprozesse der Ausbauarbeiten unter Berücksichtigung der preisbildenden Leistungsmengen und der plausiblen Geometrie eines BIM-Gebäudemodells prüfen.[1347]

[1342] „Leistung" im Sinne einer geschuldeten Verpflichtung im Rahmen des Gegenseitigkeitsverhältnisses; abgeleitet aus § 2 Abs. 3 Nr. 3 VOB/B: „[…] Menge der Leistung […]" i. V. m. *Kapitel 4.1.1* und *Kapitel 3.1*.

[1343] Siehe *Kapitel 3.1*.

[1344] Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 18.

[1345] Zum Beispiel: OLG Köln, Urteil vom 05.07.2017 – Az. 16 U 138/15, IBRRS 2017: 2510.

[1346] Ebenfalls kritisch: *Jansen in* Beck'scher VOB-Kommentar, 2013: § 6 Abs. 3, Rdn. 1-5. Siehe auch *Kapitel 4.4.8*.

[1347] Hier handelt es sich um ein Konzept, das im Rahmen der Forschungsarbeit nicht vollständig ausgearbeitet wurde. Demzufolge besteht in diesem Themenfeld weiterer Forschungsbedarf.

Das Leistungsmengen-Normierungskonzept beruht darauf, dass sich die *externen Mengen* nicht aus den Bauteilgeometrien des BIM-Gebäudemodells ableiten lassen. Stattdessen werden sie mit der Normierung proportional auf die Bauteilmodelle projiziert. Eine Formveränderung der Bauteilmodelle findet jedoch nicht statt. Darum bleiben die geometrisch ermittelbaren Mengen aus dem BIM-Gebäudemodell unverändert erhalten. Bei der Durchführung des Leistungsmengen-Normierungskonzepts ist zwischen den verschiedenen Leistungspositionen zu differenzieren, die mit den Bauteilmodellen assoziiert sind. Mit Blick auf die Leistungsbeschreibungen können unterschiedliche Arbeitsaufgaben je Bauteilmodell definiert worden sein (bspw. Putz- oder Malerarbeiten bezüglich einer Wandoberfläche).[1348] Demzufolge ist es möglich, dass mehrere Soll- sowie Ist-Mengen pro Bauteilmodell vorliegen. Im Rahmen des Leistungsmengen-Normierungskonzepts müssen für jede externe Menge ***Verteilungsfaktoren*** f_{VF} bestimmt werden. Mit diesen lassen sich ***Proportionalitätsfaktoren*** f_{Ext} in Abhängigkeit von der jeweiligen Arbeitsaufgabe bilden.

Während mit einem *Verteilungsfaktor* eine Leistungsmenge auf die Bauteilmodelle aufgeteilt wird, dient der *Proportionalitätsfaktor* zur (theoretischen) Bauteilskalierung, die dazu beiträgt, dass sich ein Umfang proportional seiner Fläche angleicht. Diese Herangehensweise gewährt eine verhältnismäßige Betrachtung, falls eine baubetriebliche Untersuchung die Zerlegung eines Ausführungsprozesses in seine Teilprozesse erfordert.

Abbildung 5-6 verdeutlicht hierzu ein Beispiel. Sie enthält eine Draufsicht auf die drei Räume *R1*, *R2* und *R3* für die Bauleistung „*Laminatboden verlegen*“. In der linken Darstellung sind die Grundrisse von den drei Räumen aus dem BIM-Gebäudemodell abgebildet. Rechts daneben ist die Skizze von denselben Raum-Geometrien mit *externen Soll-Mengen* zu sehen, die nach einer verhältnismäßigen Anpassung infolge des Leistungsmengen-Normierungskonzepts *skaliert* wurden.

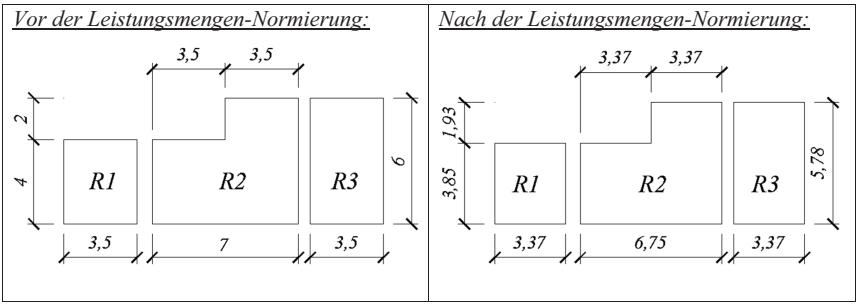


Abbildung 5-6: Beispiel eines skalierten Grundrisses von einem BIM-Gebäudemodell[1349]

[1348] Eine ähnliche Vorgehensweise wird in der *VDI-Richtlinie 2552-3* beschrieben. Vgl. VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 9, 17-19.

[1349] Eigene Darstellung.

Die unterschiedlichen Darstellungsweisen kommen aufgrund unterschiedlicher Mengenangaben zwischen den *BIM-Mengen* und *externen Soll-Mengen* zustande. Als Ausgangssituation dient die linke Darstellung der *Abbildung 5-6*. Hier betragen die Bodenflächen der Räume folgende Größen:

Raum R1: $A_{R1,BIM}$ = 14 m²
Raum R2: $A_{R2,BIM}$ = 35 m²
Raum R3: $A_{R3,BIM}$ = 21 m²
Gesamt: A_{BIM} = 70 m²

Neben den Bodenflächen kann ebenso der jeweilige Umfang der Bodenflächen aus dem BIM-Gebäudemodell entnommen werden. Diese stellen sich wie folgt dar:

Raum R1: $U_{R1,BIM}$ = 15 m
Raum R2: $U_{R2,BIM}$ = 26 m
Raum R3: $U_{R3,BIM}$ = 19 m
Gesamt: U_{BIM} = 60 m

Demnach betragen die geometrischen *BIM-Mengen* aller Bodenflächenmodelle insgesamt $A_{BIM} = 70\ m^2$. Zusätzlich wird bei dem Beispiel davon ausgegangen, dass für die genannte Leistungsposition eine *externe Soll-Menge* von $A_{Ext} = 65\ m^2$ im Vertrag vorgesehen wurde. Daraus folgt, dass sich aus den beiden Mengenangaben A_{BIM} und A_{Ext} eine rechnerische „Negativmenge" von $A_{Diff} = -5\ m^2$ ermitteln lässt. Im Rahmen des Leistungsnormierungs-Konzepts wird nun diese *Negativmenge* A_{Diff} anteilig auf die drei Räume *R1*, *R2* und *R3* verteilt. Dies erfolgt im Verhältnis zu ihrer jeweiligen Bauteilgröße infolge einer rechnerischen Skalierung der Bodenflächen. Ziel ist es, die Raumflächen „gedanklich zu schrumpfen". Hierzu muss pro Raum ein *Verteilungsfaktor* $f_{VF,Ri}$ ermittelt werden, der sich folgendermaßen berechnet:

$$f_{VF,Ri} = \frac{A_{Ri,BIM}}{A_{BIM}}; \qquad \textit{für alle Ri der Räume R1, R2 und R3.}$$

Im nächsten Schritt ist die ***normierte Soll-Fläche pro Raum*** $A_{Ri,Norm}$ zu ermitteln. Dies erfordert eine Multiplikation der gesamten *externen Soll-Menge* A_{Ext} mit ihrem jeweiligen *Verteilungsfaktor*. Die normierten Bodenflächen berechnen sich folgendermaßen:

$$A_{Ri,Norm} = f_{Vf,Ri} \cdot A_{Ext} = \frac{A_{Ri,BIM} \cdot A_{Ext}}{A_{BIM}}; \qquad \textit{für alle Ri der Räume R1, R2 und R3.}$$

In *Abbildung 5-7* wird das Berechnungsprinzip des Beispiels veranschaulicht. Die normierten Bodenflächen sind dort qualitativ im BIM-Gebäudemodell durch schraffierte Flächen eingezeichnet.

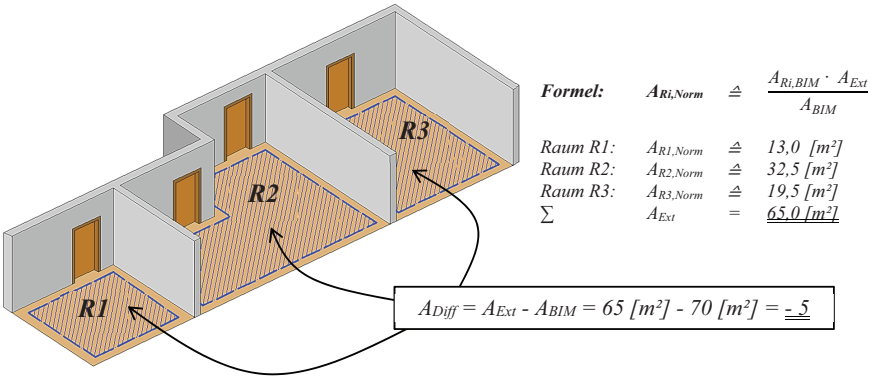


Abbildung 5-7: Beispiel für die topologische Verteilung externer Mengen[1350]

Ferner wird die komplette Bauleistung „*Laminatboden verlegen*“ (mit der Einheit [h/m²] vom Zeitaufwandswert) mit den drei Teilleistungen voneinander getrennt betrachtet:

- *TL1*: „Untergrund vorbereiten“,
- *TL2*: „Laminatboden verlegen“ und
- *TL3*: „Fußleisten montieren“.

Es kann zur Plausibilisierung des Bauablaufs erforderlich sein, dass der Zeitaufwandswert der Teilleistung *TL3* auf den *Umfang* der Bodenfläche mit einer Einheit von [h/m] anzusetzen ist. Demgegenüber werden die Teilleistungen *TL1* und *TL2* mit der Einheit [h/m²] auf die normierte *Bodenfläche* verrechnet (siehe *Abbildung 5-8*).

Das Leistungsmengen-Normierungskonzept zeichnet sich dadurch aus, dass nicht nur bestimmte Mengenwerte eines einzelnen Bauteils, sondern auch das durch die Normierung betroffene Bauteilobjekt in geometrischer Hinsicht berücksichtigt wird. Im genannten Beispiel wurde die Bodenfläche inkl. ihrer Kantenlängen skaliert. Die Skalierung des modellierten Fußbodenumfangs lässt sich für die drei Räume mithilfe eines ***Proportionalitätsfaktors*** $f_{Ext,BIM,Ri}$ erreichen.

Der Proportionalitätsfaktor ist zu ermitteln durch:

$$f_{Ext,BIM,Ri} = \sqrt{\frac{A_{Ri,BIM}}{A_{BIM}}} \;;\; \textit{für alle Ri der Räume R1, R2 und R3.}$$

Mit dem Proportionalitätsfaktor ist der ***normierte Soll-Bodenflächenumfang pro Raum*** $U_{Ri,Norm}$ auszurechnen. Dazu muss der Bodenumfang $U_{Ri,BIM}$ eines Raums des BIM-Modells mit dem entsprechenden *Proportionalitätsfaktor* multipliziert werden:

$$U_{Ri,Norm} = U_{Ri,BIM} \cdot f_{Ext,BIM,Ri} = U_{Ri,BIM} \cdot \sqrt{\frac{A_{Ri,BIM}}{A_{BIM}}} \;;\; \textit{für alle Ri der Räume R1, R2, R3.}$$

Diese Vorgehensweise führt zu einer proportionalen Verteilung externer Mengen auf Grundlage der Bauteilobjekte über die Topologie eines BIM-Gebäudemodells. Dadurch können die unterschiedlichen Teilleistungen einer Gesamtleistung anhand ihrer Leistungs-

[1350] Eigene Darstellung.

einheiten auf die jeweilig passende Geometrie abgebildet werden. Folglich lassen sich die Teilleistungen *TL1* sowie *TL2* auf die *Fläche* eines Raums und die Teilleistung *TL3* auf den *Umfang* eines Raums verteilen (siehe symbolische Pfeildarstellungen der Teilleistungen auf die normierten Bauteilmengen in *Abbildung 5-8*).

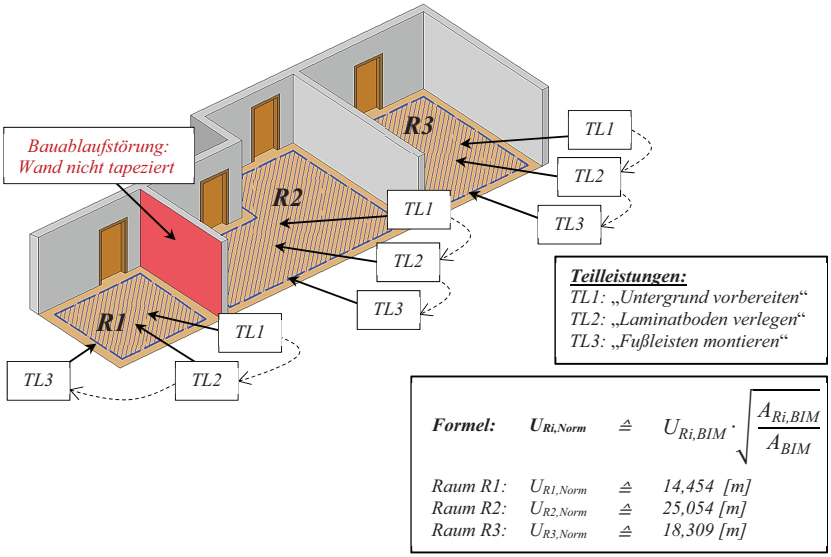


Abbildung 5-8: Beispiel für topologisch-verteilte Teilleistungen mit normierten Mengen[1351]

Damit ein Bauteil nicht unnötig viele Objektattribute aller anfallenden Arbeiten erhält, ist es sinnvoll, diesen *Skalierungsfaktor* in den jeweiligen Teilleistungen zu hinterlegen.[1352] Der geometrische Raum des BIM-Gebäudemodells bleibt jedoch für Plausibilisierungsmaßnahmen, wie etwa für Bauablaufstörungen, die sich über die Bauteilgeometrie definieren lassen, erhalten. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, ist in *Abbildung 5-8* ein entsprechender Störungssachverhalt dargestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass eine Wandoberfläche des Raums *R1* nicht tapeziert wurde, weshalb die Teilleistung *TL3* „*Fußleisten montieren*“ nicht beginnen kann. Zur geometrischen Prüfung solcher Konflikte muss die Geometrie des BIM-Gebäudemodells berücksichtigt werden. Hier ist geometrisch zu überprüfen, welche Fußleisten die nicht tapezierten Wandoberflächen berühren würden. Da die Bauwerksgeometrie beim Leistungsnormierungs-Konzept nicht verändert wird, ist eine derartige Prüfung möglich, obwohl der normierte Bodenflächenumfang nicht die Wand berührt (siehe *Abbildung 5-8*).[1353]

Insgesamt wird die Produktivität der zu untersuchenden Ausführungsprozesse durch die *externen Mengen* maßgeblich mitbestimmt. Somit übt das Leistungsmengen-

[1351] Eigene Darstellung.
[1352] Ähnlich: VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 16-19.
[1353] Es handelt sich um alphanumerische Werte, die als Objektattribute in den Teilleistungen gespeichert werden.

Normierungskonzept einen Einfluss auf die zu vergütenden Zeitanteile aus. Nach Auffassung des Verfassers ist das Normierungskonzept zulässig, da auch von der VOB/C Regelungen zur Übermessung von Bauteilöffnungen vorgegeben werden können, die sich als vertragsabhängige Abstraktionen[1354] der Bauwerksgeometrien verstehen lassen. Es ist zu hinterfragen, ob eine Normierung überhaupt erforderlich ist, denn es könnte ein Angebot auf der Grundlage eines BIM-Gebäudemodells erstellt und abgerechnet worden sein.[1355] In solchen Fällen ist es also sinnvoll zu überprüfen, ob die Teilleistung einer Arbeitsaufgabe einer bestimmten Geometrie überhaupt entspricht.

Außerdem müssen Sinn und Zweck einer Normierung hinterfragt werden, ob sich eine baubetriebliche Kausalität plausibel abbildet. Denn für einen realisierbaren Bauablauf sollten realitätsnahe Mengenanteile in den Zeitberechnungen verwendet werden. Darüber hinaus ergibt sich der Vorteil einer feingliedrigen Bildung realitätsnäherer Teilprozesse, die über die Geometrie des BIM-Gebäudemodells verteilt sind. Die genannten Aspekte eines Leistungsmengen-Normierungskonzepts am BIM-Gebäudemodell liefern einen Vorschlag, der juristisch geklärt werden sollte.

Insgesamt ist bei der Vorgehensweise des Leistungsmengen-Normierungskonzepts zu berücksichtigen, welche Bauteile ggf. zu einer Mengenmehrung oder -minderung gem. § 2 Abs. 3 VOB/B im Einzelnen beigetragen haben. Ebenso ist bei der Verteilung darauf zu achten, ob eine Leistungsmodifikation i. S. v. § 2 Abs. 5, 6 VOB/B oder eine Nebenleistung etc. eingearbeitet werden muss.

Unter Umständen stellt sich das Leistungsmengen-Normierungskonzept arbeitsintensiv dar, jedoch können dadurch externe Mengen verteilt werden. Definitiv befinden sich die Mengenunterschiede beim gezeigten Beispiel im Nachkommastellenbereich und übertreffen damit möglicherweise die Plausibilitätsanforderungen eines baubetrieblichen Kausalitätsnachweises. Demzufolge wäre eine Hinterfragung des Mehrwerts vom Leistungsmengen-Normierungskonzept durchaus berechtigt, bei dem der erforderliche Aufwand gegenüber dem Nutzen ggf. nicht gerecht werden würde. Die Abrede einer höheren Plausibilität sollte aber kein triftiges Gegenargument darstellen. Des Weiteren ließe sich der hohe Arbeitsaufwand durch eine intuitive Usability (z. B. Modellierung mit einer Sprachsteuerung oder der Gebrauch von Prozessvorlagen) sowie mit numerischen Berechnungsalgorithmen (z. B. Text- und Bilderkennungssoftware, künstliche Intelligenz usw.) reduzieren.

Die entscheidende Absicht der Normierung liegt darin, dass durch die topologische und ggf. feingliedrige Verteilung von Teilprozessen eine geeignete Voraussetzung für eine realitätsnahe Simulation auf Basis vertragsrechtlicher Soll- und Ist-Mengen vorbereitet wird. Über die Teilprozesse werden Arbeitsaufgaben definiert, die durch den Einsatz der Agenten „abgearbeitet" werden können. Zudem trägt die Normierung dazu bei, dass sich die Agenten einerseits in der realitätsnahen 3D-Umwelt eines BIM-Modells zu den Arbeitsaufgaben hinbewegen und andererseits gleichermaßen die vertragsrechtlichen Mengensätze

[1354] Die von der VOB/C vorgegebenen Übermessungsregeln stellen vertragsrechtliche Bestandteile dar und haben somit einen besonderen Stellenwert, der durch die Leistungsmengennormierung nicht aufgehoben werden darf.

[1355] Vgl. Bauch/Bargstädt, 2017: S. 473. Auch die *VDI-Richtlinie 2552-3* weist darauf hin, dass grundsätzlich „[…] *vor Projektausführung die datenmodellbasierte Abrechnungsgrundlage zu definieren und von den Vertragsparteien zu akzeptieren* [ist]." VDI-2552, Blatt 3, 2018: S. 21. Wenn eine Abrechnung über das BIM-Gebäudemodell erfolgen soll, ist zu prüfen, ob das Modell die relevanten Mengen abbildet.

berücksichtigen. Im weiteren Text wird auf die digitale Arbeitsweise mit der Simulation eingegangen und eine Userstory vorgestellt.

5.2.4 Erläuterung der digitalen Arbeitsweise mithilfe einer Userstory

Eine Userstory ist eine konzeptionelle Erläuterung oder Darstellung darüber, wie ein Anwender mit einem Softwaresystem arbeiten soll. Die Funktionalität eines Softwaresystems wird durch eine „Geschichte" dargestellt. Die Erklärungen können durch aufschlussreiche Sätze oder durch schemenhafte Skizzen erfolgen. Damit die Funktionalität verständlich wird, braucht nicht auf eine Prozessmodellierungssprache zurückgegriffen zu werden. Der folgende Text zeigt ein Szenario auf, das in *acht* Schritten erklärt wird.

1) Einteilung des BIM-Gebäudemodells durch ein Wegenetz mit frei wählbaren Arbeitsbereichen:

Die folgende 2D-Skizze stellt eine Draufsicht auf das Gebäudemodell dar. In den *Arbeitsbereichen* werden die Ausführungsprozesse der Bauleistungen definiert. Sie sind, je nach Beobachtung und Bewertung, durch den Anwender frei wählbar.

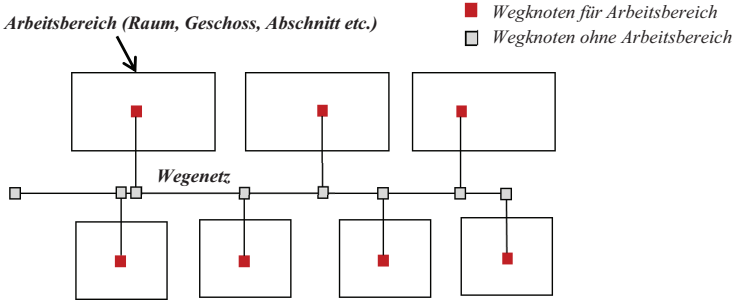


Abbildung 5-9: 2D-Skizze zur Darstellung der Arbeitsbereiche im Wegenetz[1356]

Die Arbeitsbereiche werden durch ein *Wegenetz* miteinander verbunden, wobei sich die einzelnen *Wegstrecken* jeweils zwischen zwei *Wegknoten* befinden. Alle Wegknoten können als Arbeitsbereich – rot dargestellt – erweitert werden. Dazu muss der Anwender ihnen Ausführungsprozesse zuweisen.

[1356] Eigene Darstellung.

In einer 3D-Grafik bildet sich das Wegenetz innerhalb des BIM-Gebäudemodells folgendermaßen ab:

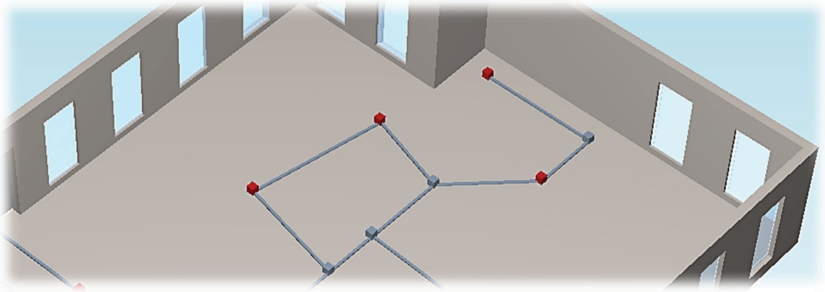


Abbildung 5-10: Ausschnitt des Wegenetzes innerhalb eines 3D-Gebäudemodells[1357]

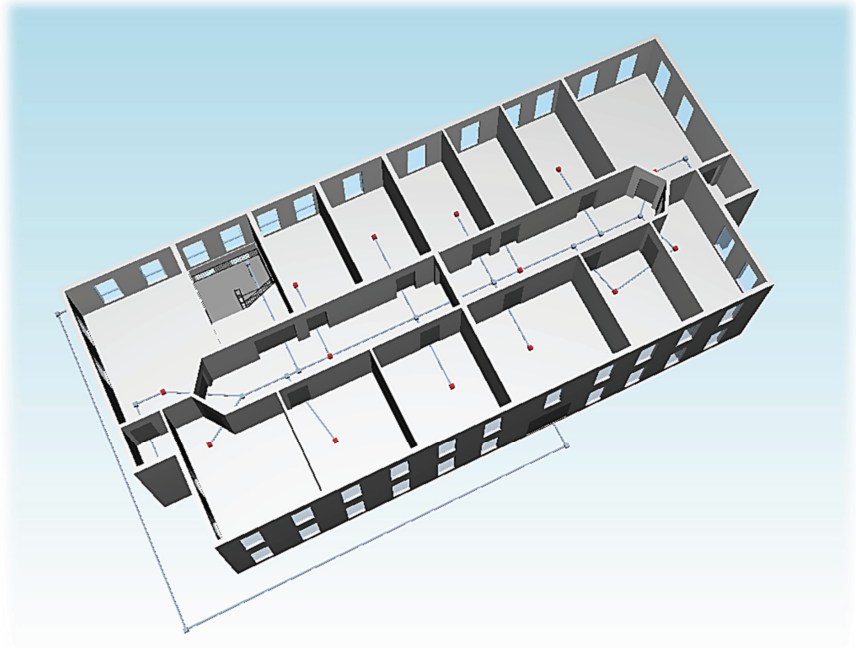


Abbildung 5-11: Perspektive zur Darstellung des Wegenetzes in einem 3D-Gebäudemodell[1358]

[1357] Eigene Darstellung. Ausschnitt des entwickelten Prototyps.
[1358] Eigene Darstellung. Ausschnitt des entwickelten Prototyps.

2) Zuweisung der Mengen und Prozessinformationen pro Arbeitsbereich:

Für jeden Arbeitsbereich werden die erforderlichen Arbeitsaufgaben durch die Verknüpfung zwischen Ausführungsprozessen und den im BIM-Gebäudemodell enthaltenen Mengenangaben definiert.

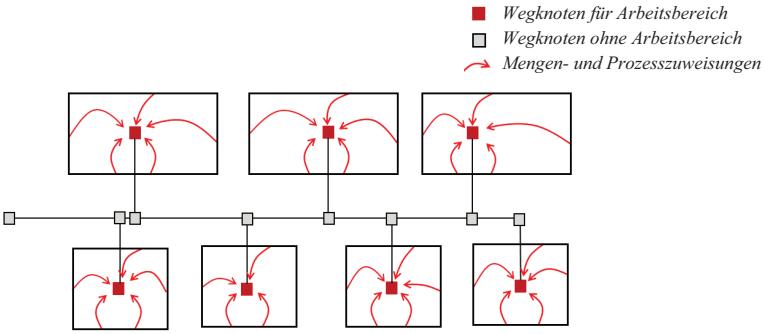


Abbildung 5-12: Versinnbildlichung der Mengen- und Prozesszuweisungen je Arbeitsbereich[1359]

Der Detaillierungsgrad der Ausführungsprozesse kann durch den Anwender frei bestimmt werden, siehe hierzu folgende 3D-Grafik:

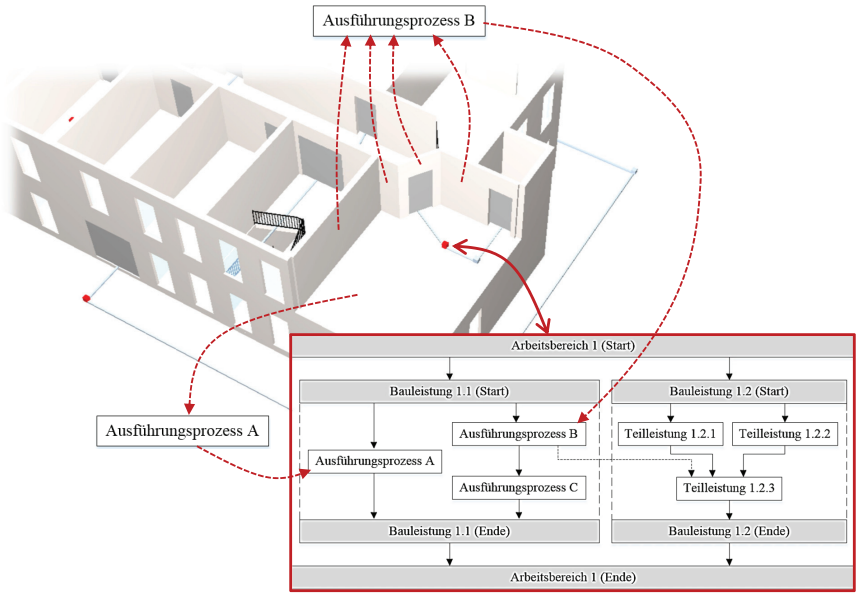


Abbildung 5-13: Mengen- und Prozesszuweisungen im BIM-Gebäudemodell[1360]

[1359] Eigene Darstellung.
[1360] Eigene Darstellung. Ausschnitt des entwickelten Prototyps.

In der *Abbildung 5-13* wird ein Arbeitsbereich durch einen roten Wegknoten für einen Raum dargestellt. Diesem Arbeitsbereich wurden frei definierte Ausführungsprozesse sowie Teilleistungen zugewiesen. Unten rechts in der Abbildung ist ein Kästchen enthalten, in dem die Ablaufstruktur für diesen Arbeitsbereich durch den Anwender erstellt wurde. Sie gliedert sich in die „Bauleistung 1.1“ und die „Bauleistung 1.2“. In der „Bauleistung 1.1“ sind direkte Ausführungsprozesse hinterlegt, während die „Bauleistung 1.2“ Teilleistungen enthält, die ggf. in weitere Ausführungsprozesse gegliedert werden können (aus Übersichtsgründen ist dies nicht in dieser Abbildung dargestellt). Zudem sind darin die Mengenzuweisungen für den „Ausführungsprozess A“ sowie den „Ausführungsprozess B“ enthalten (hervorgehoben durch gestrichelte Pfeile). Während der „Ausführungsprozess A“ die Fußbodenoberfläche zugewiesen bekommt, erhält der „Ausführungsprozess B“ alle Wandoberflächen des Raums.

Insgesamt müssen die Bauleistungen einem Gewerk von einem Unternehmen zugeordnet werden. Es lassen sich durchaus mehrere Gewerke in einem Arbeitsbereich zusammenfassen. Darüber hinaus können Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Arbeitsbereichen, Gewerken oder Unternehmen definiert werden.

3) Zuweisung von Arbeiterkolonnen je definiertes Gewerk:

Der Anwender kann verschiedene Arbeiterkolonnen, bestehend aus frei wählbaren Arbeitskräften – als *nicht* sichtbare Agenten – bestimmen. Sie laufen über das Wegenetz die im BIM-Gebäudemodell verteilten Arbeitsbereiche ab und führen dort die anstehenden Arbeitsaufgaben aus. Dabei erledigen sie die vorgegebenen Arbeitsaufgaben für ein oder mehrere Gewerk(e) eines Unternehmens. Vom Anwender muss eine entsprechende Zuordnung vorgenommen werden. In der folgenden Abbildung sind beispielhaft zwei Arbeiterkolonnen zu sehen.

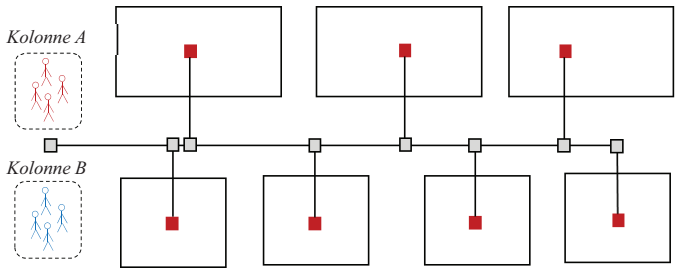


Abbildung 5-14: Definition der Agenten als Arbeitskräfte von zwei Arbeiterkolonnen[1361]

[1361] Eigene Darstellung.

4) Fertigungsrichtung der Arbeiterkolonnen A und B:

Der Anwender legt (mindestens) eine Fertigungsrichtung über beliebige Arbeitsbereiche für jede Kolonne fest (siehe *Abbildung 5-15* und *Abbildung 5-16*).

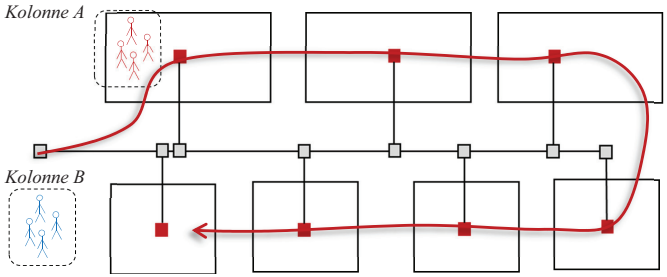


Abbildung 5-15: Beispielhafte Fertigungsrichtung der Arbeiterkolonne A[1362]

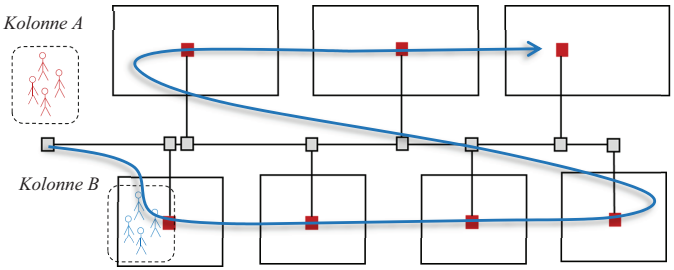


Abbildung 5-16: Beispielhafte Fertigungsrichtung der Arbeiterkolonne B[1363]

Wie die beiden Abbildungen verdeutlichen, können die Fertigungsrichtungen für jede Kolonne unterschiedlich sein. Möglicherweise behindern sie sich gegenseitig, so dass sie ggf. einander ausweichen müssen. Um dies zu veranschaulichen, werden beide Fertigungsrichtungen in *Abbildung 5-17* überlagert.

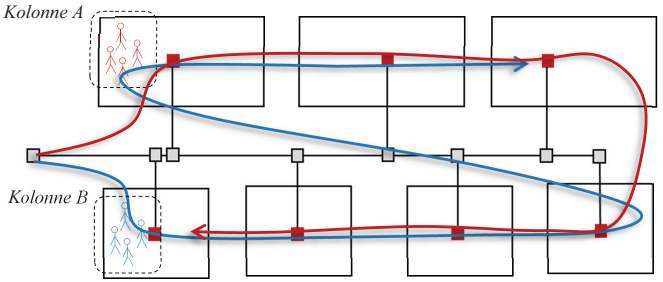


Abbildung 5-17: Überlagerung zweier Fertigungsrichtungen von zwei Arbeiterkolonnen[1364]

[1362] Eigene Darstellung.
[1363] Eigene Darstellung.
[1364] Eigene Darstellung.

Sind alle Arbeitsbereiche, Unternehmen, Gewerke, Arbeitsaufgaben, Kolonnen und deren Fertigungsrichtungen in das System eingegeben, kann die Simulation starten. Während eines Simulationslaufs verfolgen die Arbeiterkolonnen ihre jeweiligen Fertigungsrichtungen eigenständig. Das heißt, sie regeln sich selbst, bis alle in den Arbeitsbereichen vorgegebenen Arbeitsaufgaben erledigt sind.

5) Aufteilung der Arbeiterkolonnen in Abhängigkeit von den vordefinierten Ausführungsprozessen:

Der Anwender kann eine erforderliche Mindest- und Höchstanzahl von Arbeitskräften pro Ausführungsprozess definieren. Im Verlauf der Simulation orientieren sich daran die Agenten. Sollte die Kolonnenanzahl für einen Arbeitsbereich zu hoch oder zu niedrig sein, teilt sie sich während des Simulationslaufs auf (siehe *Abbildung 5-18*). Dabei bleibt der maximal zulässige Anteil der Arbeiter im ersten Arbeitsbereich zurück. Der restliche Teil verfolgt die von der Kolonne vorgegebene Fertigungsrichtung.

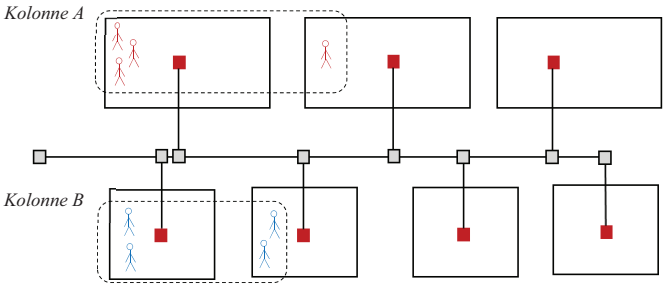


Abbildung 5-18: Aufteilung der Arbeiterkolonnen[1365]

Diese Aufteilung kann theoretisch so lange stattfinden, bis alle Arbeitskräfte verteilt sind. Arbeitskräfte, die nicht arbeiten können, verweilen in einem unproduktiven Zustand, bis ein Arbeitsbereich wieder zugänglich ist oder die Simulation beendet wird. In der folgenden Abbildung wird dargestellt, wie sich die vier Arbeitskräfte der „Kolonne A“ in zwei Arbeitsbereiche aufteilen. Auch in der „Kolonne B“ findet eine entsprechende Aufteilung statt. Die verbleibenden Arbeitskräfte verfolgen die vordefinierte Fertigungsrichtung.

[1365] Eigene Darstellung.

6) Modifizierung der simulierten Bauabläufe durch die Einarbeitung von Störungssachverhalten:

Bezogen auf die sich selbst regelnden Kolonnen kann der Anwender steuernd eingreifen, indem er die Umweltbedingungen der Kolonnen „nadelstichartig“ ändert. Durch sein Eingreifen wird, je nach momentaner Situation des Simulationslaufs, das Verhalten der Kolonnen bedingt.

Beispielsweise kann er gezielte Bauablaufstörungen einarbeiten. Somit ist es ihm möglich, einen Ausführungsprozess gezielt zu hemmen oder zu unterbrechen. Denkbar sind auch geometrische Konflikte oder Produktivitätsänderungen der Arbeitskräfte, die ebenfalls hemmend oder unterbrechend auf eine Arbeitsaufgabe einwirken können. Mit der folgenden *Abbildung 5-19* werden solche nadelstichartigen Modifizierungen veranschaulicht.

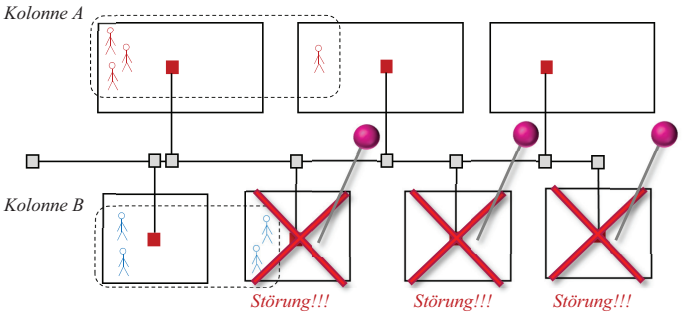
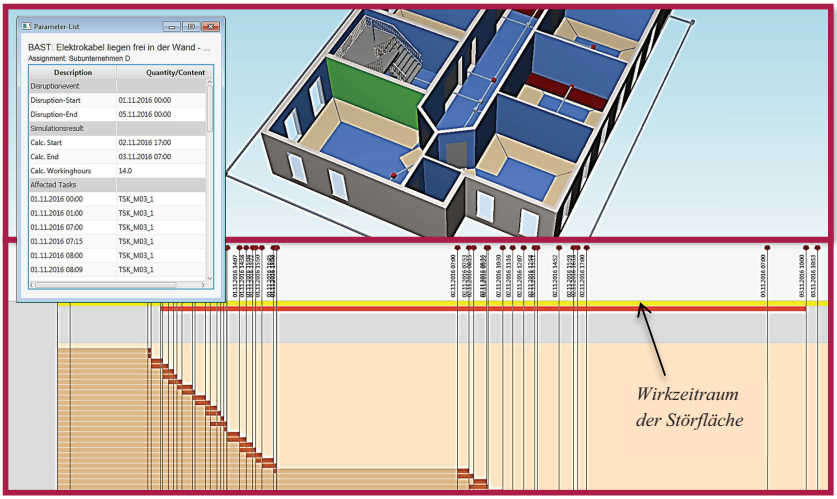


Abbildung 5-19: Nadelstichartige Einarbeitung von Bauablaufstörungen[1366]

In der entwickelten Simulationsanwendung lassen sich ***Störflächen*** definieren, die der Anwender gezielt im BIM-Gebäudemodell hinterlegen kann (siehe *Abbildung 5-20*). Es ist ihm möglich, mit zwei Terminen einen Wirkzeitraum – also eine bestimmte Zeitdauer – für die Störflächen vorzugeben.

[1366] Eigene Darstellung.

Ansicht aus dem Modellviewer



entwickelte Zeitdarstellung (= Simulationsergebnisse)

CompanyID	MileStoneIE	Start	End	Name	BlockerID
Com_B	DMS_Fli2	01.11.2016 00:00		Vorlaufzeit - Wiederaufnahme, Fliesenarbeiten	
Com_B	DMS_Fli3	01.11.2016 01:00		Rückbau und Neueinbau, Fliesenarbeiten	
Com_D	DMS_Lag	01.11.2016 08:00	03.11.2016 10:00	Lagerraum in Raum R005	Block_Lag
Com_D	DMS_EL	01.11.2016 00:00	05.11.2016 00:00	Elektrokabel liegen frei in der Wand - Raum R 03	Block_E1

Definition der Störfläche
und des Wirkzeitraums

Abbildung 5-20: Störfläche für nicht abgeschlossene Elektroarbeiten im BIM-Gebäudemodell[1367]

Je nach Situation des Simulationslaufs stören die Störflächen die Steh- oder Arbeitsflächen, die für die Ausführungsarbeiten vorgesehen sind (siehe im Text weiter hinten). Somit können z. B. die Verlegearbeiten von Bodenfliesen über einen bestimmten Zeitraum modelliert werden. Die Störfläche könnte ersatzweise einen nicht fertiggestellten Estrich abbilden. Dadurch besteht der Vorteil, dass eine vollständige Beschreibung der Ausführungsprozesse für die Estrichverlegearbeiten entfällt. Auch eine nicht fertig tapezierte Wand ließe sich derartig modellieren.

Darüber hinaus können Störflächen die Wegstrecken vom Wegenetz blockieren. Zum Beispiel bietet sich eine derartige Störfläche für die Modellierung eines versiegelten Fußbodenbelags an, bei dem ein Zutritt nicht möglich ist. Denkbar ist auch die Modellierung fehlender Übergangsschienen des Fußbodens.

[1367] Eigene Darstellung. Ausschnitt des entwickelten Prototyps.

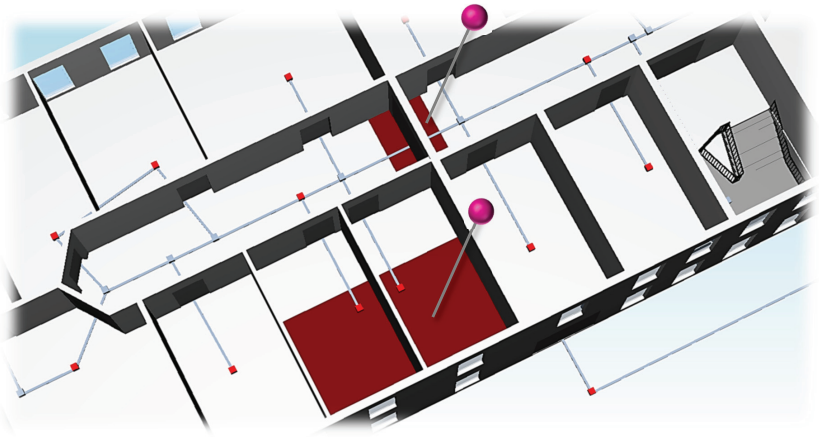


Abbildung 5-21: Nadelstichartige Einarbeitung von Bauablaufstörungen im BIM-Gebäudemodell[1368]

Zwar lässt sich damit eine Arbeitsaufgabe unterbrechen, allerdings ist es fraglich, inwieweit ein Wegenetz gestört werden kann. Dafür besteht im Rahmen der Simulationsanwendung eine Ausnahmeregelung, bei der der Anwender bestimmt, welche Kolonne diese Störfläche betreten darf. Eine derartige Kolonne wird im Rahmen der Simulation als ***Lucky-Band*** bezeichnet.

7) Ausweichverhalten der simulierten Arbeitskräfte im Verlauf der Ausführungsprozesse:

Nicht nur die vom Anwender eingegebenen Bauablaufstörungen können das Weiterarbeiten verhindern, sondern auch parallel arbeitende Kolonnen. Deshalb ist zu prüfen, ob die für die Ausführung der Arbeitsaufgabe notwendigen *Arbeits-* oder *Stehflächen* durch andere Arbeitskräfte *belegt* sind. Sobald die Agenten eine Arbeitsaufgabe an einer Arbeitsfläche ausführen, nehmen sie eine Stehfläche in Anspruch. Beide Flächen sind somit blockiert, außer es findet ein Aushärte- oder Trocknungsprozess statt, dann ist die Stehfläche frei, die Arbeitsfläche aber *blockiert*.

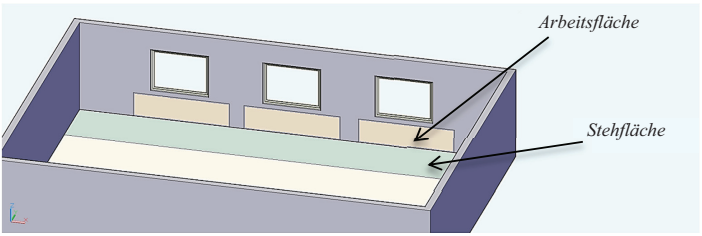


Abbildung 5-22: Schematische Darstellung einer Steh- und Arbeitsfläche[1369]

In der Simulationsanwendung kann der Anwender unterschiedlich viele Arbeits- und Stehflächen für einen Ausführungsprozess definieren. Grundsätzlich kann eine Stehfläche gleichzeitig eine Arbeitsfläche sein. Insgesamt wird entweder eine Stehfläche extra definiert

[1368] Eigene Darstellung. Ausschnitt des entwickelten Prototyps.
[1369] Eigene Darstellung.

oder die Bodenfläche eines Raums als Stehfläche genutzt (siehe linke und rechte Darstellung in *Abbildung 5-23*).

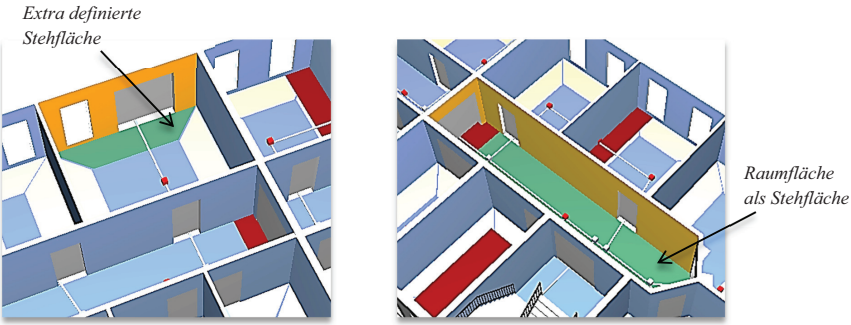


Abbildung 5-23: Ausschnitte aus dem BIM-Gebäudemodell der Steh- und Arbeitsflächen[1370]

Falls der Zugang zu einem Arbeitsbereich verhindert oder eine bereits ausgeführte Arbeitsaufgabe unterbrochen wird, kann eine Arbeiterkolonne die vorgesehene Fertigungsrichtung nicht wie geplant weiter ausführen. In der Skizze müssen die zwei Arbeitskräfte der „Kolonne B" den gestörten Arbeitsbereich verlassen und ihre Arbeit an einer anderen Stelle fortsetzen. Siehe folgende *Abbildung 5-24*:

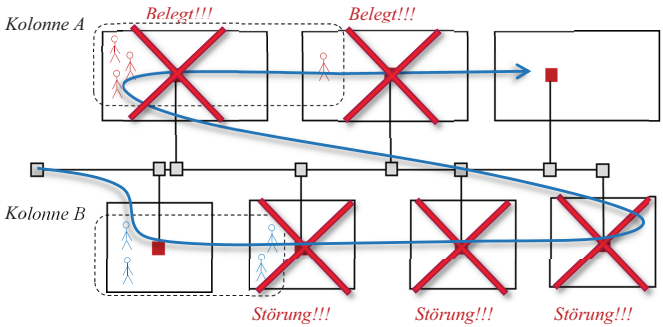


Abbildung 5-24: Geometrischer Konflikt – belegte Steh- und Arbeitsflächen durch Kolonne A[1371]

Sind Arbeitsbereiche durch andere Arbeitskräfte belegt, sieht die Simulation zwei Möglichkeiten vor: Einerseits können die freien Arbeitskräfte zu einem durch andere Arbeitskräfte belegten Arbeitsbereich hinzukommen und sich gegenseitig oder einseitig in ihrer Produktivität um einen bestimmten Faktor hemmen.[1372] Andererseits kann der Arbeitsbereich durch die freien Arbeitskräfte nicht erreicht werden. Möglicherweise müssen sie, im Zuge ihrer Selbstregelung, mehrere Arbeitsbereiche im Verlauf der Fertigungsrichtung überspringen, um ihre Arbeitsaufgaben fortführen zu können.

[1370] Eigene Darstellungen. Ausschnitte des entwickelten Prototyps.
[1371] Eigene Darstellung.
[1372] Siehe *Kapitel 5.2*.

In *Abbildung 5-25* weichen die beiden Arbeitskräfte der „Kolonne B“ in den oberen rechten, freien Arbeitsbereich aus.

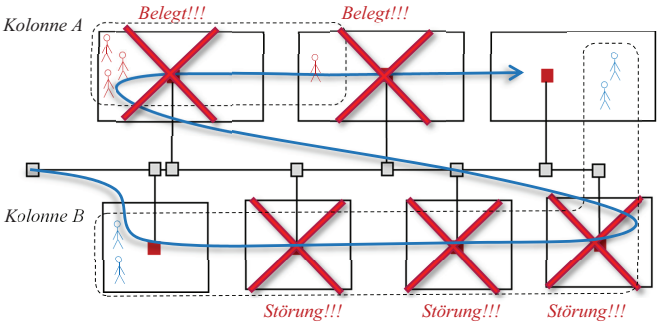


Abbildung 5-25: Geometrischer Konflikt – Ausweichverhalten der Arbeitskräfte aus Kolonne B[1373]

8) Experimentelle Eingriffsmöglichkeiten durch den Anwender:

Sollte ein modellierter Verlauf nicht zufriedenstellend sein, kann er korrigiert werden. Dazu lässt sich die Simulationszeit *anhalten* und wie bei einer *Digital Audio Workstation*[1374] mithilfe einer *Timeline* zu einem frei wählbaren Termin *zurückspulen*. Entsprechend kann der Anwender modifizierende Eingaben, z. B. Änderungen der momentanen Baustellensituation, tätigen. Beispielsweise lässt sich eine bestimmte Arbeitskraft *termingemäß* herausnehmen. Durch die Herausnahme entsteht eine andere Baustellensituation, die ggf. ein anderes Weiterarbeiten nach sich zieht.

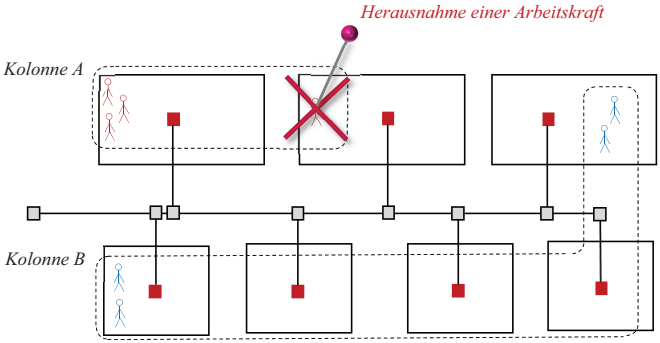


Abbildung 5-26: Gezielte Entnahme einer bestimmten Arbeitskraft aus Kolonne A[1375]

[1373] Eigene Darstellung.
[1374] Siehe *Kapitel 5.1.2*.
[1375] Eigene Darstellung.

Nachdem eine zurückgespulte Simulation neu gestartet wird, berücksichtigt sie die korrigierten Maßnahmen – z. B. die Herausnahme einer Arbeitskraft. Die alten Simulationsergebnisse bleiben erhalten. Dadurch kann die Simulation ab dem zurückgespulten Zeitpunkt unter den neuen modellierten Baustellensituationen starten und neue Simulationsergebnisse erzielen. Daher würden die in der *Abbildung 5-27* dargestellten zwei Arbeitskräfte der „Kolonne B" aufgrund ihrer Fertigungsrichtung im zuvor belegten Raum, der nun frei ist, mit ihren Arbeitsaufgaben beginnen, unter der Voraussetzung, dass alle ihre Arbeitsaufgaben in den Arbeitsbereichen zum Zeitpunkt der Entnahme der Arbeitskraft noch nicht begonnen wurden.

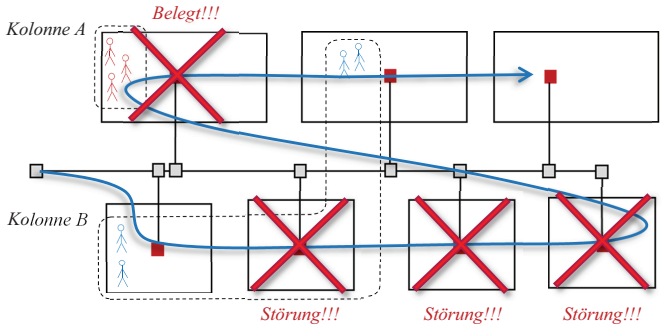


Abbildung 5-27: Aufrücken der Arbeitskräfte aus Kolonne B nach Entnahme der Arbeitskraft[1376]

Grundsätzlich würde der Simulator bereits angefangene Ausführungsprozesse zu Ende führen, bevor ein Wechsel in einen freien Arbeitsbereich stattfindet. Dies hängt u. a. davon ab, wie weit der Anwender die Simulationszeit zurückspult. Falls es ihm zweckmäßig erscheint, kann er Modifikationen vornehmen, die dazu führen, dass bereits angefangene Arbeiten bis zu einem bestimmten Termin ruhen. Letztendlich liegen die modifizierenden Eingriffe in der Auffassungsgabe und dem Ermessen des Anwenders. Die Simulation kann „nur" reagieren.

5.2.5 Konfliktarten

Franz betont, dass Konflikte „[...] *ein typisches Merkmal realer Prozeßabläufe* [sind] *und das Erkennen von Konfliktsituationen eine wichtige Aufgabe der Systemanalyse* [ist]."[1377] Zudem resultieren Konflikte hauptsächlich aus „[…] *Mangelsituationen oder Ressourcenknappheiten, wie bei einer Konkurrenz um Werkzeuge, Maschinen, Baustoffe, Lagerflächen, Kapital usw.*"[1378] Beispielsweise können Konflikte bei Stehflächen und/oder Arbeitsgegenständen im Raum- und Zeitgefüge einer Baustelle bei parallel durchgeführten Arbeitsaufgaben stattfinden.[1379] Insbesondere entstehen Konflikte dadurch, dass vorausgegangene, nicht fertiggestellte Produktionsprozesse den Arbeitsablauf der darauf folgenden Ausbauarbeiten beeinträchtigen bzw. ***blockieren***. Auch die situativ bedingte Nichtverfügbarkeit von Kapazitäten auf einer Baustelle lässt sich als Konflikt bezeichnen.[1380]

[1376] Eigene Darstellung.
[1377] Franz, 1989: S. 81.
[1378] Franz, 1989: S. 13.
[1379] Zum Beispiel: Mirzaei/Nasirzadeh/Parchami Jalal/Zamani, 2018: S. 1-14; Akinci/Fischen/Levitt/Carlson, 2002: S. 124-134; Voigtmann, 2014: S. 61; Dang, 2014: S. 40-43, 80 ff.
[1380] Zum Beispiel: Ibbs/Liu, 2005: S. 12 ff.; Samkari, 2014: S. 63.

Demnach wird in dieser Forschungsarbeit unter einem ***Konflikt*** eine Situation der Simulation verstanden, bei der eine oder mehrere Ressourcen in einem momentanen Augenblick für eine bestimmte Arbeitsaufgabe nicht einsatzfähig oder verfügbar sind, da sie entweder nicht vorhanden sind oder während der Ausführung eines anderen Produktionsprozesses genutzt bzw. blockiert werden. Unter einem Konflikt lassen sich zudem bewusste oder unerwartete Bauablaufbedingungen während der Simulationsläufe verstehen, die den Anwender dazu verleiten können, das Modellverhalten zu überprüfen. Entsprechend wird ein Konflikt als virtuelle Ursache für die Störung eines Modellverhaltens definiert. Für die entwickelte Bauzeitanalyse findet eine Unterscheidung in drei verschiedene Konfliktarten statt:

- ***terminabhängiger Konflikt:*** Terminabhängige Konflikte zielen auf die verfügbare Zeit als Ressourcen ab. Ein klassischer terminabhängiger Konflikt ist ein verspäteter Termin, wie etwa ein verschobener Anfangstermin oder eine verspätete Planlieferung. Neben termindiskreten Zeitpunkten ist die Modellierung eines Zeitraums möglich. So kann ein über die Bauzeit definierter Stillstand – ähnlich wie ein Vorgangsbalken in der Netzplantechnik – als terminabhängiger Konflikt für eine bestimmte Dauer definiert werden.

- ***geometrieabhängiger Konflikt:*** Geometrische Konflikte lassen sich insbesondere mit den geometrischen Produktionsbedingungen des Gebäudemodells in Verbindung bringen. Die klassischen geometrischen Konflikte ergeben sich infolge der Bauwerkserstellung. Dazu gehört das produktionsbedingte Blockieren von Zugangswegen, Stehflächen und/oder Arbeitsgegenständen im dreidimensionalen Raum.

- ***prozessabhängiger Konflikt:*** Prozessabhängige Konflikte stellen sich über die modellierten Prozesse und deren Abhängigkeiten zueinander ein, etwa wenn für die Prozesse Arbeitskräfte und/oder Material vorgesehen wurden, die im Verlauf des Bauablaufs situativ bedingt nicht verfügbar sind. Prozessbezogene Wartezeiten, wie z. B. Aushärte- oder Trocknungszeiten, bei denen keine Kapazitäten eingesetzt werden, zählen ebenfalls – sobald sie ein Weiterarbeiten verhindern – zu den prozessabhängigen Konflikten.

Mit dem entwickelten Simulationsansatz können die zuvor genannten Konfliktarten miteinander kombiniert werden, so dass mehrere Varianten zur Modellierung von Bauablaufstörungen möglich sind.

5.2.6 Faktorielle Gewichtungen zur Produktivitätsmodifizierung

Von den in *Kapitel 5.2.5* genannten Konflikten sind ***faktorielle Gewichtungen*** simulierter Produktionsprozesse abzugrenzen. Sie dienen zur Modellierung von Produktivitätsverlusten oder -beschleunigungen bzw. Modifizierungen *bestehender* Ausführungsprozesse.

Die faktoriellen Gewichtungen lassen sich je nach Untersuchungszweck nutzen, um bekannte Konfliktsituationen im Simulationsmodell gezielt herbeizuführen oder zu umgehen.

In den Simulationsberechnungen beaufschlagen sie prozessbezogene Zeitaufwandswerte modellierter Ausbauarbeiten und erzeugen einen ***gewichteten Zeitaufwandswert*** Aw_{mod} (siehe Formel unten). Der gewichtete Zeitaufwandswert dient als Bewertungsgröße der vorgangsbezogenen Produktivität. Er setzt sich aus dem ursprünglich vorgesehenen Zeitaufwandswert zusammen und wird mit den Werten verschiedener *faktorieller*

Gewichtungsvariablen multipliziert. Im Kollektiv verändern die faktoriellen Gewichtungen die Höhe prozessmäßiger Zeitaufwandswerte. Sie geben Aufschluss über die *erforderlichen Prozessintensitäten*, um eine bestimmte Produktivität zu erreichen. Hierdurch lässt sich das „natürliche Schwanken" der Produktionsgeschwindigkeiten baubetrieblich modellieren und prüfen.

Den faktoriellen Gewichtungen ist hinsichtlich der Soll-zu-Ist-Modifikation eine große Bedeutung beizumessen. Denn über sie erfolgt das in *Kapitel 4.5* beschriebene *Benchmarking* für die baubetriebliche Bewertung *machbarer* Produktionsprozesse. Faktorielle Gewichtungen dienen zur Plausibilitätsprüfung simulierter Sachverhalte. Mit der folgenden Formel[1381] wird die Verrechnung der faktoriellen Gewichtungsvariablen im Rahmen des entwickelten Simulationsansatzes dargestellt.

Berechnung einer Vorgangsdauer für eine Arbeitsaufgabe (siehe Abbildung 5-28):

$$\text{Dauer je Kolonne } Ad_{Kol} = \frac{Am}{|M_{AK}|} \cdot \underbrace{(Aw \cdot w_{AK} \cdot w_{Kol} \cdot w_{Me} \cdot w_S \cdot w_{Ma} \cdot w_{pKol} \cdot w_{AB} \cdot f_{plau} \cdot \ldots)}$$

$$Ad_{Kol} = \frac{Am}{|M_{AK}|} \cdot \boldsymbol{Aw_{mod}}$$

Legende:

Ad_{Kol}	=	Arbeitsdauer der Kolonne
Aw	=	Zeitaufwandswert je Arbeiterkolonne
Aw_{mod}	=	Modifizierter Zeitaufwandswert je Arbeiterkolonne
Am	=	Ausführungsmenge aller Bauteile pro Produktionsstätte
M_{AK}	=	Anzahl der an der Arbeitsaufgabe beteiligten Arbeitskräfte
AK	=	Arbeitskraft

Legende:

w_{AK}	=	Faktorielle Gewichtungen der eingesetzten Arbeiterkolonne
w_{Kol}	=	Faktorielle Gewichtung der Kolonne
w_{Me}	=	Faktorielle Gewichtung(en) der Bauteilmenge(n)
w_S	=	Faktorielle Gewichtung(en) der Stehfläche(n)
w_{Ma}	=	Faktorielle Gewichtung(en) des zu verbauenden Materials
w_{pKol}	=	Faktorielle Gewichtung(en) parallel ausführender Arbeiterkolonnen
w_{AB}	=	Faktorielle Gewichtung des Arbeitsbereiches
…	=	Platzhalter für weitere faktorielle Gewichtungen, wie z. B. Einarbeitungseffekt, geometrisch- oder prozessbedingte Aufwandsverteilungen etc.

Anteil für die geometrischen Aufwandsverteilungen (siehe Kapitel 5.2.7):

f_{plau}	=	Aufwandsfaktor der geometrischen Aufwandsverteilung

Die simulierten Arbeitskräfte einer Kolonne können sich in Anlehnung an *Kapitel 5.2.4* aufteilen und an verschiedenen Orten die Arbeitsaufgaben parallel ausführen. Eventuell ergeben sich für einen lokalen Arbeitsbereich individuelle Produktionsgeschwindigkeiten. Sie bilden sich aus der Produktivität der dort aktiven Arbeitskräfte und den individuellen Produktionsbedingungen des Arbeitsbereichs. Zur Veranschaulichung ist in der

[1381] Die Formel ist eine Erweiterung zur Vorgangsberechnung in *Kapitel 3.2.3*.

Abbildung 5-28 eine beispielhafte Situation für Malerarbeiten zu sehen, die innerhalb eines benutzerdefinierten Arbeitsbereichs ihre Produktionsprozesse ausführen.

Die dargestellte Malerkolonne besteht aus vier Arbeitskräften, die in der Simulation durch Agenten nachgebildet werden. Laut der Abbildung ist die Kolonne in zwei Gruppen aufgeteilt. Demnach führen jeweils zwei Arbeitskräfte ihre Arbeitsaufgaben in zwei verschiedenen Arbeitsbereichen aus – erkennbar an den roten Knoten. In der Abbildung sind die oben genannten faktoriellen Gewichtungsvariablen exemplarisch für den linken Arbeitsbereich eingezeichnet. Der rechte Arbeitsbereich dient lediglich der Illustration der gesamten Kolonne und bleibt in den folgenden Beschreibungen weitestgehend unberücksichtigt. Darum sind die dort abgebildeten Arbeitskräfte in einer eher passiven Haltung zu sehen.

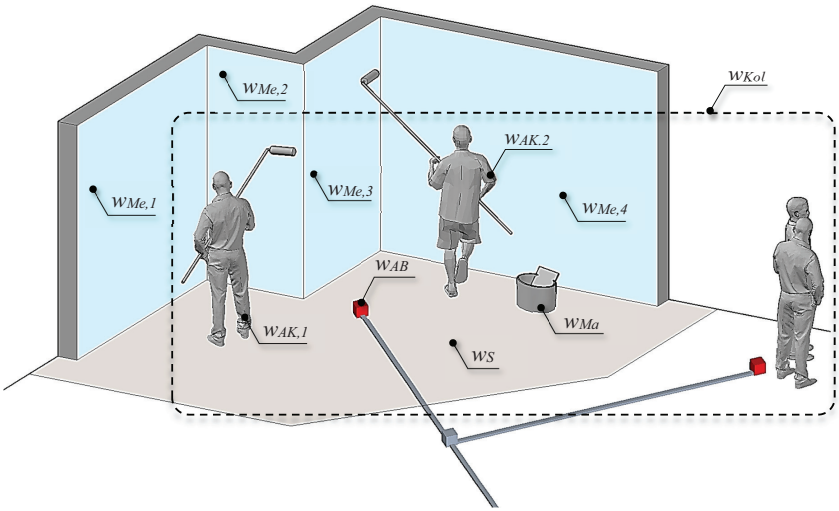


Abbildung 5-28: Illustration einer Situation während eines Simulationslaufs für Malerarbeiten[1382]

In der Abbildung ist die ***gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable*** w_S eingezeichnet, mit der sich die Gewichtung der Stehflächen eines Arbeitsbereichs vornehmen lässt. Sollte beispielsweise bekannt sein, dass die Stehflächen während der Ausführungsarbeiten als Zwischenlager benutzt werden oder stark „verschmutzt" sind, kann ein erhöhter Aufräumbedarf als Nebenleistung vorhanden sein, der sich innerhalb der Simulation mit der faktoriellen Gewichtung beaufschlagen lässt. Der entwickelte Simulationsansatz sieht vor, dass prinzipiell mehrere Stehflächen einem Arbeitsbereich zugewiesen werden können. Entsprechend umfasst die *gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable* w_S mehrere *Gewichtungsanteile* $w_{S,i}$ der definierten Stehflächen eines Arbeitsbereichs. Die gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable bildet sich durch das arithmetische Mittel der gewichteten Stehflächenanteile.

$$w_S = \frac{\sum_n (w_{s,i})}{n}; \qquad \text{für alle } i \leq n, \text{ wenn } i = \text{Zählindex für faktorielle Gewichtungsvariablen der lokalen Stehflächen } w_{S,i}$$

[1382] Eigene Darstellung. Graphische Unterstützung der vorausgegangenen Formel zur Vorgangsberechnung.

Analog dazu wird im Simulationsansatz eine *gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable* w_{Ma} für Material vorgesehen. Auch sie setzt sich aus einem arithmetischen Mittel verschiedener Gewichtungen des Materials zusammen. Die Gewichtungen dienen zur baubetrieblichen Bewertung der Verarbeitbarkeit eines bestimmten Materials. Zum Beispiel kann für eine schlecht deckende Farbe der Wert der Gewichtung erhöht werden. Andernfalls ließe sich der Wert schnell montierbarer Türzargen herabsetzen.

$$w_{Ma} = \frac{\sum_n (w_{Ma,i})}{n}; \qquad \text{für alle } i \leq n, \text{ wenn } i = \text{Zählindex für faktorielle Gewichtungsvariablen der verwendeten Materialien } w_{Ma,i}$$

Des Weiteren wird für den *lokalen Arbeitsbereich* die *faktorielle Gewichtungsvariable* w_{AB} vorgesehen. Sie definiert eine Gewichtung, die aus einem einzelnen Wert besteht. Damit kann der geometrische Aufwandszuschlag für einen gut oder schlecht zugänglichen Arbeitsbereich definiert werden. Zum Beispiel könnten Arbeitsbereiche, die sich in höheren Geschossen befinden, einen größeren Zuschlagswert erhalten. Da diese faktorielle Gewichtungsvariable aus einem einzelnen Wert besteht, liegt hierfür keine entsprechende Formel vor.

Außerdem ist der Arbeitsaufwand der Arbeitsgegenstände – hier die Wandflächen – mit einer Gewichtungsvariablen modifizierbar. Dementsprechend existiert für alle Wandflächen eines Arbeitsbereichs eine *faktorielle Gewichtungsvariable* $w_{Me,i}$. Zum Beispiel können Wände aus verschiedenen Baustoffen mit unterschiedlichen Voraussetzungen für einen Farbanstrich bestehen. Entsprechend ist der Aufwand der *faktoriellen Gewichtungen* $w_{Me,i}$ zu senken oder zu erhöhen. Bei der Definition eines Arbeitsbereichs besteht die Möglichkeit, dass mehrere Wandflächen einem Arbeitsbereich angehören. Analog zu den Stehflächen bildet sich aus allen lokalen Arbeitsgegenständen eines Arbeitsbereichs die *gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable* w_{Me}. Im Gegensatz zu den Stehflächen werden die faktoriellen Gewichtungen der Bauteilmengen durch den lokalen Mengenanteil eines Arbeitsbereichs ein weiteres Mal gewichtet. Die zweite Gewichtung bewirkt, dass die faktorielle Gewichtung kleiner Wandflächen im Rahmen der lokalen Arbeitsaufgabe geringer ausfällt als vergleichsweise bei größeren Wandflächen.

Gesamtmenge eines Arbeitsbereichs:

$$M = \sum_n (\text{Bauteilmenge}_i); \quad \text{für alle } i \leq n, \text{ wenn } i = \text{Zählindex der lokalen Bauteilmengen}$$

Lokaler Mengenfaktor des i-ten Bauteils:

$$f_{Me,i} = \frac{\text{Bauteilmenge}_i}{M}; \qquad \text{wobei:} \qquad \sum_n (f_{Me,i}) := \text{lokale Gesamtgewichtung}$$

Gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable der lokalen Mengenanteile:

$$w_{Me} = \sum_n (w_{Me,i} \cdot f_{Me,i}); \qquad \text{(Gewichtete Verteilung unter Berücksichtigung der Mengenanteile)}$$

Ferner lässt sich mit der *gesamtfaktoriellen Gewichtungsvariablen* w_{Kol} die Produktivität einer *Kolonne* definieren. In Anlehnung an *Abbildung 5-28* wären von dieser faktoriellen Gewichtung alle vier Arbeitskräfte indirekt betroffen. Zur Verdeutlichung fasst der gestrichelte Kasten alle Arbeitskräfte symbolisch als Kolonne zusammen. Auch diese

gesamtfaktorielle Gewichtungsvariable besteht aus einem einzelnen Wert, der die simulierte Produktivität aller Arbeitskräfte einer Kolonne erhält.

Neben der faktoriellen Gewichtung der Kolonne bietet der Simulationsansatz weiterhin die Möglichkeit, dass die Produktivität *einzelner Arbeitskräfte* durch eine *faktorielle Gewichtungsvariable* $w_{AK,i}$ in einem Arbeitsbereich definiert wird. Die Berechnung erfordert einen Index *i* als Zählvariable der im Arbeitsbereich tätigen Arbeitskräfte. Der *Abbildung 5-28* ist zu entnehmen, dass nur zwei der vier Arbeitskräfte in einem Arbeitsbereich die Ausbauarbeiten ausführen. Für solche Situationen wird ein arithmetisches Mittel gebildet. Daraus lässt sich die *gesamtfaktorielle Gewichtung* w_{AK} aller Arbeitskräfte für einen Vorgang in einem Arbeitsbereich ermitteln.

$$w_{AK} = \frac{\sum_n (w_{AK,i})}{n};$$

für alle $i \leq n$, wenn i = Zählindex für faktorielle Gewichtungsvariablen der für einen Arbeitsbereich tätigen Arbeitskräfte $w_{AK,i}$

Eine Gewichtung der Produktivität von Kolonnen oder Arbeitskräften könnte aus arbeitsrechtlichen Gründen kritisiert werden. Auf Baustellen sind durchaus Fach- und Leiharbeiter oder Auszubildende, Praktikanten etc. tätig. Ohne deren Leistungsfähigkeit absprechen zu wollen, kann eine Unterscheidung der arbeitskraftbezogenen Produktivitäten aus objektiven Gesichtspunkten sinnvoll sein.

In der oben dargestellten Formel wird mit der *faktoriellen Gewichtungsvariablen* w_{PKol} eine Kombination berücksichtigt, die sich einerseits aus Raum-/Zeitkonflikten und andererseits infolge einer gegenseitigen Einflussnahme unterschiedlicher Gewerkekolonnen ergibt.[1383] Bei dieser Gewichtung wird davon ausgegangen, dass Arbeitskräfte verschiedener Gewerke zeitgleich in einem Arbeitsbereich aufeinandertreffen. In dieser Konfliktsituation weichen die Arbeitskräfte allerdings *nicht* voneinander ab, sondern führen ihre Arbeitsaufgaben trotzdem unter erschwerten Bedingungen aus. Das heißt, es findet „lediglich" ein gegenseitiger Produktivitätsverlust statt, der durch die *faktorielle Gewichtung* w_{PKol} definierbar ist. Der Simulationsansatz beabsichtigt, dass sich der Wert der faktoriellen Gewichtungsvariablen vorab durch den Anwender eingeben lässt. Also sollte er vor einem Simulationsexperiment mögliche Kombinationen gedanklich durchspielen.

Laut Formel sind weitere faktorielle Gewichtungen, wie z. B. die Berücksichtigung des Einarbeitungseffekts, grundsätzlich möglich. Derartige Gewichtungen werden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit nicht sonderlich vertieft.

5.2.7 Geometrische Aufwandsverteilung

G***eometrische Aufwandsverteilungen*** sind abzugrenzen von den in *Kapitel 5.2.6* vorgestellten *faktoriellen Gewichtungen*, die hauptsächlich zur Störungsmodifizierung simulierter Bauabläufe dienen. Zwar wird mit den geometrischen Aufwandsverteilungen ein produktionstechnischer Aufwand unter dem Einsatz von ***Aufwandsfaktoren*** f_{Plau} gewichtet, allerdings ist ihr Anwendungszweck vornehmlich für Plausibilisierungsmaßnahmen vorgesehen, z. B. zur Plausibilisierung möglicher Produktivitätsverluste, mit denen plan-

[1383] Ähnliches Prinzip beschreiben *Akinci et al*., die das vorhandene und erforderliche Raumvolumen berücksichtigen. Vgl. Akinci/Fischen/Levitt/Carlson, 2002: S. 129-130.

mäßig hätte gerechnet werden können. Hingegen dienen sie *nicht* der Modifizierung außerplanmäßiger Produktivitätsverluste.

Den Ausgangspunkt zur geometrischen Aufwandsverteilung bildet zum einen das vertragsrechtliche Gegenseitigkeitsverhältnis, bei dem davon ausgegangen wird, dass das zeitliche Leistungsversprechen trotz unterschiedlicher Produktivitätsintensitäten insgesamt konstant bleibt.[1384] Zum anderen wird mit den geometrischen Aufwandsverteilungen eine baubetriebliche Sichtweise beachtet, bei der z. B. produktionsbedingte Detaillösungen, geringe oder dunkle Platzverhältnisse, schwer zugängliche Stellen, Gewerkeschnittstellen, Restarbeiten, ungerade Geometrien sowie Arbeiten „über Kopf" einen erhöhten Arbeitsaufwand bedingen.[1385] Unter Berücksichtigung vertragsrechtlicher und baubetrieblicher Aspekte wird davon ausgegangen, dass der produktionstechnische *Gesamtaufwand* einer Bauleistung trotz Gewichtung unverändert bestehen bleibt.

Die Aufwandsverteilung lässt sich über die topologisch angeordneten Bauteile des Geometriemodells und ihrer Bauteilmengen erreichen. Dafür werden die Bauteilmengen je Bauleistung durch einen zusätzlichen Aufwandsfaktor gewichtet. Die Gewichtung erfolgt anhand aller Bauteilmengen, die einer bestimmten Bauleistung zugeordnet sind. Sobald ein Aufwandsfaktor einen neuen Wert erhält, erhöhen oder reduzieren sich die Werte aller anderen Aufwandsfaktoren anteilig, um so das ursprüngliche Aufwandsniveau aufrechtzuerhalten. Die Gesamtmenge wird niemals mathematisch unter- oder überschritten. Dadurch bleiben theoretisch die Leistungsmengen unverändert bestehen. Folglich findet über die Aufwandsfaktoren eine lokale Gewichtung der Produktivität der jeweiligen Bauleistung in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie statt. In *Abbildung 5-29* wird ein Ausschnitt eines Gebäudemodells gezeigt mit exemplarisch dargestellten Bodenbelagsarbeiten.

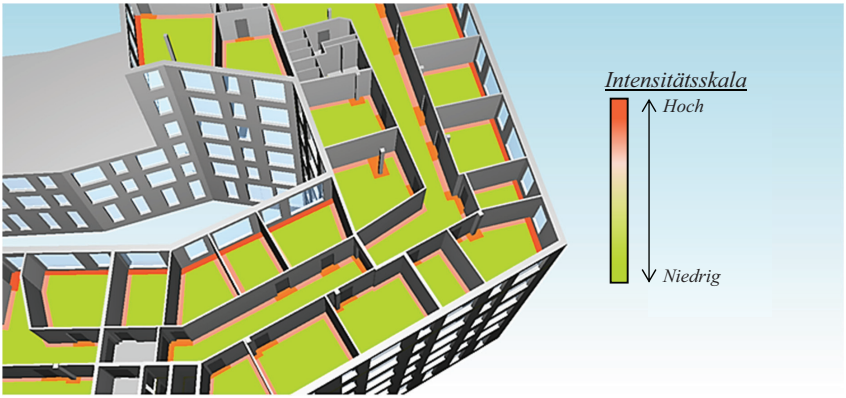


Abbildung 5-29: Ausschnitt für eine geometrische Aufwandsverteilung von Bodenbelagsarbeiten[1386]

Die in *Abbildung 5-29* dargestellten Bodenbelagsarbeiten nutzen für die geometrische Aufwandsverteilung die Bodenflächen als Bauteilmengen. Um die Heterogenität des

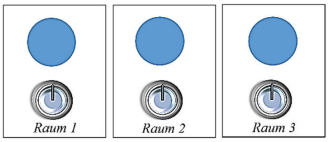
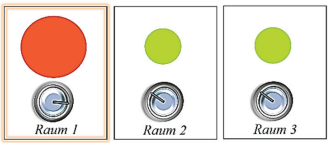
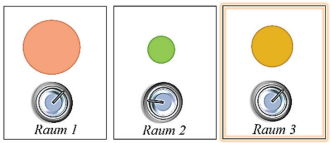
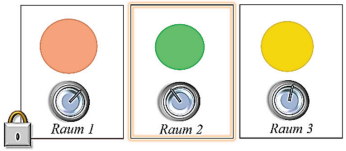
[1384] Siehe *Kapitel 3.4.2* i. V. m. *Kapitel 4.1.1*.
[1385] Siehe *Kapitel 3.4.2*.
[1386] Eigene Darstellung.

verteilten Aufwands hervorzuheben, sind die gewichteten Bauteilmengen im Gebäudemodell durch eine Farbskala gekennzeichnet. Grünliche Flächen symbolisieren einen geringen Aufwand und rötliche Flächen einen erhöhten Aufwand.

Bei der Durchführung der geometrischen Aufwandsverteilung kommt es auf die *Reihenfolge* der eingegebenen Gewichtungen an. Um Abweichungen für bereits *festgelegte* Aufwandsfaktoren zu *verhindern*, lassen sich diese für die ausgleichenden Gewichtungen *sperren*.

Die folgende Tabelle zeigt die Zusammenhänge anhand einer beispielhaften Bildreihenfolge. Hier setzt sich die Bauteilmenge aus drei hypothetisch gewählten Raummengen zusammen, die jeweils durch einen *Aufwandsfaktor* f_{Ri} gewichtet sind. Zur grafischen Visualisierung der Betragswerte von den Aufwandsfaktoren hat jeder Raum einen Kreis. Ein großer roter Kreis steht für einen erhöhten Aufwandsfaktor und ein kleiner grüner Kreis für einen geringen Aufwandsfaktor. Die Drehregler heben die „Einstellungen" der Aufwandsfaktoren hervor.

Tabelle 5-2: Clusterprinzip der geometrischen Aufwandsverteilung[1387]

Bild 1: *Alle Werte der Aufwandsfaktoren sind einheitlich gewichtet.* $Gesamtmenge = f_{R1} * M_1 + f_{R2} * M_2 + f_{R3} * M_3$ 	***Bild 2:*** *Der Wert vom Aufwandsfaktor f_{R1} aus Raum 1 wird erhöht. Gleichzeitig verringern sich die Werte der anderen beiden Aufwandsfaktoren gleichmäßig, so dass die ursprüngliche Gesamtmenge erhalten bleibt.* $Gesamtmenge = f_{R1} * M_1 + f_{R2} * M_2 + f_{R3} * M_3$ 
Bild 3: *Der Wert wird vom Aufwandsfaktor f_{R3} erhöht. Gleichzeitig verringern sich die Werte der anderen beiden Aufwandsfaktoren proportional, so dass die ursprüngliche Gesamtmenge erhalten bleibt. Aufgrund der vorausgegangenen Gewichtung sind die Aufwandsfaktoren f_{R1} und f_{R2} nicht einheitlich groß.* $Gesamtmenge = f_{R1} * M_1 + f_{R2} * M_2 + f_{R3} * M_3$ 	***Bild 4:*** *Damit alte Werte erhalten bleiben, können diese gesperrt werden. In der unteren Abbildung erhält der Raum 1 ein Schloss-Symbol. Wenn daraufhin der Wert vom Aufwandsfaktor f_{R2} erhöht wird, reduziert sich ausschließlich der Wert von f_{R3}, so dass die ursprüngliche Gesamtmenge erhalten bleibt. Der Wert von f_{R1} ändert sich aufgrund der Sperrung nicht.* $Gesamtmenge = f_{R1} * M_1 + f_{R2} * M_2 + f_{R3} * M_3$ 

Die geometrische Aufwandsverteilung wird im folgenden *Pseudocode 5-1* i. V. m. *Abbildung 5-30* vorgestellt.

[1387] Eigene Darstellungen.

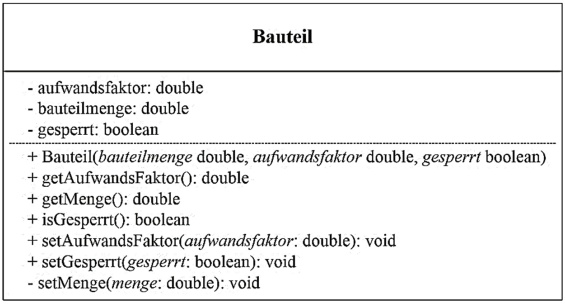


Abbildung 5-30: Klasse Bauteil zum Pseudocode 5-1[1388]

Pseudocode 5-1: Entwurf der geometrischen Aufwandsverteilung

```
0:  //Vorgehensweise zur Prüfung eines einzelnen Bauteils bauteil
1:  Erfasse alle Bauteile n von einer Bauleistung
2:  Setze Sperrung für alle Bauteile, die nicht in die Aufwandsverteilung einbezogen werden sollen

3:  //Prüfe die Eingangsgrößen und das Abbruchkriterium
4:  IF bauteil.isGesperrt() OR bauteil.getMenge() * x >= Gesamtmenge OR bauteil.getMenge() * x <= 0
5:      THEN Abbruch

6:  //Nimm Aufwandsverteilung vor und stelle die Berechnungsgrößen zusammen
7:  ELSE
8:      Erstelle Liste blist aus allen Bauteilen, die nicht gesperrt sind und ohne bauteil
9:      Erstelle HashMap<Bauteil, Double> bmap aus allen Bauteilen aus blist mit einem beliebigen Wert
10:     Erstelle Variable gesamtMengen aus allen Bauteilmengen von blist
11:     Erstelle Variable gesamtFaktorMengen aus allen Bauteilmengen multipliziert mit ihren jeweiligen
12:             Aufwandsfaktoren von blist
13:     Berechne Variable gesamtMengenInkrement = (gesamtMengen – gesamtFaktorMengen) / blist.count

14:     //Ermittle Aufwandsfaktoren der betroffenen Bauteile
15:     FOR für alle Einträge e aus bmap
16:         Entnehme Variable af = e.getkey().getAufwandsFaktor()
17:         Berechne Variable afm  = af * e.getkey().getMenge()
18:         Setze Aufwandsfaktor für jedes e.setValue(af * (afm + gesamtMengenInkrement) / afm)

19:         //Prüfe die errechneten Größen inkl. Abbruchkriterien
20:         IF e.getValue() <= 0 OR e.getValue() >= gesamtMengen
21:             THEN Abbruch
22:         ENDIF
23:     ENDFOR

24:     //Übergebe ermittelte Größen
25:     Setze bauteil.setAufwandsFaktor(x)
26:     Setze für alle Bauteile aus blist die errechneten Aufwandsfaktoren aus bmap
27: ENDELSE
```

[1388] Eigene Darstellung. *Staud* erläutert die Hintergründe von Klassen in UML-Darstellungen. Vgl. Staud, 2010: S. 21 ff.

Grundsätzlich findet immer die Berücksichtigung aller faktoriellen Gewichtungen während der komplex-dynamischen Simulationsläufe statt, so dass diese einen durchgängigen Einfluss auf die nachgebildeten Prozessintensitäten und -reihenfolgen ausüben. Hierbei sind individuelle Kombinationsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen faktoriellen Gewichtungen möglich, die der Anwender beobachten muss. Mit den Gewichtungen lassen sich die Produktivität der eingesetzten Arbeitskräfte und die lokalen Produktionsbedingungen modifizieren.

Ob diese Kombination baubetrieblich „richtig“ oder „falsch“ ist, sei dahingestellt, denn letztendlich soll mit der Gewichtung der Arbeitsaufgaben vordergründig die Produktivität einer lokalen Arbeitsaufgabe des Ausbaus bewertet und nicht geplant werden. Die Bewertung hat der Anwender anhand des gesamten modifizierten Zeitaufwandswert $Aw_{AK,mod}$ vorzunehmen.

5.2.8 Theoretische Modellierungs- und Modifizierungskonzepte

Der entwickelte Simulationsansatz umfasst sechs verschiedene ***Modifikationen*** (siehe *Abbildung 5-32*). Sie sind *grundlegende Modellierungskonzepte* und abstrakt auf Simulator-Ebene zu betrachten und *nicht* mit konkreten Modellierungswerkzeugen zu verwechseln. Modifikationen stellen elementare Bestandteile der Simulationsumgebung dar. Aus ihnen lassen sich konkrete Modellierungswerkzeuge modulartig zusammensetzen und unter Einbeziehung der entwickelten Simulator-API auf Quellcode-Ebene anwenden. Das heißt, mit Modifikationen sollen Unterprogramme erstellt bzw. programmiert werden.

Sie lassen sich in die gesamte Simulationsumgebung einbetten – vergleichbar mit modulartigen *Sequenzern* in einer *DAW*.[1389] Mit diesen Unterprogrammen sind die Modellierung *und* die nachträgliche Modifizierung beliebiger Simulationsmodelle möglich. Daher werden mit ihnen alle Soll-Leistungen und/oder -Termine sowie alle Ist-Leistungen, -Störungen und -Termine für die Soll-zu-Ist-Modifikation modelliert.

Abbildung 5-31 zeigt beispielhaft, wie durch Modifikationen (unten) die Vorgangsbalken eines Bauablaufmodells (oben) erzeugt werden. Die Modifikationen bieten hierzu unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten für die jeweiligen Vorgangsdauern – daher die verschiedenen Pfeildarstellungen. Auf die Unterschiede wird im weiteren Text näher eingegangen.

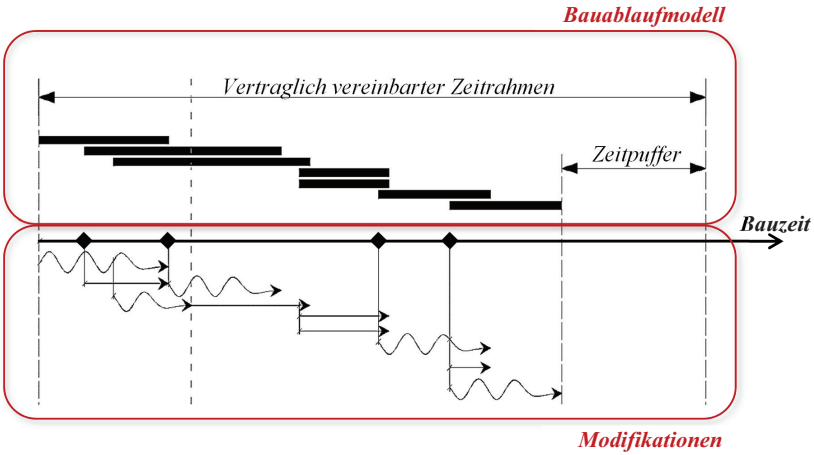


Abbildung 5-31: Gegenüberstellung der Modifikationsarten mit einem Balkenplan[1390]

Die Modifikationen sind auf eine ständig voranschreitende Simulationszeit ausgerichtet. Sie lassen sich ähnlich wie die Konfliktarten unterscheiden in

- ***zeitabhängige Modifikationen,***
- ***prozessabhängige Modifikationen*** und
- ***zeit- und prozessabhängige Modifikationen.***

[1389] Siehe *Kapitel 4.1.2*.
[1390] Eigene Darstellung.

Abbildung 5-32 illustriert die sechs Modifikationsarten, mit denen die Soll- und die Ist-Informationen in die Soll-zu-Ist-Modifikation eingebracht werden. Zu den verschiedenen Modifikationsarten werden in der Abbildung qualitative Bauablaufmodelle in Form von grauen Vorgangsbalken angedeutet. Diese Darstellung soll ausdrücken, dass sich die Modifikationen in ein bestehendes Simulationsmodell nachträglich integrieren lassen.

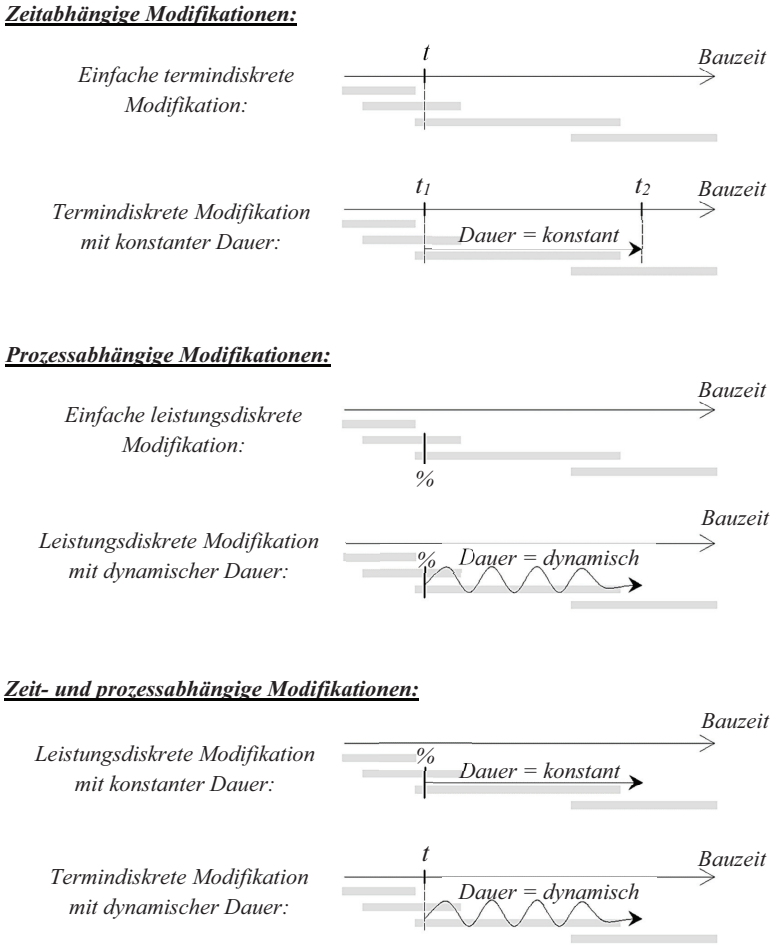


Abbildung 5-32: Veranschaulichung der sechs Modifikationsarten[1391]

Die in *Abbildung 5-32* gezeigten ***konstanten Dauern***, dargestellt als gerade Pfeile, sind frei zu bestimmen, indem direkte Zeitwerte, wie Termine und/oder Zeiträume, eingegeben werden. Demgegenüber ergeben sich ***dynamische Dauern*** aus den komplexen Berechnungen des Simulators, dargestellt als geschwungene Pfeile. Wie viel Zeit bei einer dynamischen

[1391] Eigene Darstellung.

Dauer verbraucht wird, ist vorab nicht genau festzulegen. Sie ergibt sich vielmehr aus den vom Benutzer gewählten Eingangsgrößen zur Nachbildung des Bauablaufs.

Zeitabhängige Modifikationen verhelfen zu zwei verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten, die jeweils auf einem *bestimmten Starttermin* aufbauen.

In *Abbildung 5-32* wird zum einen die ***einfache termindiskrete Modifikation*** dargestellt. Der Beginn dieser Modifikation ist von einem termindiskreten Ereignis abhängig. Mit ihr kann eine terminbezogene Veränderung veranlasst werden, z. B. der fortwährende Start oder Wegfall einer Teilleistung. Denkbar ist auch eine prozentuale Herabsetzung aller Zeitaufwandswerte. Ebenso können mit der termindiskreten Modifikation die in *Kapitel 4.5* definierten *Anhaltspunkte* zeitdiskret terminiert werden. Zudem lassen sich mit dieser Modifikationsart faktorielle Gewichtungen der Ausführungsprozesse terminweise umsetzen.

In *Abbildung 5-32* wird zum anderen die ***termindiskrete Modifikation mit konstanter Dauer*** dargestellt. Sie erlaubt ebenfalls terminabhängige Modifikationen, die *nur* über eine konstante Dauer wirken. Diese Dauer kann entweder durch die Vorgabe von zwei konkreten Terminen bestimmt oder durch die Nennung eines Starttermins mit einem „angehefteten" Zeitraum definiert werden. Aus beiden Varianten ergibt sich jeweils eine Dauer, die zwischen zwei Ereignissen zeitdiskret terminiert und somit konstant ist. Diese Modifikation ist geeignet, um bekannte Sachverhalte in das Bauablaufmodell zu integrieren, z. B. für unstreitige Störungssachverhalte oder Fertigungsdauern. Dadurch ist u. a. die Bestimmung eines blockierten Arbeitsbereichs zwischen zwei Terminen möglich, die auf einer Behinderungsanzeige und deren Abmeldung basiert. Denkbar ist auch die Modellierung der täglichen Arbeitszeiten.

Demgegenüber sind *prozessabhängige Modifikationen* innerhalb des Bauablaufmodells termin*un*abhängig. Sie gewährleisten während des Simulationslaufs, dass ein Vorgang oder ein Ereignis erst dann startet, wenn ein vordefinierter Leistungsstand anderer vorhergehender Ausführungsprozesse erreicht ist. Demzufolge kommt es bei diesen Modifikationen auf einen berechenbaren bzw. *bestimmbaren Starttermin* als Voraussetzung an. Daher sind sie abhängig von der simulierten Ablauflogik. Für die prozessabhängigen Modifikationen existieren zwei unterschiedliche Kategorien.

Abbildung 5-32 enthält die ***einfache leistungsdiskrete Modifikation***, die für das Wirksamwerden eines einmaligen Ereignisses den Abschluss eines bestimmten Leistungsstands voraussetzt. Eine solche Modifikation eignet sich zur Modellierung eines *Anhaltspunkts*[1392], der einen konkreten Leistungsstand innerhalb einer komplexen Bauausführung abbilden soll. Beispielsweise ist diese Modifikationsart zur Definition eines *leistungsbezogenen Messpunkts* zweckmäßig, der sich in einem dynamischen Bauablaufmodell zeitlich mitführen lässt.[1393] Faktorielle Gewichtungen können mit dieser Modifikationsart in die Bauzeitanalysen eingebracht werden.

Die andere prozessabhängige Modifikation ist die ***leistungsdiskrete Modifikation mit dynamischer Dauer***. Mit ihr wird ebenfalls ein bestimmter Leistungsstand vom Bauablaufmodell vorausgesetzt. Ab diesem Leistungsstand kann eine dynamische Produktionsdauer *simuliert* werden. Die dynamische Produktionsdauer erfordert bestimmte Eingangsgrößen und

[1392] Siehe *Kapitel 4.5*.
[1393] Siehe Definition von *Markern* in *Kapitel 8.2.3*.

Bedingungen für ihre Berechnung. Diese Modifikationsart ist vorzugsweise für die Modellierung von Ausführungsprozessen zu nutzen. Gerade sie ermöglicht komplexe Wechselwirkungen in den Simulationsläufen.

Die *zeit- und prozessbezogene Modifikation* ist eine Kombination der zuvor genannten Modifikationsarten. Auch hier liegen zwei Kategorien vor.

Die ***leistungsdiskrete Modifikation mit konstanter Dauer*** erfordert eine prozessabhängige Startbedingung sowie eine bestimmte Angabe für einen konstanten Zeitraum und kann zur Modellierung von Aushärte- oder Trocknungszeiten genutzt werden.

Die andere zeit- und prozessbezogene Modifikation ist die ***termindiskrete Modifikation mit dynamischer Dauer***. Sie erfordert einen bestimmten Termin, dem sich ein simulierter Zeitraum anschließt. Hiermit lassen sich bspw. Anfangsverschiebungen für einen frühesten, unstreitigen Starttermin nachfolgender Ausführungsprozesse modellieren.

Zusammenfassend sind die Modifizierungen nur möglich, wenn der Simulator alle seine berechneten Zwischenergebnisse persistent speichert, damit diese als neue Startvoraussetzungen der weiteren Simulationsläufe dienen. Außerdem muss der Simulator in der Lage sein, alle parallel ausgeführten Prozesse gleichzeitig zu unterbrechen, um von dort aus unter den eingefügten Bedingungen erneut simulieren zu können.

5.2.9 Zusammengefasste Anforderungen an den Simulator

In diesem Unterkapitel werden die grundlegenden Anforderungen an die BIM-basierte Bauablaufsimulation zur Beurteilung von Bauzeitverzögerungen stichpunktartig zusammengefasst. Darüber hinaus folgt eine Auflistung des notwendigen benutzergesteuerten Zugriffs auf die erzielten Simulationsergebnisse, so dass die in *Kapitel 4.5* und *Kapitel 4.6* genannten Vorüberlegungen für ein simulationsbasiertes Nachweisverfahren bereitgestellt werden können. Im Anschluss folgen vier Abgrenzungen für den weiteren Text.

Anforderungen an den Simulator:

- Ausrichtung auf Ausbauarbeiten
- agentenbasiertes Konzept zur Abbildung der Kapazitäten auf der Baustelle
- Verwendung objektbezogener Mengenangaben aus einem BIM-Gebäudemodell
- Berücksichtigung benutzergesteuerter Eingaben zur Bestimmung von Fertigungsrichtungen
- Berücksichtigung der genannten Konfliktprüfungen
- verschiedene Eingriffsmöglichkeiten in den Simulationslauf für sukzessive Modellierungen und Bauzeitanalysen
- Modifizierungsmöglichkeiten der Produktivität simulierter Ausführungsprozesse
- Berücksichtigung termin- und leistungsbezogener Modellierungskonzepte
- Berechnung von Vorgangsdauern mit und ohne Kapazitäten
- Verknüpfung des Simulationsmodells mit beliebigen (digitalen) Dokumenten

Darstellung der Simulationsergebnisse:

- Erweiterbarkeit des Simulationsmodells für spezielle Einzelfalluntersuchungen
- Verknüpfung der simulierten Prozesse mit dem Gebäudemodell für eine 4D-Visualisierung
- Visualisierung der Simulationsergebnisse in einer interaktiven Zeitperspektive
- Zugriff auf alle im Prozess- und Geometriemodell hinterlegten Daten
- Zugriff auf alle vom Simulationsmodell errechneten Daten

Abgrenzungen:

i) Große Teile der Baustellenlogistik werden im Rahmen der Forschungsarbeit nicht betrachtet. Darum finden im Simulationsansatz keine Fördermittel oder Baumaschinen Berücksichtigung.

ii) Da laut *Samkari* Netto-Zeitaufwandswerte eine höhere Genauigkeit erzielen, wird kein Zeitverbrauch durch Agentenbewegungen betrachtet.[1394] Speziell hierfür ist es ohnehin fraglich, inwieweit überhaupt das geplante und tatsächlich ausgeführte Bewegungsmuster der Kapazitäten im Rahmen einer nachträglich durchgeführten Bauzeitanalyse relevant ist.

iii) Die Betrachtung von Anordnungsbeziehungen entfällt ebenfalls; vielmehr werden direkte Abhängigkeiten betrachtet, die einer Normalfolge am nächsten kommen.

iv) Die Systemgrenzen bilden sich einerseits aus dem BIM-Gebäudemodell und andererseits aus der Aufbaustruktur auf Unternehmensebene, worauf im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

[1394] Vgl. Samkari, 2014: S. 174 ff.

6 Technische Umsetzung

6.1 Ausgangssituation

6.1.1 Gründe zur Wahl eines Petri-Netz-Simulators

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit hat es sich herausgestellt, dass ein ausführbares Petri-Netz als Simulator die in *Kapitel 5.2.9* genannten Anforderungen am ehesten erfüllt. Viele Simulationsanwendungen sind für die stationäre Industrie ausgelegt. Sie stellen ausgereifte Funktionen bereit, die auf zumeist stationäre Anwendungsfälle zugeschnitten sind. Es ergab sich, dass die Erreichung des in *Kapitel 5* angestrebten Simulationsansatzes allenfalls mit aufwändigen Umgestaltungen der vorgefertigten Funktionen realisierbar gewesen wäre. Teilweise hätte eine vergleichbare Schaltlogik gemäß den Petri-Netzen ohnehin modelliert werden müssen.

Franz bekräftigt, dass „[...] *Hersteller des* [Petri-Netz-]*Modells* […] *unter Umständen unbeschriebene Problemfelder erkennen, die kausal-logischen Zusammenhänge feststellen und gegebenenfalls Widersprüche und Störungen im System aufdecken sowie Lösungen zu deren Beseitigung erarbeiten.*“[1395] *Schopbach* nennt Vorteile hinsichtlich der Schaffung modulartiger Teilnetze in mehreren Hierarchieebenen, die zu einer gewissen Übersichtlichkeit bzw. Lesbarkeit beitragen.[1396]

Eine Herausforderung besteht beim angestrebten Simulationsansatz darin, dass der „plötzliche“ Eintritt von Störungssachverhalten nicht nur eine Änderung des Informationsflusses nach sich zieht, sondern ebenso häufig die Umstellung einer bereits vorhandenen Ablaufstruktur. Obwohl Petri-Netze aus wenigen Element-Arten bestehen, erlaubt gerade ihr minimalistischer Ansatz die Erfüllung solcher Aufgaben. Sie sind zur Erstellung simulationsfähiger Modelle für die Darstellung zeitbezogener und komplexer Prozessabläufe geeignet.[1397] Dabei spielen die Transitionen eines Petri-Netzes eine besondere Rolle. Sie lassen sich mit einer elementaren Black-Box vergleichen, in der jeweils eine Übergangsfunktion enthalten ist,[1398] die eine automatisierte Umstrukturierung der Modellstruktur ermöglicht. Dazu war bei der Entwicklung eine gewisse „Nähe am Programmcode“ erforderlich.

Gemäß *Kapitel 2.3.4* können Petri-Netze Hintergrundberechnungen durchführen, ohne dass der Benutzer merkt, dass er mit ihnen arbeitet.[1399] Im Sinne des *Kapitels 5.1.3* sind sie daher für den angestrebten Lösungsansatz geeignet. In der technischen Umsetzung wird das Petri-Netz auf die Geometrie eines BIM-Gebäudemodells abgebildet. Die Aufgabe übernimmt der Simulator. Dadurch bleibt die Sicht auf die Gebäudegeometrie erhalten, ohne die Darstellung durch benutzergesteuerte Eingabeteile, wie z. B. Schaltflächen, zu überfrachten. Darüber hinaus sind mit Petri-Netzen schnelle und effektive Berechnungen möglich.[1400]

Aus den mit einem Petri-Netz erzeugten Token können nachträglich Informationen gewonnen und zu einem Bauablaufmodell zusammengefügt werden. Hierauf aufbauend sind umfassende

[1395] Franz, 1989: S. 122.
[1396] Vgl. Schopbach, 2001: S. 148-149.
[1397] Vgl. Franz, 1989: S. 185.
[1398] Siehe *Kapitel 2.1.6*.
[1399] Vgl. van der Alst, 2014: S. 192; Samkari, 2014: Dissertation.
[1400] Vgl. Samkari, 2014: S. 139.

Analysen des Modellverhaltens durchführbar. Außerdem können bereits berechnete Markierungen aus dem Petri-Netz wiederhergestellt werden, um das „Zurückspulen“ der Simulationszeit und somit das Wiederauffinden alter Simulationszustände zu erreichen.

6.1.2 Technischer Aufbau des entwickelten Petri-Netz-Simulators

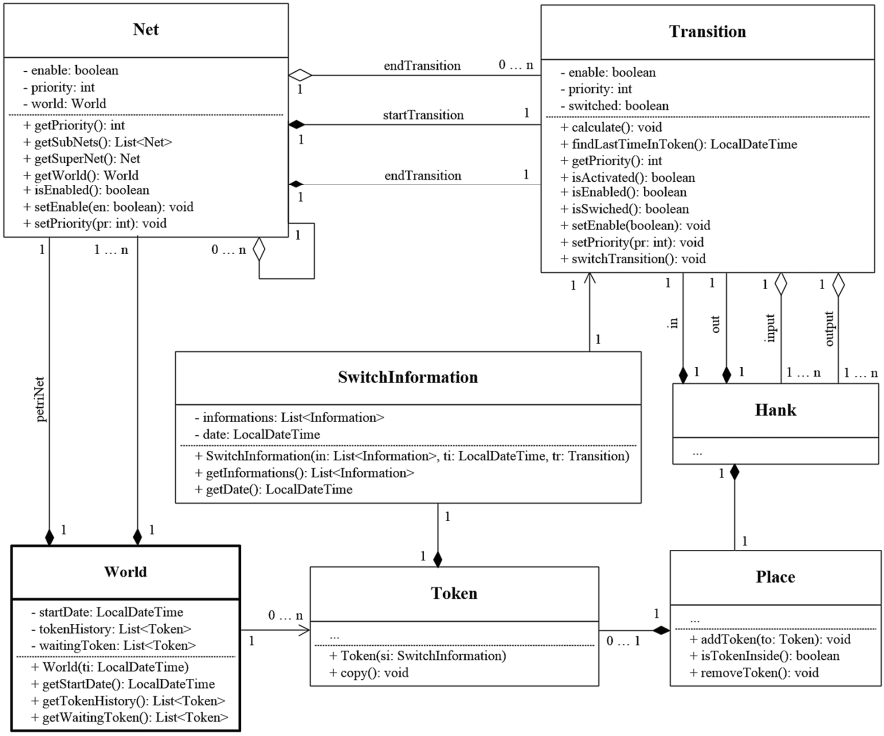


Abbildung 6-1: Klassendiagramm vom entwickelten Petri-Netz-Modell[1401]

Mit dem in *Abbildung 6-1* gezeigten Klassendiagramm wird der Aufbau des entwickelten Petri-Netz-Modells beschrieben. Die Mindestbestandteile setzen sich aus den Klassen ***Transition***, ***Place***, ***Hank, SwitchInformation*** und ***Token*** zusammen. Aus ihnen können die in *Kapitel 2.3.4* beschriebenen Marked-Graphen erstellt werden. Mit der Klasse *Hank* wird eine Wirkungsbeziehung zwischen zwei Transitionen in Form eines „Strangs“ definiert.[1402] Sie umfasst jeweils einen *Place* als Speicherplatz inkl. seiner Eingangs- sowie Ausgangskanten (siehe *Abbildung 6-2*). Der *Place* dient zur „üblichen“ Aufnahme und Abgabe eines *Token*. Letzterer fungiert als Informationsträger für die errechneten Zustandsbeschreibungen, die aus der Übergangsfunktion *calculate()* einer Transition gebildet werden können.

[1401] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

[1402] Die Verwendung eines solchen Strangs ist nicht zwingend erforderlich und teilweise sogar nicht sinnvoll. Dieser Ansatz wurde aber dennoch aus strategischen Entwicklungsschritten gewählt und beibehalten.

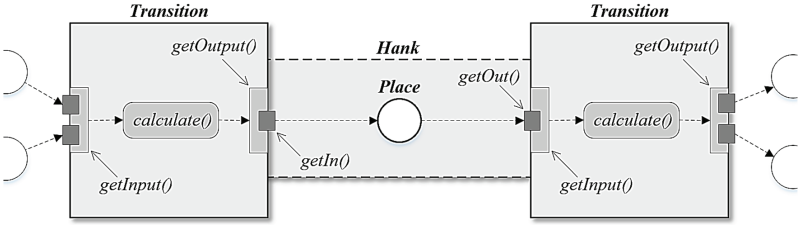


Abbildung 6-2: Konstruktion der Wirkungsbeziehungen des entwickelten Petri-Netzes[1403]

Die in *Abbildung 6-2* gezeigten Kanten, dargestellt als gestrichelte Pfeile, existieren im entwickelten Petri-Netz-Modell nicht. Sie sind rein hypothetisch vorhanden und deuten lediglich die Flussrichtung der späteren dynamischen Berechnungen an. Jede Klasse *Hank* besitzt für die Realisierung einer Wirkungsbeziehung mit der Funktion *getIn()* eine Eingangsstelle und mit der Funktion *getOut()* eine Ausgangstelle. Diese schließen direkt an die Eingangsstellen *getInput()* und Ausgangsstellen *getOutput()* der Transitionen an.

Die Klasse ***World*** bildet die Umwelt des Petri-Netzes ab. Sie beinhaltet eine Objektinstanz der Klasse ***SimplePetriNet***, womit das „Hauptnetz" begründet wird. Gemäß *Abbildung 6-3* verfügt es über eine *Quelle* und eine *Senke*, die jeweils als *Place* definiert sind.[1404] Jedes *SimplePetriNet* weist als Ausgangssituation einen Token in der Quelle auf, damit das Petri-Netz zum Schalten angeregt wird. Im Modellentwurf ist die Klasse *SimplePetriNet* eine Spezialisierung der Klasse ***Net***, mit der auch Teilnetze vom gesamten Petri-Netz-Modell definiert werden können. Alle besitzen einen Zugriff auf die Modellumwelt (*World*). Die Modellgrenzen der (Teil-)Netze bestehen jeweils aus einer Eingangstransition *startTransition* und einer Ausgangstransition *endTransition*. Darin können weitere, verschachtelte Teilnetze mit spezialisierten Transitionen für konkrete Berechnungen enthalten sein.

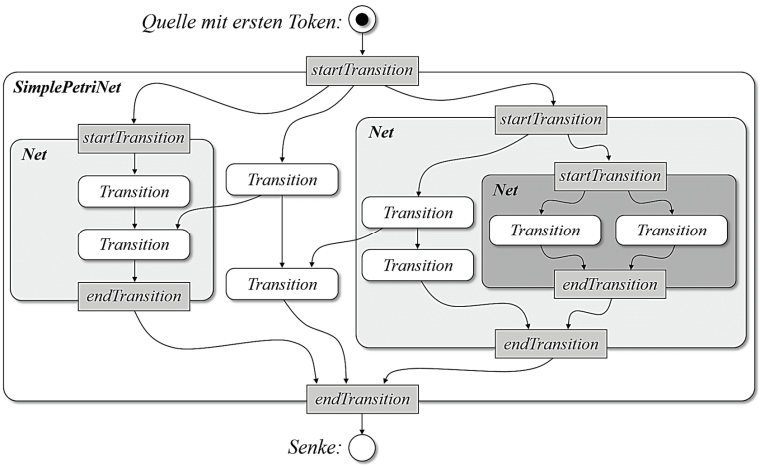


Abbildung 6-3: Aufbaustruktur eines beispielhaften Petri-Netz-Modells[1405]

[1403] Eigene Darstellung.
[1404] Siehe *Abbildung 2-19.*
[1405] Eigene Darstellung.

Der aktivierte Zustand einer Transition lässt sich mit der Funktion *isActivated()* abfragen. Das Schalten einer Transition erfolgt durch den Aufruf der Funktion *switchTransition()*. Hierbei werden alte Token aus dem Vorbereich entnommen und neue Token in den *Nachbereich*[1406] geschrieben. Alle neu erstellten Token erhalten eine eigene *SwichtInformation*. In der *SwichtInformation* wird auf die Transition verwiesen, die den Token erzeugt. Sie erhält zudem alle weiteren errechneten Informationen – insbesondere den Schalttermin – aus der Übergangsfunktion *calculate()*. Mithilfe der Token werden diese Informationen für weitere Berechnungen an die nächste Transition weitergereicht.

Grundsätzlich geht eine *SwitchInformation* von einer Transition aus und nicht von einem Token. Denn eine *SwitchInformation* kann mit der Liste *getInformations()* zusätzliche Daten umfassen, die einer Transition zugewiesen wurden, wie z. B. angehängte Dateien oder Textkommentare. Somit umfasst eine Objektinstanz der Klasse *SwitchInformation* die geschaltete Transition mit dem errechneten Schalttermin und ihren zusätzlichen Informationen. Dieses Konstrukt bildet die Ausgangssituation der in *Kapitel 4.5* genannten *Anhaltspunkte.* Auf die möglichen Datenstrukturen einer *SwitchInformation* soll nicht weiter eingegangen werden, da dies das Thema der Arbeit überschreiten würde. Es wird lediglich davon ausgegangen, dass die Informationen transitionsbezogen in die Datenstrukturen integriert werden können.

Beim Schalten entnimmt der entwickelte Simulator alle Token des Vorbereichs der schaltenden Transition und hinterlegt die neu erstellten Token des Nachbereichs in die Liste *getTokenHistory()* der Klasse *World* (siehe *Abbildung 6-4*). Zur grafischen Darstellung der Token werden in der Abbildung die Places mit ihren Eingangs- und Ausgangskanten gezeigt. Die Umwelt wird in Form einer Wolke dargestellt.

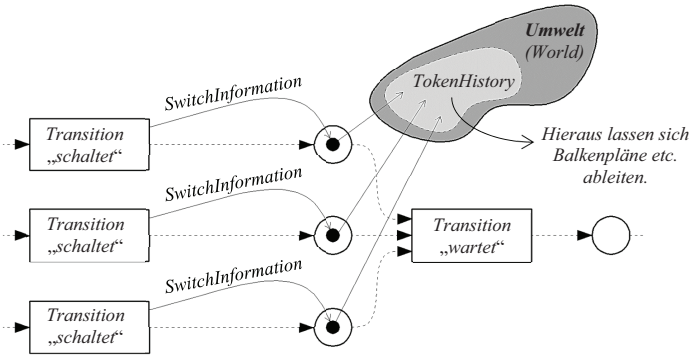


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung nebenläufig schaltender Transitionen[1407]

Nach einem Simulationslauf können aus den in der Liste *getTokenHistory()* gespeicherten Token Bauablaufmodelle abgeleitet werden, z. B. in Form eines Balkenplans. Dies erfolgt über die in den Token hinterlegte *SwitchInformation*. Darüber hinaus ist es möglich, daraus das gesamte Petri-Netz mit allen Abhängigkeiten und Markierungen zu rekonstruieren, denn in den Objektinstanzen der Klasse *SwitchInformation* ist der vollständige Aufbau der

[1406] Siehe *Abbildung 2-18*.
[1407] Eigene Darstellung. Vorgehensweise i. A. a. *Samkari*. Vgl. Samkari, 2014: S. 160.

geschalteten Transition beschrieben. Die in der Abbildung gezeigten Aufgaben erfolgen allesamt durch den Aufruf der Funktion *switchTransition()*.

Für das Schalten einer Transition stellt sich der *Pseudocode 6-1* standardmäßig wie folgt dar:

Pseudocode 6-1: Aufbau der Schaltfunktion *switchTransition()* einer *Transition*

```
0:  //Verifiziere die Eingangsgrößen und beachte das Abbruchkriterium
1:  IF kein Hank als Output der Transition vorhanden
2:      THEN Werfe SwitchException se
3:  ELSE

4:      //Rufe Übergangsfunktion auf, die von spezialisierten Transitionen überschrieben werden kann
5:      Führe aus calculate()   //siehe Pseudocode 6-2

6:      //Entnehme Token aus Vorbereich und speichere diese in die „TokenHistory“-Liste
7:      //(Das Schlüsselwort this kennzeichnet die gegenständliche Transition)
8:      FOR über alle Hank inHank aus Liste this.getInput()
9:          Entnehme Token token aus dem eingehenden Hank inHank.getPlace().getToken()
10:         Setze token in World-Liste this.getNet().getWorld().getTokenHistory()
11:         Entferne token aus World-Liste this.getNet().getWorld().getWaitingToken()
12:     ENDFOR

13:     //Erstelle neue Token in den Nachbereich und hinterlege diese in die „Waiting-Token“-Liste
14:     FOR über alle Hank outHank aus der Liste this.getOutput()
15:         Erstelle neuen Token newToken mit den Inhalten aus this.getSwitchInformation()
16:         Setze newToken in World-Liste this.getNet().getWorld().getWaitingToken()
17:     ENDFOR

18:     //Markiere Transition als geschaltet
19:     Setze Information, dass geschaltet wurde mit this.setSwitched(true)
20: ENDELSE
```

Wie sich aus der *Zeile 5* des *Pseudocodes 6-1* entnehmen lässt, wird mit der Funktion *switchTransition()* – also beim Schalten – immer die Übergangsfunktion *calculate()* aufgerufen. Standardmäßig findet eine Ermittlung des spätesten Termins statt, der aus allen zuvor durchgeführten Berechnungen zugrunde liegt.

Der Zugriff auf den spätesten Termin basiert auf dem Grundsatz, dass eine vergangene Zeit nicht mehr aufgeholt werden kann. Demzufolge bauen alle weiteren Zeitberechnungen auf den spätesten aller möglichen Termine auf. Die zu vergleichenden Termine lassen sich aus der *SwitchInformation* von den eingehenden Token entnehmen und fließen in die neuen Berechnungen ein. Der neue, darauf aufbauende Termin wird nach erneutem Schalten in die *SwitchInformation* des neuen Token hinterlegt.

Infolge eines weiteren Schaltens kann dieser errechnete Termin aufgegriffen und fortgeschrieben werden. Der folgende *Pseudocode 6-2* zeigt den Aufbau der standardmäßigen Übergangsfunktion *calculate()*, die bei einer spezialisierten Transition überschrieben werden darf.

Pseudocode 6-2: Standardmäßiger Aufbau der Übergangsfunktion *calculate()* einer *Transition*

```
0:  //Ermittle den spätesten Termin aller eingehenden Token
1:  Entnehme LocalDateTime(*) date aus this.findLastDateInToken() //siehe Pseudocode 6-3

2:  //Diverser Quellcode. Zum Beispiel für vorgangsbezogene Terminberechnungen
3:  //Zum Beispiel: date.plusMinutes(10) usw.

4:  //Erstelle neue SwitchInformation für die Transition mit den zusätzlichen sowie errechneten Informationen
5:  //sowie die Übergabe des spätesten Termins aller eingehenden Token und der gegenständlichen Transition
6:  Erstelle neue SwitchInformation info aus List<Information(**)>, date und this
7:  Setze neue SwitchInformation info in die gegenständliche Transition this.setSwitchInformation(info)
```

(*) Die Klasse *java.time.LocalDateTime* wurde beispielhaft aus der Java 8-API gewählt. (Vgl. https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/time/LocalDateTime.html [abgerufen am: 03.04.2018])

(**) Die Klasse *Information* ist ausbaufähig und kann je nach Programmierung, z. B. angehängte Dateien, Kommentare etc. enthalten. Als Voraussetzung müssen die Inhalte über die jeweilige Transition ins Modell gebracht werden. Hierauf wird jedoch nicht weiter eingegangen.

Wie sich aus der *Zeile 1* des *Pseudocodes 6-2* entnehmen lässt, erfolgt die Ermittlung der vorausgegangenen Termine mit der Funktion *findLastDateInToken()*. Da dieser Funktion eine große Bedeutung beizumessen ist, wird der dazugehörige *Pseudocode 6-3* im Folgenden vorgestellt.

Pseudocode 6-3: Ermittlung des spätesten Termins mit der Funktion *findLastDateInToken()*

```
0:  // Lege anfangs eine Liste für die berechneten Termine aus allen eingehenden Token an
1:  Erstelle Liste<LocalDateTime> dates für die in den eingehenden Token hinterlegten Termine

2:  //Ermittle die eingehenden Token aus den vorausgegangenen Plätzen und erfasse alle berechneten Termine
3:  FOR über alle Hank inHank aus Liste this.getInput()
4:      Entnehme Token token für den vorausgehenden Token inHank.getPlace().getTocken()
5:      Entnehme SwitchInformation info aus den erfassten Token token.getSwitchInformation()
6:      Setze den errechneten Termin von info.getDate() in Liste dates
7:  ENDFOR

8:  Sortiere die Termine chronologisch
9:  Wertrückgabe des letzten Listeneintrags aus dates
```

Mit den vorausgegangenen Beschreibungen lässt sich ein Petri-Netz modellieren, mit dem bereits komplexe computergestützte Simulationen ausgeführt werden können. Zur Ausführung ist eine Simulationsschleife erforderlich, die den wesentlichen Bestandteil des Simulators begründet. Im *Pseudocode 6-4* wird diese Simulationsschleife vorgestellt.

Pseudocode 6-4: Einfache Simulationsschleife für die Ausführung des Petri-Netz-Modells

```
0:  Erstelle World world als Simulationsumwelt mit einem frühesten Projekttermin
1:  Entnehme SimplePetriNet(*) petriNet von world.getPetriNet() als „Hauptnetz“
3:  Erstelle Variable boolean inhibited = false als Abbruchkriterium für Netzverklemmungen
4:  Erstelle Liste<Transition> tempTransitions als temporärer Zwischenspeicher für ausgewählte Transitionen

5:  //Diverser Quellcode für die Zusammenstellung der Petri-Netz-Struktur aus miteinander verknüpften
6:  //Transitionen – siehe Abbildung 6-3

7:  //Wiederhole Simulationsschleife so lange, bis die Senke von petriNet den letzten Token erhält
8:  WHILE solange die Senke von petriNet keinen Token erhält
9:      Setze inhibited = true        //„provisorisch“ wird von einem verklemmten Netz ausgegangen
10:     Entferne alle in tempTransitions hinterlegten Transitionen

11:     //Ermittle die Transitionen, die einen „wartenden Token“ im Vorbereich aufweisen
12:     FOR für alle Token token aus world.getWaitingToken()
13:         Entnehme Transition waitingTransition aus token.getPlace().getHank().getOut()
14:         IF waitingTransition ist nicht in tempTransitions enthalten
15:             THEN Setze waitingTransition in Liste tempTransitions
16:     ENDFOR

17:     Sortiere die wartenden Transitionen in tempTransition anhand ihrer Priorität

18:     //Ermittle die aktivierten Transitionen in petriNet
19:     FOR für alle Transitionen waitingTransition aus tempTransition
20:     IF waitingTransition ist aktiviert
21:         Führe aus waitingTransition.switchTransition()    //siehe Pseudocode 6-1
22:         Setze inhibited = false
23:     ENDFOR

24:     //Prüfe Netzverklemmung bzw. Verifizierung des Simulationsmodells
25:     IF inhibited == true
26:         THEN Werfe SwitchException se und beende Simulationsschleife
27: ENDWHILE
```

(*) Damit die Simulationsschleife voranschreiten kann, wird der erste Token von Beginn an in die Quelle und in die Liste *world.getWaitingToken()* geschrieben. Nachdem das *SimplePetriNet* vollständig durchlaufen wurde, löst die Senke eine Rückmeldung aus. Dies ist der Fall, sobald die Senke einen Token erhält. Das Signal der Senke wird benötigt, um die Simulationsschleife abzubrechen.

6.2 Entwicklung des Geometrie- und Prozessmodells

6.2.1 Ausgangssituation der prototypischen Umsetzung

Der mit der Programmiersprache *Java* entwickelte BIM-basierte Petri-Netz-Simulator ist eine Standalone-Anwendung. Die Simulation erfordert ein simulationsfähiges *Produktmodell*, das sich gem. *Kapitel 2.3.6* aus einem *Gebäude*- und einem *Prozessmodell* zusammensetzt.

Im Sinne des *Kapitels 1.5* wurde *keine* ganzheitliche Benutzeroberfläche für die Simulationsmodellierung ausgearbeitet. Stattdessen müssen die BIM-Gebäudemodelle innerhalb der kommerziellen Modellierungssoftware *Autodesk Revit Architecture 2016*[1408] erstellt werden. Um die BIM-Gebäudemodelle in den Simulator einbinden zu können, fand in *Autodesk Revit*

[1408] https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].

Architecture 2016 die Entwicklung eines *Export-Plugins* mit der Programmiersprache *C#* statt.[1409] Dies ermöglicht einen Daten-Export über ein *XML-Dateiformat*, das sich mit dem BIM-basierten Petri-Netz-Simulator aufrufen und interpretieren lässt.

Aufgrund der prototypischen Entwicklungen sind die Daten des Prozessmodells in separate *mdb-Dateiformate* zu schreiben, die ebenfalls durch den Simulator aufgerufen und interpretiert werden können. Dazu sind die Prozessdaten größtenteils *manuell* einzugeben. Der Zugriff und die Interpretation der Prozessdaten erfolgt über eine weitere Schnittstelle innerhalb des BIM-basierten Petri-Netz-Simulators. Die Schnittstelle wurde mit dem Datenbanktreiber *UCanaccess*[1410] entwickelt.

Innerhalb des Simulators werden alle erfassten Daten als Teilmodelle zu einem simulationsfähigen Produktmodell zusammengeführt. Die Entwicklungen erfolgten hauptsächlich auf Basis der *JavaFX 8-API*[1411]. Berechnungen topologischer 2D-Geometrien werden durch die *JTS-API 1.14*[1412] unterstützt.

In derzeitigen Forschungsansätzen besteht ein Bestreben darin, dass entsprechende Modelldaten in ein *IFC-Dateiformat* hinterlegt werden. Jedoch wurde im Rahmen der prototypischen Entwicklungen aufgrund des hohen Abstraktionsgrads, der komplexen Modellinterpretationen und der damit einhergehenden *Fehleranfälligkeit*[1413] von der Nutzung eines solchen Dateiformats abgesehen. Bei der gewählten Variante mit dem *XML-Dateiformat* bleiben parametrische Geometrieeigenschaften weitestgehend unberücksichtigt. Dadurch gehen teilweise geometrische Semantiken verloren. Für die prototypische Entwicklung ist dieser Verlust jedoch nicht entscheidend, um die in *Kapitel 5* beschriebenen Anforderungen des Simulationsansatzes zu erzielen.

Auf weitere Ansätze zur Dateneingabe wird nicht eingegangen. Vielmehr findet eine Vorstellung der entwickelten Datenstrukturen statt. Sie zeigen implizit die erforderlichen Daten für ein simulationsfähiges Modell.

6.2.2 Struktur des entwickelten Gesamtmodells

In *Abbildung 6-5* wird die Umwelt des Gesamtmodells der Klasse ***World*** gezeigt. Darin ist das Petri-Netz-Modell gem. *Kapitel 6.1.2* enthalten. Die Umwelt umfasst ein Projekt (***Project***), das sich aus einem Gebäudemodell (***BuildingModel***) und einem Prozessmodell (***ProcessModel***) zusammensetzt.[1414] Die in beiden Teilmodellen hinterlegten Modelldaten verknüpft ein Interpreter (***SimulationModelInterpreter***) zu einem simulationsfähigen *Produktmodell*, das der ***Simulator*** ausführen kann (siehe *Kapitel 2.3.6*). Zusätzlich weist der Modellinterpreter jedem Teilmodell die von ihm erstellte Objektinstanz der Klasse *Project* zu. Dadurch besteht ein umfassender Zugriff auf alle Bestandteile des Gesamtmodells.

[1409] Für Programmierungen in *Autodesk Revit*: http://thebuildingcoder.typepad.com [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].
[1410] https://sourceforge.net/projects/ucanaccess [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].
[1411] https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].
[1412] https://sourceforge.net/projects/jts-topo-suite/postdownload?source=dlp [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].
[1413] Vgl. Pärn/Edwards/Sing, 2018: S. 217. Ähnlich argumentiert *Kohlhaas*. Vgl. Kohlhaas, 2015: S. 45.
[1414] Projektrelevante Informationen, wie z. B. Projektdaten, Kommentare oder angehängte Dateien, lassen sich als *ProjectInformation* integrieren. Dieser Aufbau wird nicht weiter vertieft.

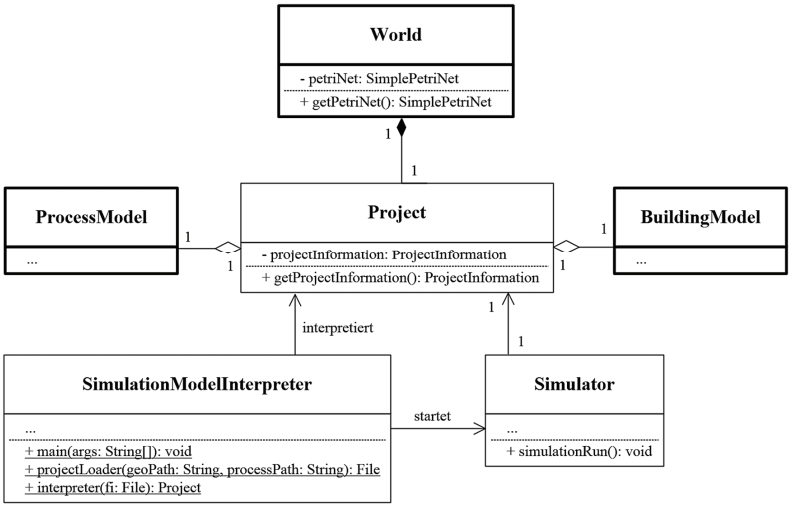


Abbildung 6-5: Klassendiagramm A – Grobe Gliederung des simulationsfähigen Gesamtmodells[1415]

6.2.3 Geometrische Kollisionsprüfung mit 2D-Polygonen im 3D-Raum

Geometrische Kollisionsprüfungen von 2D-Polygonen im 3D-Raum erfolgen über eine *UV-Abbildung*. Die dafür erforderlichen Algorithmen basieren auf einer vektoriellen Mathematik. Im Gesamtmodell basieren sie auf den beiden entwickelten Klassen ***Surface***, ***Plane*** und der Klasse *com.vividsolutions.jts.geom.Poylgon* der *JTS-API*. In *Abbildung 6-6* ist das entsprechende Klassendiagramm dargestellt.

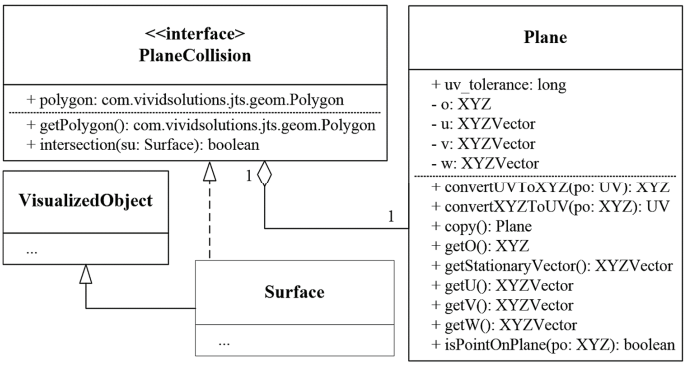


Abbildung 6-6: Klassendiagramm B – Klassen zur Durchführung der Kollisionsprüfungen[1416]

Bei der *UV-Abbildung* werden die 3D-Koordinaten (x_i, y_i, z_i) eines Punkts P_i von einem Polygon auf relative 2D-Koordinaten (u_i, v_i) projiziert. Die Projektion erfolgt auf jene

[1415] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

[1416] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

2D-Ebene, die das Polygon im 3D-Raum aufspannt (siehe *Abbildung 6-7*). Für die *geometrische Kollisionsprüfung* müssen andere Polygone gefunden werden, die sich ebenfalls im 3D-Raum genau auf dieser 2D-Ebene befinden. Eine potentielle geometrische Kollision besteht, sobald zwischen den Polygonflächen eine Überschneidung vorliegt.

Abbildung 6-7 illustriert diese Zusammenhänge. Ausgehend von der *Polygonfläche A* wird auf einer Wand im 3D-Raum eine relative 2D-Ebene abgeleitet, die durch die relativen 2D-Koordinatenachsen *U* und *V* definiert ist. Der 3D-Punkt *O* bildet den Ursprung des relativen Koordinatensystems als Aufpunkt ab. Da sich auf der Wandoberfläche – und somit auf der 2D-Ebene – gleichzeitig die *Polygonfläche B* befindet, ist im Rahmen einer Kollisionsprüfung die Untersuchung beider Polygone hinsichtlich einer Überschneidungsfläche als ***Kollisionsbereich*** möglich.

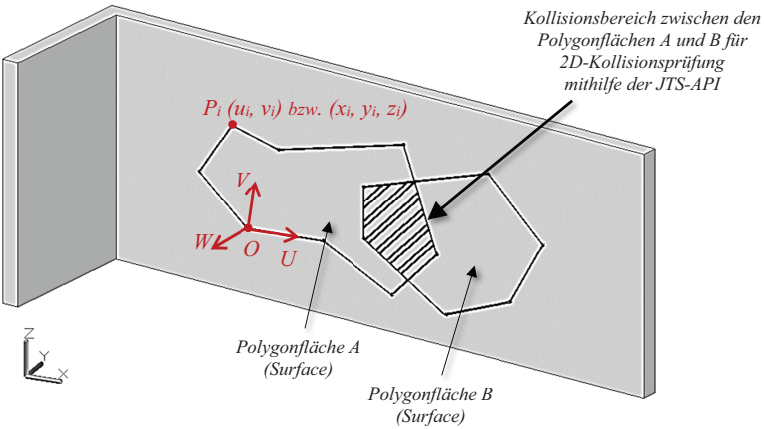


Abbildung 6-7: Skizze zur UV-Abbildung mit zwei Polygonflächen im 3D-Raum[1417]

Zur Ermittlung der geometrischen Kollision innerhalb des Geometriemodells enthält die Klasse *Surface* ein Polygon *polygon*. Dieses kann auf seine relative 2D-Ebene gem. *Pseudocode 6-5* projiziert werden. Anhand der 2D-Koordinaten lassen sich die Polygone mithilfe der *JTS-API* auf *Überschneidungen*, i. S. v. 2D-Flächenkollisionen, prüfen.

[1417] Eigene Darstellung.

Pseudocode 6-5: Ermittlung der U- und V-Koordinatenachsen relativer 2D-Ebenen im 3D-Raum

```
0:  //Bereite UV-Abbildung für ein unbestimmtes Polygon im dreidimensionalen Raum vor
1:  Erfasse alle 3D-Punkte von einer Oberfläche Surface surface eines Bauteilmodells in einem Array polygon
2:  Erstelle Variable boolean check = true
3:  Erstelle Variable int counter = 0
4:  Erstelle Variable 3D-Punkt p0 = polygon[2] als relativen Koordinatenursprung der 2D-Fläche
5:  Erstelle Variablen 3D-Punkt p1 = polygon[1], p2 = polygon[0] zur relativen Ausrichtung der 3D-Vektoren
    als 2D-Koordinatenachsen
6:  Erstelle drei 3D-Vektoren U, V, W und O – zunächst ohne Wertzuweisung

7:  //Wiederhole Do-While-Schleife zur Prüfung der 2D-Koordinatenachsen als 3D-Vektoren
8:  DO
9:      Erhöhe counter = counter + 1
10:     Erstelle 3D-Vektor potU mit den Punkten p0 und p1      //Als potentielle U-Achse
11:     Erstelle 3D-Vektor potV mit den Punkten p0 und p2      //Zur Ausrichtung der Polygonkante

12:     //Berechne einen Normalvektor auf der 2D-Ebene, die durch potU und potV aufgespannt wird
13:     Erstelle 3D-Vektor normal aus dem Kreuzprodukt zwischen den 3D-Vektoren potU und potV

14:     //Berechne einen Normalvektor auf der 2D-Ebene, die durch potU und normal aufgespannt wird
15:     Überschreibe potV aus dem Kreuzprodukt zwischen den 3D-Vektoren normal und potU

16:     //Bilde aus den 3D-Vektoren potU, potV, normal und dem 3D-Punkt p0 das relative Koordinatensystem
17:     Setze für U den Einheitsvektor aus potU
18:     Setze für V den Einheitsvektor aus potV
19:     Setze für W den Einheitsvektor aus normal
20:     Setze für O den relativen Koordinatenursprung mit den Koordinaten von p0 als Vektorkomponenten

21:     //Prüfe, ob p0, p1 und p2 auf einer Linie liegen oder sich einen Punkt als relativen Nullpunkt teilen
22:     IF potU mit potV aufeinander liegen
23:     OR die Betragswerte der Vektorkomponenten von | potU | <= UV_Tolerance  //UV_Tolerance ≈ „+0“
24:     OR die Betragswerte der Vektorkomponenten von | potV | <= UV_Tolerance
25:         THEN check = true ELSE check = false

26:     //Prüfe, ob alle 3D-Punkte vom Polygon polygon getestet wurden
27:     IF counter == polygon.length - 2
28:         THEN check = false

29:     //Prüfe die nächsten drei 3D-Punkte aus polygon
30:     IF check == true
31:         THEN Setze p0 = polygon[counter + 2], p1 = polygon[counter + 1], p2 = polygon[counter]

32: //Prüfe Schleifenabbruch
33: WHILE solange bis check == false
```

Auf der durch den *Pseudocode 6-5* ermittelten 2D-Ebene lassen sich alle weiteren Punkte des Polygons abbilden. Mit dem folgenden *Pseudocode 6-6* werden die erforderlichen Berechnungsschritte erläutert.

Pseudocode 6-6: Umrechnung *eines* 3D-Punkts auf eine relative 2D-Ebene im 3D-Raum

```
0:  //Folgende Berechnungsschritte basieren auf den drei 3D-Vektoren U, V und dem 3D-Punkt O, die mithilfe
1:  //des Pseudocodes 6-5 anhand des Polygons polygon ermittelt wurden
2:  Erfasse einzelnen Punkt Pi aus polygon
3:  Erstelle 3D-Vektor directionVector als relativen Richtungsvektor, der von O zu Pi ausgerichtet ist
4:  Erstelle Variable double uCoord für die relative U-Koordinate des späteren 2D-Punkts
5:  Erstelle Variable double vCoord für die relative V-Koordinate des späteren 2D-Punkts

6:  //Berechne die relativen 2D-Koordinaten
7:  Setze uCoord = Skalarprodukt aus den 3D-Vektoren directionVector und U
8:  Setze vCoord = Skalarprodukt aus den 3D-Vektoren directionVector und V

9:  //Erstelle den neuen relativen 2D-Punkt
10: Erstelle 2D-Punkt pNew aus den beiden Koordinaten uCoord und vCoord
```

Soll geprüft werden, ob sich ein weiteres Polygon auf der mit dem *Pseudocode 6-5* ermittelten 2D-Ebene im 3D-Raum befindet, ist die folgende Vorgehensweise gem. *Pseudocode 6-6* anzuwenden:

Pseudocode 6-7: Prüfung, ob sich ein *beliebiger* 3D-Punkt auf der relativen 2D-Ebene befindet

```
0:  //Folgende Berechnungsschritte basieren auf dem Normalvektor W und dem 3D-Punkt O, die mithilfe des
1:  //Pseudocodes 6-5 anhand des Polygons polygon ermittelt wurden
2:  Erfasse einzelnen 3D-Punkt Pi von einem beliebigen Polygon der Klasse Surface
3:  Erstelle 3D-Vektor directionVector als relativen Richtungsvektor, der von O zu Pi ausgerichtet ist
4:  Erstelle Variable double check = Skalarprodukt aus den 3D-Vektoren directionVector und W

5:  //Prüfe, ob der 3D-Punkt Pi auf der 2D-Ebene liegt
6:  IF Betragswert von | check | <= UV_Tolerance  //UV_Tolerance ≈ „+0“
7:      THEN Pi liegt auf 2D-Ebene des Polygons polygon
8:  ELSE Pi liegt nicht auf 2D-Ebene des Polygons polygon
```

Alle Punkte eines beliebigen Polygons liegen auf der errechneten 2D-Ebene, sobald sich genau drei Punkte darauf befinden. Ist dies der Fall, kann das beliebige Polygon unter Einsatz des *Pseudocodes 6-6* auf die 2D-Ebene projiziert werden, damit die 2D-Kollisionsprüfung mit der *JTS-API* erfolgen kann. Da alle Bauteile durch Oberflächen designt werden, ist die hier beschriebene Vorgehensweise prinzipiell für alle geometrischen Kollisionsprüfungen anwendbar, bei denen Ebenen im 3D-Raum verglichen werden. Eine geometrische Kollisionsprüfung für 3D-Körper wurde im Rahmen dieser Arbeit hingegen nicht betrachtet.

Zur grafischen Visualisierung der 3D-Objekte erfolgt ebenfalls eine UV-Abbildung. So werden u. a. mit dem in *Autodesk Revit* entwickelten Plugin alle objektbezogenen Knotenpunkte beliebiger Bauteilmodelle erfasst und auf ihre relative 2D-Ebene projiziert. Da die Raumseiten der in *Autodesk Revit* modellierbaren Räume keine Öffnungen, wie z. B. Türen-, Fenster- oder Treppenöffnungen, enthalten, mussten diese mit einem entwickelten Algorithmus nachträglich eingearbeitet werden. Der Algorithmus erfasst alle Seiten der einzelnen Räume. Daraufhin wird von jeder Raumseite die relative 2D-Ebene errechnet. Im nächsten Schritt findet die Ermittlung aller möglichen Flächen der angrenzenden Bauteilmodelle statt, wie Wände, Decken, Böden oder auch Unterzüge etc., die deckungsgleich mit den jeweiligen Raumseiten sind. Sobald die gefundenen Bauteilmodelle eine Öffnung besitzen, wird daraus – ähnlich einem orthogonalen Schattenwurf – ein

2D-Polygon rekonstruiert und auf die 2D-Ebene abgebildet. Damit wird das Polygon aus der Raumseite „herausgestanzt".

Die daraus entstehenden neuen 2D-Polygone werden zur späteren Bildsynthese mit einer *Delauny-Voronoi-Triangulation*[1418] in dreieckige Polygone zerlegt.

Alle Dreieckspolygone, die den zuvor betrachteten Bauteilöffnungen zugeordnet werden können, erhalten eine Kennzeichnung, um sie für die grafische 3D-Visualisierung herauszurechnen. Danach erfolgt die geometrische Abbildung von allen zweidimensionalen Dreiecks-polygonen in die passende 3D-Position. Diese Aufgabe wird durch den *Pseudocode 6-8* beschrieben.

Pseudocode 6-8: Umrechnung *eines* 2D-Punkts als 3D-Punkt anhand der 2D-Ebene

```
0: //Folgende Berechnungsschritte basieren auf den 3D-Vektoren U, V und dem 3D-Punkt O, die mithilfe des
1: //Pseudocodes 6-5 anhand des Polygons polygon ermittelt wurden
2: Erfasse einzelnen 2D-Punkt Pi aus einem Polygon, das auf der von polygon definierten 2D-Ebene liegt
3: Erstelle Variablen double x, y und z sowie den 3D-Punkt pNew

4: //Berechne die 3D-Koordinaten (O + Pi,u * U + Pi,v * V)
5: Setze x = O.getX() + Pi.getU() * U.getX() + Pi.getV() * V.getX()
6: Setze y = O.getY() + Pi.getU() * U.getY() + Pi.getV() * V.getY()
7: Setze z = O.getZ() + Pi.getU() * U.getZ() + Pi.getV() * V.getZ()

8: //Berechne die relativen 2D-Koordinaten
9: Setze pNew mit den Variablen x, y und z als 3D-Koordinaten
```

Die neu errechneten 3D-Punkte beschreiben einzelne 3D-Dreieckspolygone, die später für die 3D-Bauteilmodelle zusammengesetzt werden müssen, damit sich diese in einem virtuellen, dreidimensionalen Raum darstellen lassen. Da die einzelnen Berechnungen sehr umfangreich sind, wird die Vorgehensweise zur Bildsynthese nicht weiter vertieft.

Die *Delauny-Voronoi-Triangulation* ist ein bewährtes Mittel, um aus einer beliebigen Punktmenge Dreiecksflächen herzuleiten. Da Dreiecke die kleinsten Flächengebilde sind, können mit ihnen komplexere Gebilde in der entsprechenden Anordnung fraktal zusammengesetzt werden. Die folgende *Abbildung 6-8* verdeutlicht die Möglichkeiten der Triangulation anhand eines Beispielprojekts[1419] von *Autodesk Revit*.

[1418] Hierbei handelt es sich um die Erstellung eines *dualen Graphens*. Ziel ist die Delauny-Dreiecksaufteilung, bei der aus einer Punktmenge einerseits eine optimale Anzahl sowie Anordnung möglicher Dreiecke und andererseits keine Dreiecksüberlappungen gefunden werden müssen. Dazu ist aus drei beliebigen Punkten ein Dreieck zu bilden, dessen Umkreis keinen weiteren Punkt enthalten darf. Dieser Ansatz lässt sich durch die Bildung des *Voronoi-Graphen* erzielen. Umfassende Ansätze liefert *Bourke*. Vgl. Bourke, 1989. Bei den Prototypen wurde auf eine gegebene *Delauny-Voronoi-Funktion* der *JTS-API* zurückgegriffen.

[1419] Siehe https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products [zuletzt abgerufen am 28.03.2018].

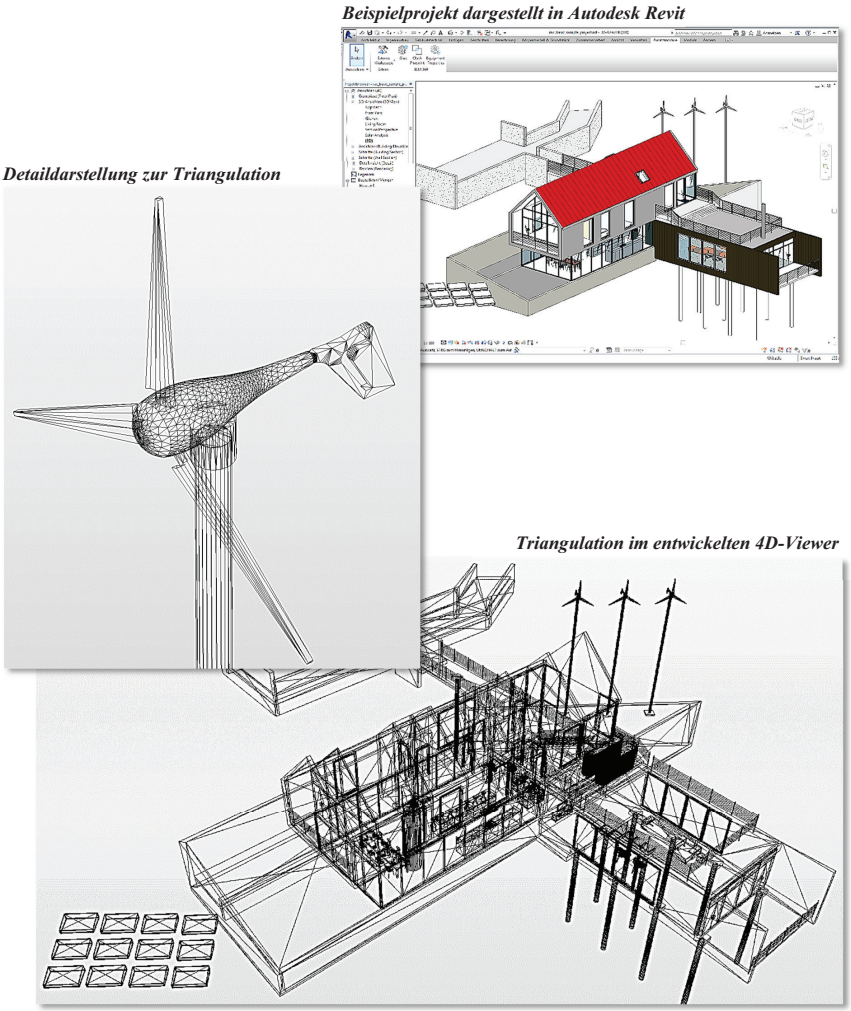


Abbildung 6-8: Beispielhafte Darstellungen der Triangulation mithilfe der UV-Abbildung[1420]

[1420] Eigene Darstellung.

6.2.4 Struktur des Gebäudemodells

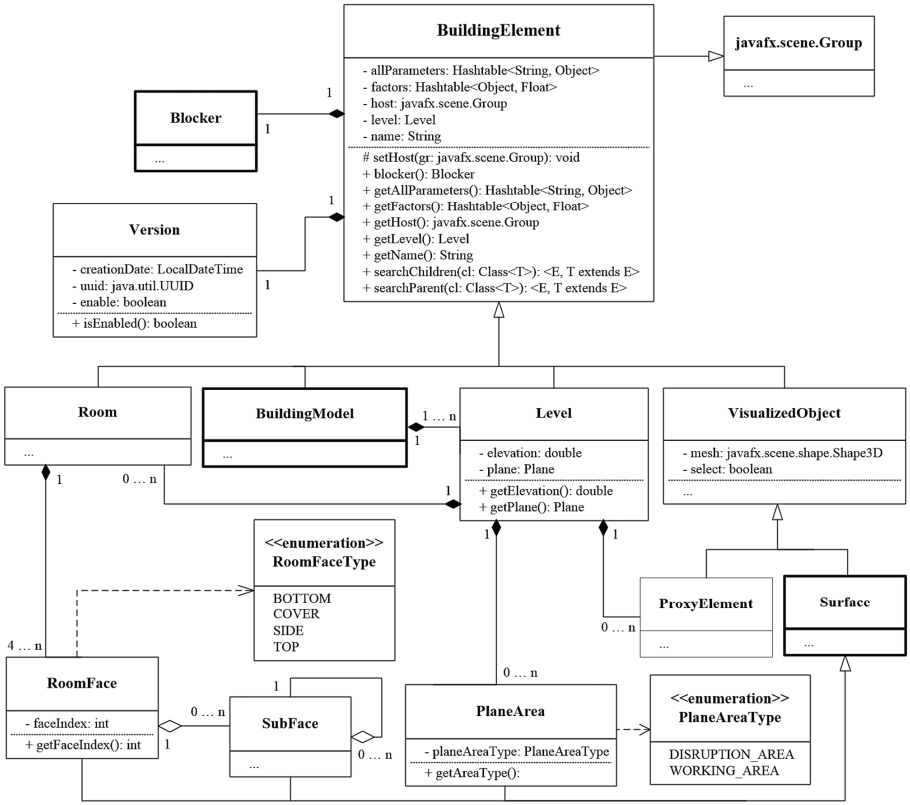


Abbildung 6-9: Klassendiagramm C – Grundbestandteile des Gebäudemodells[1421]

Alle Bauteile, die im oben abgebildeten *Klassendiagramm C* enthalten sind, beschreiben das Gebäudemodell. Sie basieren auf der Klasse *BuildingElement* und erben die Eigenschaften der Klasse ***javafx.scene.Group***.[1422] Die Klasse *BuildingElement* umfasst alle Parameter, die in *Autodesk Revit* den einzelnen Bauteilmodellen zugewiesen wurden. Dies können Texte, Dateien oder Zahlen usw. sein. Ebenso enthält jede Objektinstanz der Klasse *BuildingElement* ein Attribut *factors*, worüber die bauteilorientierten Gewichtungen gem. *Kapitel 5.2.6* definiert werden können. Mit der Klasse ***Version***, die mit der Klasse *BuildingElement* im Zusammenhang steht, lassen sich verschiedene Entwurfsänderungen, abgebildet durch die Bauteilmodelle, unterscheiden. Auf die im *Klassendiagramm H* dargestellte Klasse *Blocker* wird in *Kapitel 6.2.5* näher eingegangen.

[1421] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

[1422] Die Vererbung hat den Vorteil, dass sich die im Gebäudemodell enthaltenen Bauteilmodelle leichter in dem *4D-Viewer* darstellen lassen, der mithilfe der *JavaFX 8-API* entwickelt wurde. Hintergründe zur Klasse *javafx.scene.Group*: https://docs.oracle.com/javase/8/javafx/api/javafx/scene/Group.html [zuletzt abgerufen am 24.03.2018].

Ausgehend von der Klasse *BuildingModel* ist die Modellstruktur ineinander verschachtelt. Hier sind verschiedene Ebenen (***Level***) enthalten, die Höhenkoten, z. B. Geschossebenen oder Podestebenen etc., wiedergeben. Jede Objektinstanz der Klasse *Level* weist eine Höhe *elevation* auf, die eine normal zur Höhenrichtung befindliche Ebene *plane* im virtuellen Raum „horizontal“ ausrichtet. Alle Bauteilmodelle werden über die Klasse *Level* im Gebäudemodell der Klasse *BuildingModel* verteilt. Dabei nutzt jedes Bauteilmodell eine Ebene (*Level*) als Höhenbasis und kann sich von dort aus ggf. über mehrere Ebenen vertikal erstrecken. Anhand der Höhenbasis erfolgt ebenso ihre relative horizontale Ausrichtung auf der Ebene. Dadurch können die Bauteilmodelle inkl. ihrer Informationen im Gebäudemodell topologisch angeordnet werden (siehe *Kapitel 2.2.1*).

Entsprechend wird mit der Klasse ***Room*** ein Raum einer Bauwerksetage (*Level*) zugeordnet, der nach *Kapitel 5.2.2* aus mindestens *4 Raumseiten* (***RoomFace***) bestehen muss. Jede Raumseite kann mehrere Teilflächen (*SubFace*) umfassen. Die Klassen *RoomFace* und *SubFace* erben die Eigenschaften von der Klasse *Surface*, die eine im entwickelten 4D-Viewer sichtbare 2D-Oberfläche definiert. Mit den beiden Klassen *RoomFace* und *SubFace* lassen sich dadurch *geometrische Kollisionsprüfungen*[1423] im 3D-Raum über die entwickelte Schnittstelle *PlaneCollision* durchführen.

Die Klasse ***PlaneArea*** erbt ebenfalls die Eigenschaften der Klasse *Surface*. Mit einer Objektinstanz der Klasse *PlaneArea* ist die Modellierung der in *Kapitel 5.2.4* beschriebenen *Steh- und Störflächen* möglich. Da diese die Eigenschaften der Klasse *Surface* besitzen, können mit ihnen Kollisionsprüfungen gem. *Kapitel 6.2.3* durchgeführt werden. Für ihre Anordnung im Gebäudemodell sind sie mit der Klasse *Level* assoziiert.

Alle Bauteilmodelle, die aus der BIM-Modellierungsumgebung stammen und für die keine explizite Klasse des Gebäudemodells bereitsteht (z. B. Wand-, Tür-, Treppen-, Spundbohlen-, Tisch-Modelle usw.), werden durch die Klasse ***ProxyElement*** abgebildet. Auch sie sind für ihre topologische Anordnung im Gebäudemodell mit der Klasse *Level* verknüpft. Damit sie sich im entwickelten 4D-Viewer als 3D-Elemente darstellen lassen, erbt die Klasse *ProxyElement* alle Eigenschaften der Klasse ***VisualizedObject***.

Auf geometrische Kollisionsprüfungen der Proxy-Elemente wurde weitestgehend verzichtet, da diese im Rahmen der Forschungsarbeit zu umfangreich ausgefallen wären – sie sind jedoch ausbaufähig. Parametrische Geometrien finden in dieser prototypischen Entwicklung keine Berücksichtigung. Sie sind als „nice-to-have“ anzusehen und für diese Arbeit nicht zwingend erforderlich.

[1423] Kollisionsprüfungen sind nicht mit Konfliktprüfungen gem. *Kapitel 5.2.5* zu verwechseln. Bei *geometrischen Kollisionsprüfungen* werden rein mathematische Schnittmengen von geometrischen Gebilden geprüft. Die Vorgehensweise zur Kollisionsprüfung wird im *Kapitel 6.2.3* erläutert.

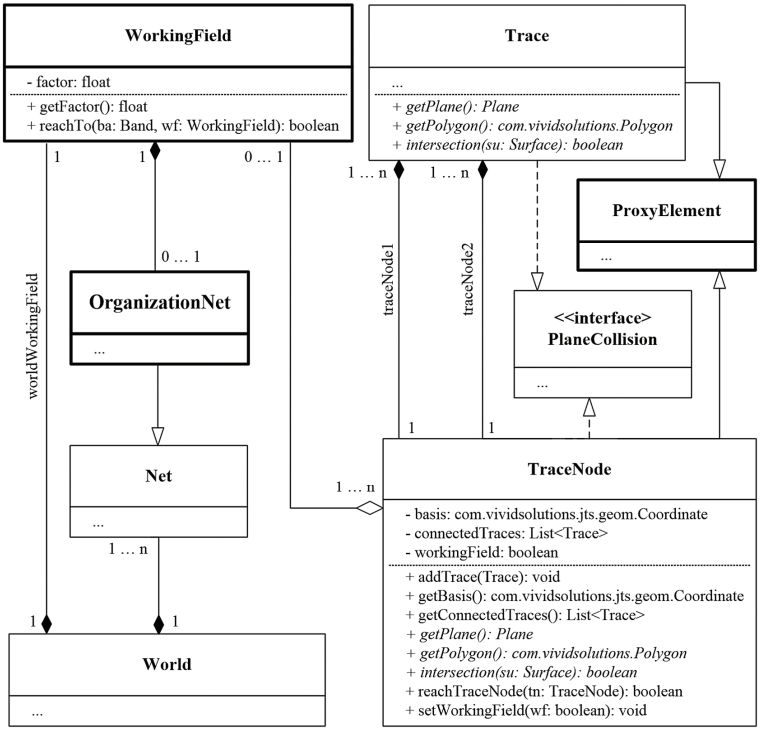


Abbildung 6-10: Klassendiagramm D – Grundbestandteile des Wegenetzes[1424]

In *Abbildung 6-10* ist das *Klassendiagramm D* für das in *Kapitel 5.2.4* beschriebene Wegenetz zu sehen. Ein Wegenetz besteht im Wesentlichen aus den Wegknoten (***TraceNode***), die mit Wegstrecken (***Trace***) verbunden sind. Grundsätzlich liegt eine Wegstrecke zwischen zwei Wegknoten. An jedem Wegknoten können mehrere Wegstrecken anknüpfen, so dass zyklische Strukturen denkbar sind – eine Richtung wird nicht vorgegeben. Die Klassen *Trace* und *TraceNode* erben die Eigenschaften von der Klasse *ProxyElement* und erhalten die Funktionen zur geometrischen Kollisionsprüfung im 3D-Raum durch die Schnittstelle *PlaneCollision* (siehe *Klassendiagramm B* in *Abbildung 6-6*).

[1424] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

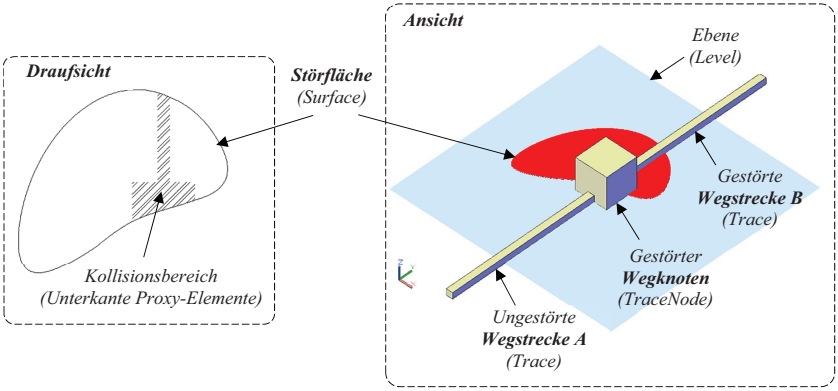


Abbildung 6-11: Kollisionsprüfungen des Wegenetzes[1425]

Bei den Kollisionsprüfungen werden die Unterseiten der geometrischen Objektinstanzen von den Klassen *Trace* und *TraceNode* betrachtet und mathematisch geprüft, ob sie einen Kollisionsbereich besitzen, der sich mit einer Steh- oder Störfläche (definiert durch die Klasse *Surface*) überschneidet.

Abbildung 6-12 veranschaulicht einen Wegknoten, der mit der *Wegstrecke A* und der *Wegstrecke B* verknüpft ist. Die Unterseiten vom Wegknoten und von der *Wegstrecke B* überschneiden eine beliebige Störfläche und definieren dadurch einen *Kollisionsbereich* (siehe Draufsicht). Die *Wegstrecke A* ist von der Störfläche nicht betroffen, da sie diese nicht schneidet.

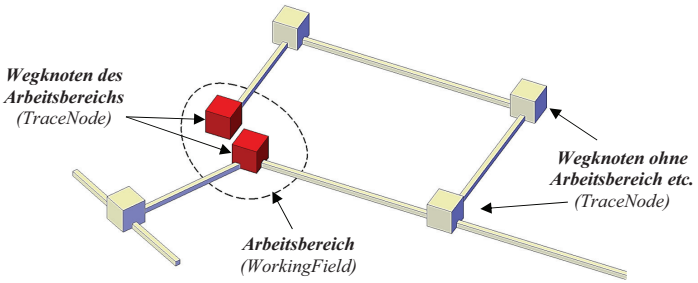


Abbildung 6-12: Schematische Darstellung des Wegenetzes mit einem WorkingField[1426]

Die Klasse ***WorkingField*** stellt ein Element aus dem Prozessmodell dar und ist mit dem Geometriemodell verknüpft. Mit einem *WorkingField* wird in Anlehnung an *Kapitel 5.2.4* ein Arbeitsbereich beschrieben. In einem einzelnen Arbeitsbereich können mehrere Wegknoten zusammengefasst werden, auch wenn sie nicht miteinander verknüpft sind (siehe *Abbildung 6-12*). Sie sollten sich möglichst in einer topologischen Nähe zueinander befinden. Für den entwickelten Simulationsalgorithmus ist es erforderlich, dass die Klasse *World*

[1425] Eigene Darstellung.
[1426] Eigene Darstellung.

grundsätzlich ein *WorkingField* erhält, das als ***WorldWorkingField*** bezeichnet wird. Es stellt einen theoretischen Ausgangspunkt des Wegenetzes dar, mit dem sich die Erreichbarkeit der im Gebäudemodell verteilten Arbeitsbereiche prüfen lässt. Die Klasse *WorkingField* ist ein Element des Prozessmodells.

6.2.5 Struktur des Prozessmodells

Mit dem *Klassendiagramm E* der *Abbildung 6-13* wird für das Prozessmodell (*ProcessModel*) eine *Aufbaustruktur des Projekts* beschrieben, mit der sich Unternehmen (***Company***) und ihre jeweiligen Gewerke (***Construction***) gliedern lassen. Entsprechend kann das Prozessmodell mehrere Unternehmen und diese wiederum mehrere Gewerke zusammenfassen.

Neben der eher unternehmensbezogenen Aufbaustruktur gliedert sich diese weiter in variable baubetriebliche und vertragliche Leistungspositionen. Hierfür können ineinander verschachtelte Objektinstanzen der Klasse ***Category*** frei wählbar den zuvor erstellten Gewerken zugeordnet werden. Dies dient zur Kategorisierung von REFA-Ablaufabschnitten, LV-Positionen und geometrischen Strukturierungen der Arbeitsaufgaben in Abschnitte etc. – im Sinne von Arbeitspaketen. Eine Objektinstanz *Category* ist in der Lage, beliebig viele Objekte ihrer eigenen Klasse zu umfassen.

Die Klasse ***Production*** verkörpert die geometrischen Produktionsbereiche im Gebäudemodell. Sie müssen einer beliebigen Objektinstanz der Klasse *Category* zugewiesen werden. Grundsätzlich können in einer *Category* mehrere *Productions* enthalten sein. Letztere sind für die geometrische Anordnung im Geometriemodell mit der Klasse *WorkingField* assoziiert (siehe *Abbildung 6-9* i. V. m. *Abbildung 6-10*). In diesem Wegknoten sind die elementaren Arbeitsaufgaben (***Task***) als Produktions- bzw. Ausführungsprozesse definiert und topologisch im Gebäudemodell verteilt. Dafür besteht die Möglichkeit, dass eine Objektinstanz der Klasse *Production* für ihren topologischen Arbeitsbereich (*WorkingField*) mehrere Objektinstanzen der Klasse *Task* zusammenfasst (siehe *Abbildung 6-13* bzw. die schematischen Skizzen von *Abbildung 6-14* und *6-18*).

In der *Abbildung 6-14* wird eine konzeptionelle Aufbaustruktur von den zuvor beschriebenen Bestandteilen des Prozessmodells dargestellt, die im *Klassendiagramm E* enthalten sind. Auf die Darstellung der elementaren Arbeitsaufgaben (*Task*) wird in der späteren *Abbildung 6-18* näher eingegangen.

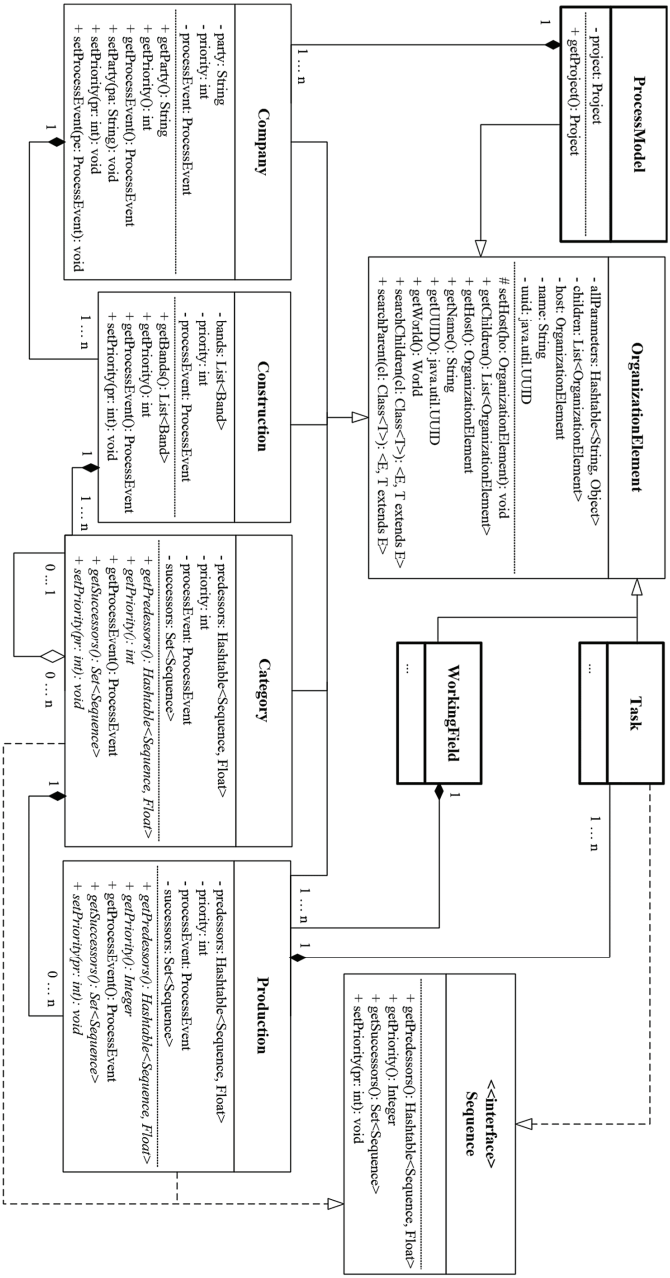


Abbildung 6-13: Klassendiagramm E – Grundbestandteile des Prozessmodells[1427]

[1427] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

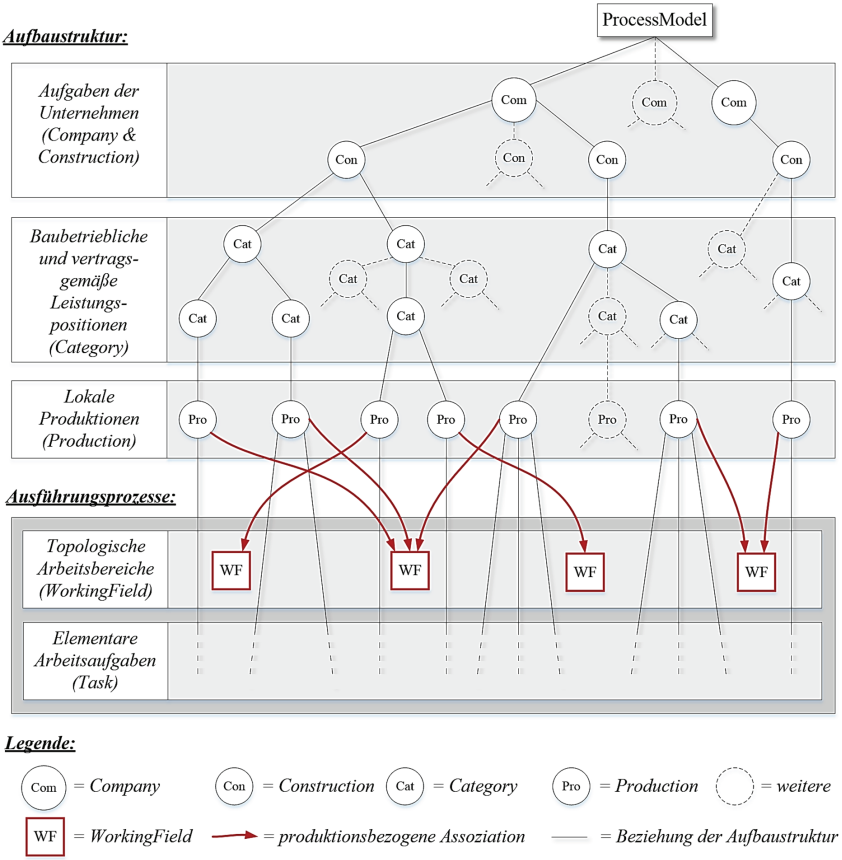


Abbildung 6-14: Skizze einer möglichen Aufbaustruktur des Prozessmodells[1428]

Ein Großteil der in *Abbildung 6-13* gezeigten Klassen weist ein Attribut der entwickelten Klasse ***ProcessEvent*** auf. Sie eignet sich zur technischen Umsetzung von Segmenten der Vorgangsintervalle vom entworfenen Darstellungskonzept in *Kapitel 5.1.3*.

Mit dem Attribut *information* der Klasse *Information* kann ein *ProcessEvent* auf belegbare Dokumente, Kommentare usw. verweisen. Dazu kann über die Klasse *Information* auf ein Datenbanksystem zugegriffen werden. Ein *ProcessEvent* beinhaltet und verwaltet zudem zwei aneinander gekoppelte Termine und gewährleistet u. a. die doppelten Start- sowie Endbedingungen der in *Kapitel 5.1.3* beschriebenen Vorgangsintervalle.[1429]

[1428] Eigene Darstellung.
[1429] Ein Vorgangsintervall besitzt somit ein *ProcessEvent* als Start- und ein *ProcessEvent* als Endbedingung.

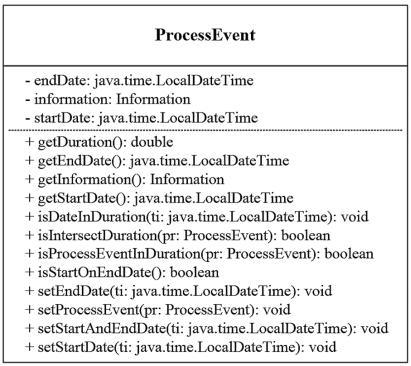
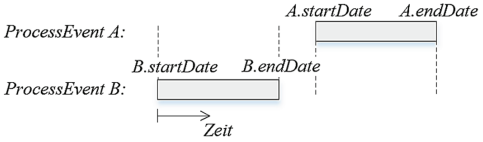
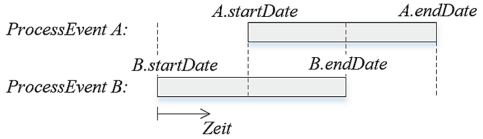
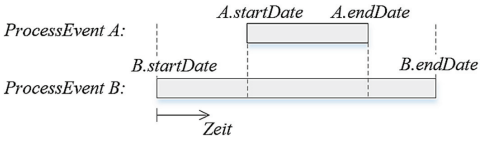
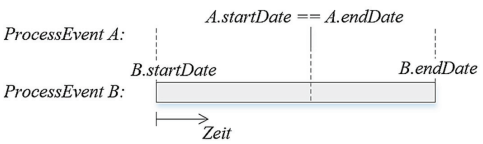


Abbildung 6-15: Entwickelte Klasse ProcessEvent zur zweiteiligen Terminorganisation[1430]

Mit einem *ProcessEvent* können Zeitkollisionen ermittelt werden. Die folgende *Tabelle 6-1* zeigt verschiedene Überschneidungsfälle mit den entsprechenden Funktionsergebnissen der Klasse *ProcessEvent* beispielhaft auf, deren Inhalte im Zusammenhang mit der *Abbildung 6-15* zu betrachten sind.

Tabelle 6-1: Messung von Zeitkollisionen mithilfe der Klasse ProcessEvent[1431]

Zeitliche Überschneidungsfälle	Ergebnisse der Zeitkollision
	*A.interSectionDuration(B) → false* *A.isProcessEventInDuration(B) → false* *A.isDateInDuration(B.getStartDate()) → false* *A.isDateInDuration(B.getEndDate()) → false*
	*A.isIntersectionDuration(B) → true* *A.isProcessEventInDuration(B) → false* *A.isDateInDuration(B.getStartDate()) → false* *A.isDateInDuration(B.getEndDate()) → true*
	*A.isIntersectionDuration(B) → true* *A.isProcessEventInDuration(B) → false* *B.isProcessEventInDuration(A) → true* *A.isDateInDuration(B.getStartDate()) → false* *A.isDateInDuration(B.getEndDate())→ false*
	*A.isIntersectionDuration(B) → true* *A.isProcessEventInDuration(B) → false* *B.isDateInDuration(A.getStartDate()) → true* *A.isStartOnEndDate() → true* *B.isStartOnEndDate() → false*

[1430] Eigene Darstellung. *Staud* erläutert die Hintergründe von Klassen in UML-Darstellungen. Vgl. Staud, 2010: S. 21 ff.
[1431] Eigene Darstellung.

Insgesamt verfügt jedes *ProcessEvent* über die zwei Attribute *startDate* und *endDate* der Klasse *java.time.LocalDateTime*. Hiermit sind terminweise Berechnungen möglich. Entsprechend kann der Anwender durch den Einsatz der Klasse *ProcessEvent* für alle modellierten Bestandteile der in *Abbildung 6-16* gezeigten Aufbaustruktur eine „doppelte" Startbedingung (z. B. zur Definition von Anfangsverzögerungen) bestimmen.[1432]

Die Klasse *ProcessEvent* unterstützt eine ständige Sortierung der beiden Termine *startDate* und *endDate*. Das heißt, der früheste der beiden Termine ist immer als *startDate* und der späteste immer als *endDate* abrufbar. Zur Fortschreibung der Ablaufstruktur wird permanent der späteste der beiden Termine – also *endDate* – als maßgeblicher Termin berücksichtigt.

Sobald ein *ProcessEvent* nur einen Termin erhält, ist dieser durch die beiden Terminattribute *startDate* und *endDate* abrufbar. Da die Bestandteile der Aufbaustruktur ineinander verschachtelt sind, lassen sich aus ihren Startbedingungen „starre" Reihenfolgen ableiten. In der *Abbildung 6-16* werden diese durch die Aufbaustruktur eines beispielhaften Bauprojekts veranschaulicht. Sie gliedern sich in die sechs Hierarchiestufen:

1. „Projekt" (Project),
2. „Unternehmen" (Company),
3. „Gewerk" (Construction),
4. „LV-Pos." (Category),
5. „Arbeitsbereich" (Production) und
6. „Aufgabe" (Task).

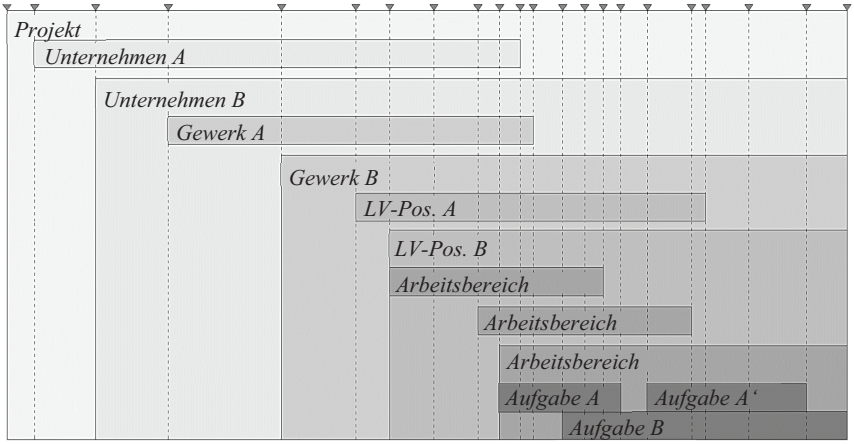


Abbildung 6-16: Beispielhafte Projektstruktur mit den Startbedingungen aus der Aufbaustruktur[1433]

Jedes der in der *Abbildung 6-16* gezeigten Vorgangsintervalle kann einen eigenen und/oder mehrere Starttermin(e) voraussetzen. Der Anfangstermin von einem umschließenden Vorgangsintervall stellt immer eine Startbedingung für seine internen Vorgangsintervalle dar.

[1432] Siehe Vorüberlegungen in *Kapitel 5.1.3* und *Kapitel 5.1.4*.
[1433] Eigene Darstellung.

Das heißt, falls ein internes Element keinen eigenen Starttermin besitzt, nimmt es den Starttermin des übergeordneten Elements an.

Grundsätzlich ist der frühestmögliche Beginn eines internen Vorgangsintervalls der späteste Termin aller übergeordneten Startvoraussetzungen. Daher kann die „Aufgabe A“ nur beginnen, wenn der „Arbeitsbereich C“, die „LV-Pos. B“, das „Gewerk B“ und das „Unternehmen B“ nach dem Starttermin des Projekts begonnen haben. Durch diese Rangfolge beginnen die Vorgangsintervalle entweder zeitgleich oder sind zueinander relativ zeitlich versetzt. Die Startbedingungen der Aufbaustruktur geben daher die Ausgangslage für eine feinere Ablaufstruktur vor.

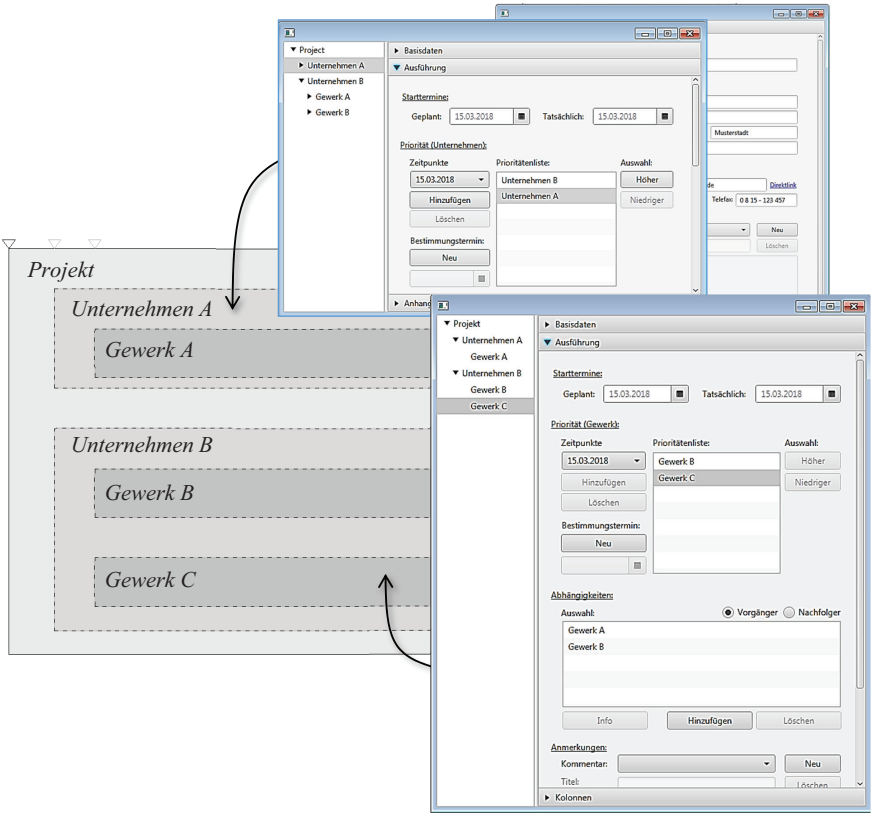


Abbildung 6-17: Konzeptionelle Eingabemasken[1434]

Generell ist die Projektstruktur beliebig gestaltbar. Zum Beispiel ist eine feingliedrigere Strukturierung der Aufgaben möglich, die in *Abbildung 6-17* als Vorgangsintervalle dargestellt sind. Um den Modellierungsaufwand zu senken, sind *Projektstrukturvorlagen* denkbar, die der Anwender für den Einzelfall weiter ausgestalten kann.[1435] Diese terminierten

[1434] Eigene Darstellung.

[1435] Eine entsprechende Umsetzung wurde erfolgreich mit dem prototypischen *2D-Tool* auf Quellcodeebene getestet.

Startvoraussetzungen erlauben gem. *Kapitel 5.2.8* die Modellierung von *zeitabhängigen Modifikationen*.

Die im *Klassendiagramm E* enthaltene Schnittstelle ***Sequence*** erlaubt die Modellierung ***technologischer Abhängigkeitsbeziehungen*** der *Ablaufstruktur* (siehe *Kapitel 3.2.1*). Sie sorgt dafür, dass u. a. alle Objektinstanzen der Klassen *Category*, *Production* und *Task* durch den Anwender beliebig miteinander in eine gewollte Prozessreihenfolge verknüpft werden können. Dazu implementieren diese Klassen die Schnittstelle *Sequence*. Mit ihr können die Abhängigkeitsbeziehungen für Vorgänger über *getPredessors()<Sequence, Float>* definiert werden. Mit dem Zahlenwert (*Float*) lässt sich der prozentuale Leistungsstand eines Vorgängers (*Sequence*) bestimmen, woran ein anderes *Sequence*-Element anknüpfen soll. Hierüber ist die Modellierung von *prozessabhängigen Modifikationen* gem. *Kapitel 5.2.8* möglich. Allerdings kann aufgrund des Modellentwurfs nur ein prozentualer Leistungsstand für Objektinstanzen der Klasse *Task* vorgegeben werden. Bei den anderen Klassen *Category* und *Production* liegt der Wert standardmäßig bei *1,0* – also bei *100 %* Leistungsfortschritt. Hingegen werden Nachfolger mit *getSuccessors()<Sequence>* für die erforderlichen Abhängigkeitsbeziehungen gebildet. Die Abhängigkeitsbeziehungen können optional zueinander gewählt werden. Bei dem hier entwickelten Lösungsansatz werden identische Verknüpfungen auf eine einzelne Abhängigkeitsbeziehung reduziert. Vorrang haben durchgängig Vorgänger-Verknüpfungen.

Der Anwender darf keine zyklischen Prozessreihenfolgen definieren, da das entworfene Petri-Netz-Modell sonst nicht ausführbar wäre. Zyklische Abhängigkeiten können sich nur über Bewegungen der Agenten einstellen. Zur Veranschaulichung ist in der *Abbildung 6-14* eine inhaltliche Erweiterung der in *Abbildung 6-18* gezeigten *Aufbaustruktur* zu sehen. Die mit der Schnittstelle *Sequence* definierbaren Prozessreihenfolgen werden dort durch größere Pfeile dargestellt. Innerhalb der Abbildung ist eine „gestreckte“ *Ablaufstruktur* enthalten, bei der die Bestandteile der Aufbaustruktur durch zeitdiskrete Knoten – also ohne Zeitdauern – hintereinander angeordnet sind.

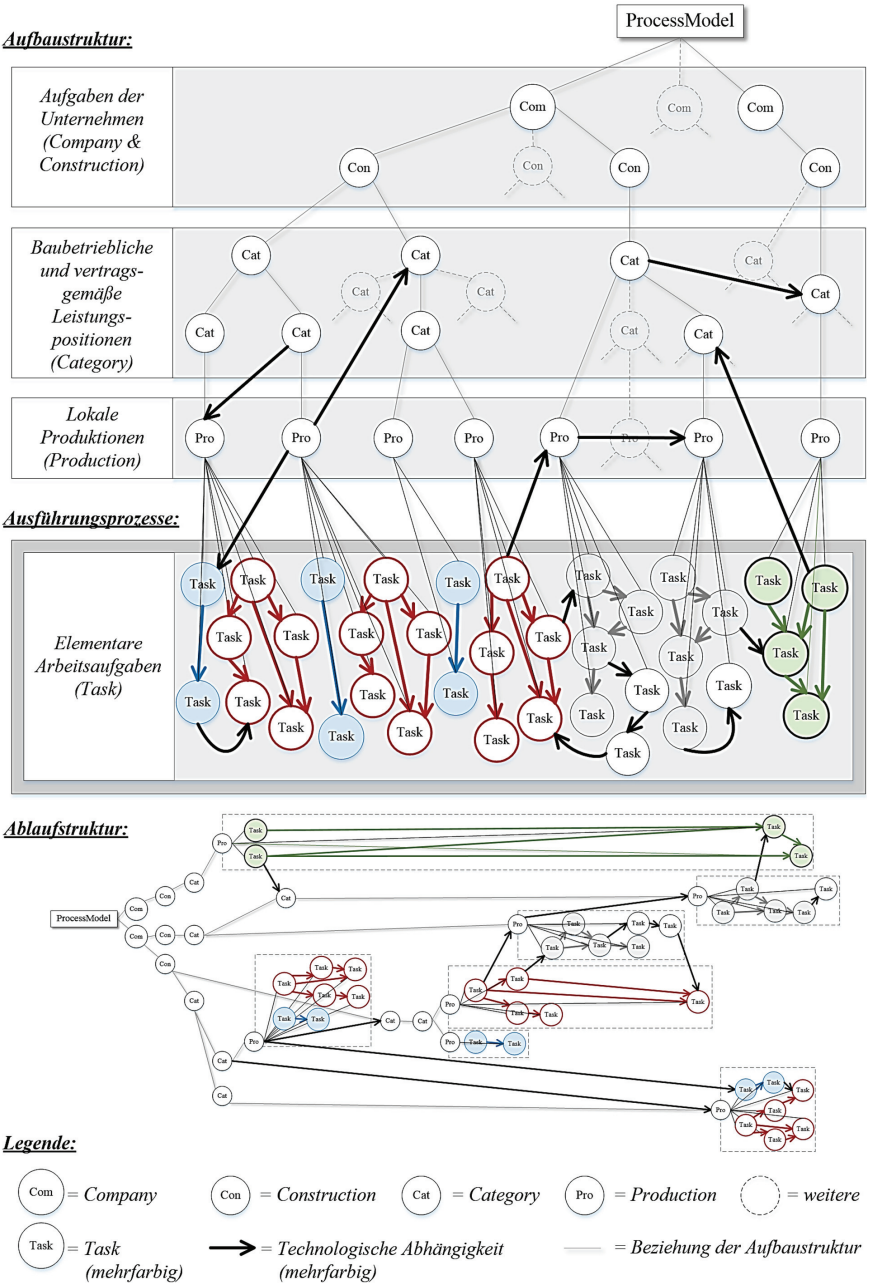


Abbildung 6-18: Mögliche Abhängigkeiten der Aufbau- und Ablaufstruktur[1436]

[1436] Eigene Darstellung.

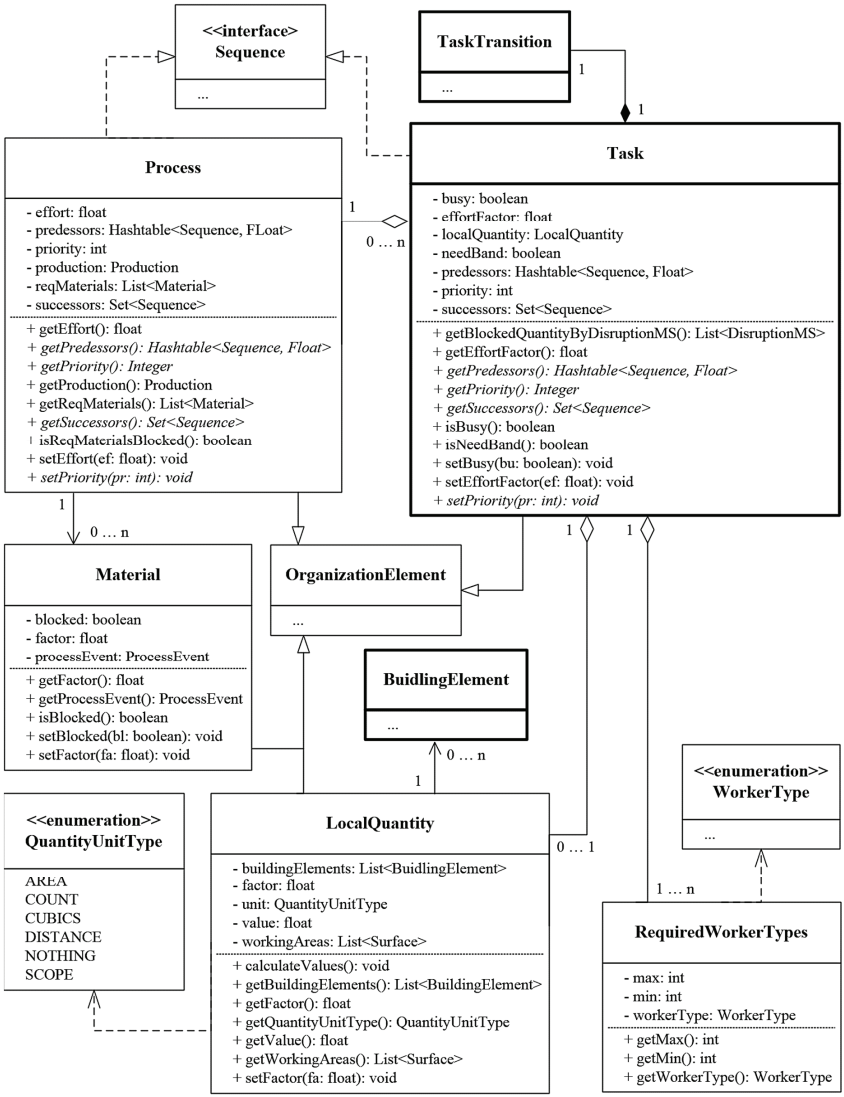


Abbildung 6-19: Klassendiagramm F – Grundbestandteile einer Arbeitsaufgabe (Task)[1437]

Im *Klassendiagramm F* dient die Klasse *Task* zur Definition von Arbeitsaufgaben. Sie steht mit der Klasse ***LocalQuantity*** in einem Zusammenhang, mit der die lokale Produktionsstätte für eine Arbeitsaufgabe (*Task*) durch Stehflächen mit dem Attribut *workingAreas* (*Surface*) sowie Mengenanteile beliebiger Bauteilmodelle (*BuildingElement*) zusammengefasst werden (siehe *Abbildung 5-22*). Jede Objektinstanz der Klasse *Task* kann maximal eine Objektinstanz

[1437] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

der Klasse *LocalQuantity* erhalten. Die dort entnehmbaren Mengenanteile sind für spätere Vorgangsberechnungen abrufbar. Objektinstanzen der Klasse *LocalQuantity* besitzen das Attribut *factor*, mit dem die Gewichtung lokaler Mengenanteile von einer Arbeitsaufgabe möglich ist.

Darüber hinaus steht die Klasse *Task* mit der Klasse ***Process*** im Zusammenhang. Mit ihr werden die allgemeinen Produktivitätseigenschaften der Arbeitsaufgaben formuliert, die allerdings von den Bauteilmodellen (*BuildingElement*) unabhängig sind. Weiterhin beinhaltet die Klasse *Process* das Attribut *effort* zur Eingabe eines Zeitaufwandswerts. Dieser Zeitaufwandswert entspricht den Darstellungen im *Kapitel 5.2.6*. Ebenso ist es möglich, dass einer Objektinstanz der Klasse *Process* mehrere erforderliche Baumaterialien und Betriebsmittel durch weitere Objektinstanzen der Klasse ***Material*** zugewiesen werden. Letztere beinhaltet ebenfalls einen Gewichtungsfaktor *factor* sowie ein *ProcessEvent* zur Definition zeitlicher Verfügbarkeiten. Eine Objektinstanz der Klasse *Material*, die akut genutzt wird, lässt sich durch das boolesche Attribut *blocked* kennzeichnen.

Prinzipiell erlaubt die Klasse *Process* eine freie Gestaltung von Prozessvorlagen, mit denen einheitliche Strukturen technologischer Abhängigkeiten vordefiniert werden können. Die Strukturen beschreiben jene Abhängigkeiten, die sich innerhalb bestimmter Produktionsstätten (*LocalQuantity*) wiederholen sollen.[1438] Dafür greift die Klasse *Process* auf die Schnittstelle *Sequence* zu, so dass sich hierüber die konkreten Objektinstanzen der Klasse *Task* in eine lokale Prozessreihenfolge überführen lassen. Diese können für ein beliebiges *WorkingField* über die Klasse *Production* in das Prozessmodell integriert werden (siehe Klassendiagramm E). Für diese Zuordnung verfügt die Klasse *Process* über das Attribut *production*. Die Nutzung von Prozessvorlagen ist exemplarisch in der *Abbildung 6-18* dargestellt. Hier sind beispielhaft einheitliche Strukturen verschiedener Task-Elemente in unterschiedlichen Production-Elementen anhand der Einfärbungen zu sehen.

In der Klasse *Task* werden alle wesentlichen Bestandteile zusammengeführt, die für die lokale Produktion einer virtuellen Arbeitsaufgabe erforderlich sind. Dadurch hält sie die geometrischen und die prozessbezogenen Inputfaktoren bereit, die erst durch die Agenten in der späteren Simulation abgearbeitet werden.[1439] Die Klasse *Task* verfügt über den im *Kapitel 5.2.6* beschriebenen *gewichteten Zeitaufwandswert* Aw_{mod} durch das Attribut ***effortFactor***. Der Wert des Attributs *effortFactor* wird innerhalb der Übergangsfunktion einer spezialisierten Transition ***TaskTransition*** ermittelt. Sie greift dafür auf die Bestandteile einer Objektinstanz der Klasse *Task* zu und berücksichtigt in den Berechnungen die bauablaufbezogenen Baustellensituationen, die sich infolge eines Simulationslaufs einstellen (siehe *Kapitel 6.3.6 ff.*). Dem Anwender wird mit der Klasse ***RequiredWorkerTypes*** die Möglichkeit gegeben, für die lokalen Produktionsstätten eine geometrisch bedingte minimale oder maximal zulässige Anzahl von Arbeitskräften zu bestimmen. Hiermit können nicht nur die Anzahl, sondern auch die Kategorien dieser Arbeitskräfte (***WorkerTypes***) vorgegeben werden. Da die Klasse *Task* mehrere Objektinstanzen der Klasse *RequiredWorkerTypes* umfassen kann, ist eine lokale Einschränkung durch die Kombination verschiedener und zulässiger Arbeitskräfte je Arbeitsaufgabe möglich. Erst durch die Berücksichtigung von

[1438] Ansätze, bei denen Prozessreihenfolgen für alle Arbeitsbereiche (*WorkingField*) gelten sollen, wurden im Rahmen der Arbeit nicht ausgearbeitet. So eine Umsetzung sollte durch einen unterstützenden Automatismus prinzipiell möglich sein.

[1439] Siehe *Kapitel 6.3.2*.

Kapazitäten – die in der Simulation durch Agenten dargestellt werden – ist die endgültige Ablaufstruktur eines Bauablaufmodells ermittelbar. Sie stellt sich neben den oben vorgestellten technologischen Abhängigkeitsbeziehungen auch durch die Agentenbewegungen und die verfügbaren Ressourcen inkl. diverser Konfliktsituationen ein.

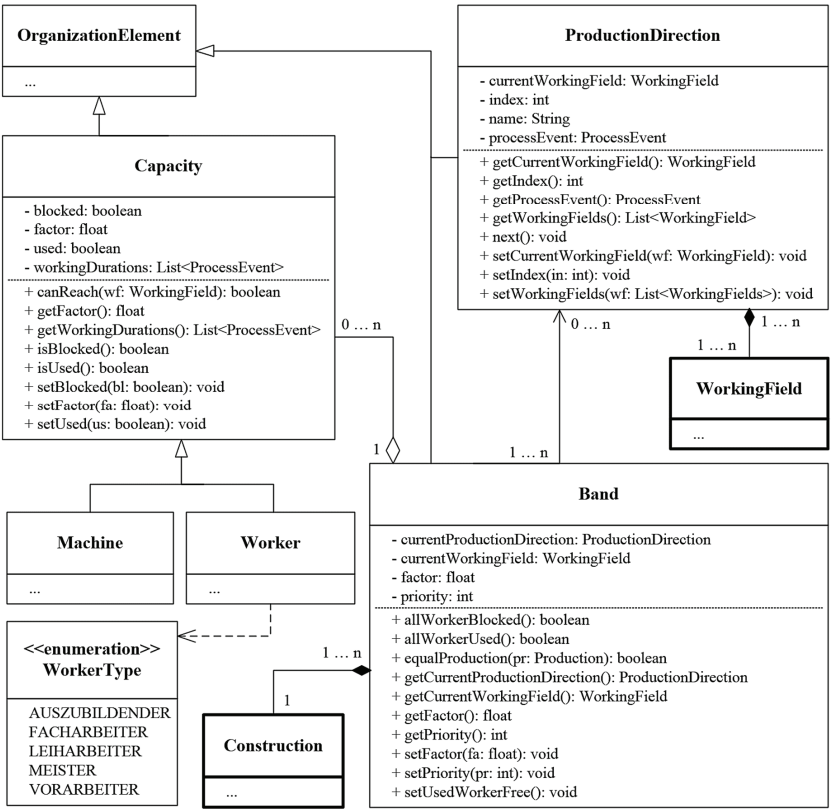


Abbildung 6-20: Klassendiagramm G – Grundbestandteile einer Kolonne (Band)[1440]

Den Ausgangspunkt möglicher Kapazitäten innerhalb des Prozessmodells bildet die Klasse ***Capacity***. Die Objektinstanzen dieser Klasse stellen die späteren Agenten dar. Sie verfügen über Attribute, mit denen die Arbeitszeit durch prozessabhängige Konfliktsituationen innerhalb der Simulation organisiert werden können. Das Attribut *used* gibt Auskunft darüber, ob eine Objektinstanz der Klasse *Capacity* gerade „arbeitet" und das Attribut *blocked*, ob es am Arbeiten gehindert wird. Darüber hinaus verfügen sie mit der Funktion *canReach(wf: WorkingField)* über eine eigene Wegfindungs-Logik. Der Agent nutzt die Funktion zum Überprüfen, ob er von seinem aktuellen Standpunkt (*WorkingField*) aus einen anderen Standpunkt (*WorkingField*) erreichen kann und gibt Auskunft über das

[1440] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

Vorhandensein einer geeigneten Route. Dabei erfolgt eine rekursive Abfrage aller möglichen Wegstrecken (*Trace*) und Wegknoten (*TraceNode*) des Wegenetzes. Zusätzlich werden geometrische Kollisionsprüfungen des Wegenetzes der *geblockten Bauteilmodelle*[1441] von den lokalen Produktionsstätten – also Steh- und Arbeitsflächen im *LocalQuantity* – durchgeführt. Sobald eine Route ohne geometrische Kollision gefunden wird, liegt eine Erreichbarkeit vor. Mit dem Attribut *workingDurations* erhält der Agent seine terminweisen Arbeitszeiten und durch das Attribut *factor* die Gewichtung seiner Produktivität.

Innerhalb des Prozessmodells werden entweder Baugeräte (***Machine***) oder Arbeitskräfte (***Worker***) als Kapazität definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund der Ausbauarbeiten insbesondere die Klasse *Worker* näher betrachtet. Hingegen unterblieben differenzierte Erwägungen der Klasse *Machine*. So stellen die Objektinstanzen der Klasse *Machine* allenfalls ihre Verfügbarkeiten dar. Jede Arbeitskraft (*Worker*) kann mithilfe der Enumeration *WorkerType* einer bestimmten Kategorie zugewiesen werden.

Grundsätzlich ist eine einzelne Kapazität (*Capacity*) ein Bestandteil einer Kolonne (***Band***). Das Prozessmodell setzt voraus, dass eine solche Kolonne einem bestimmten Gewerk (*Construction*) zugeordnet wird. Jede Kolonne kann beliebig viele Kapazitäten enthalten. Im Rahmen der entwickelten Simulation werden über die Klasse *Band* die dort enthaltenen Kapazitäten gesteuert und verteilt. Genau wie eine einzelne Kapazität verfügt eine Kolonne über ein Attribut *factor* zur Gewichtung der Gesamtproduktivität einer Kolonne.

Jede Kolonne kann auf verschiedene Fertigungsrichtungen (***ProductionDirection***) zugreifen. Eine Fertigungsrichtung setzt sich aus einem Mehrtupel von unterschiedlich vielen Objektinstanzen der Klasse *WorkingField* zusammen. Zur Erledigung ausstehender Arbeitsaufgaben verfolgen die Kapazitäten der Kolonne nur *eine* der Fertigungsrichtungen. Innerhalb der Klasse *Band* wird diese dem Attribut *currentProductionDirection* zugewiesen. Darauf greifen die Kapazitäten zu. Für die Definition des zeitlichen Vorhandenseins einer Fertigungsrichtung verfügt die Klasse *ProductionDirection* über ein *ProcessEvent*.

[1441] Siehe *Kapitel 6.2.4*.

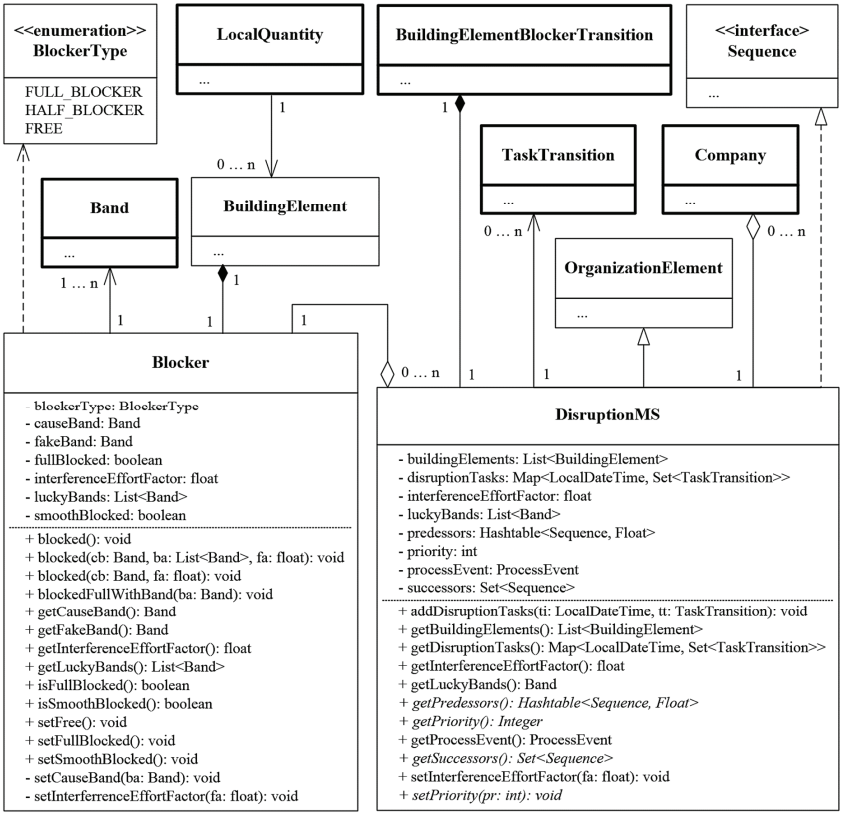


Abbildung 6-21: Klassendiagramm H – Grundbestandteile für gestörte Objekte[1442]

Mit den im *Klassendiagramm H* dargestellten Klassen werden geometrie- und terminabhängige Konflikte in die simulierten Produktionsabläufe eingebracht. Hiermit lassen sich Störungssachverhalte gem. *Kapitel 5.2.4* simulieren, die entweder aus situativen Bedingungen des Simulators oder auf Grundlage anwenderbezogener Vorgaben entstehen.

Die Klasse ***Blocker*** dient zur Berücksichtigung geometrischer Konfliktsituationen. Mit ihr kann die Produktivität einer Arbeitsaufgabe anhand der Bauteilmodelle (*BuildingElement*) des Gebäudemodells zeitdiskret für bestimmte Kapazitäten (*Capacity*) einer Kolonne (*Band*) verändert werden. Das Prinzip der Klasse *Blocker* beruht auf der Überlegung, dass ein bestimmtes Bauteilmodell für eine Kapazität blockiert ist, wenn eine ihr *fremde* Kolonne dieses für sich beansprucht und keine weitere Ausnahmeregelung besteht. In der Umsetzung prüfen die Agenten zunächst über die Fertigungsrichtung (*ProductionDirection*) ihrer Kolonne, ob sie die jeweiligen Arbeitsbereiche (*WorkingField*) erreichen. Dazu werden geeignete Routen des Wegenetzes (*Trace* und *TraceNode*) untersucht, die zur lokalen Produktionsstätte führen. Ebenso prüfen sie, ob die Stehflächen (*Surface*) sowie die

[1442] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

Bauteilmengen (*BuildingElement*) einer Arbeitsaufgabe (*Task*), definiert über ihre lokale Produktionsstätte (*LocalQuantity*), geblockt oder zugänglich sind.

In der Ablauflogik gilt allgemein die Regel, dass nur Ausführungsarbeiten, an denen Arbeitskräfte beteiligt sind, geometrisch gestört werden können. Daher prüfen die Agenten während der Simulation die Gültigkeit einer geometrischen Konfliktsituation über das Vorhandensein einer akuten Blockierung eines Bauteilmodells. Gemäß *Kapitel 6.2.3* erfolgt die Blockierung über 2D-Flächen im virtuellen 3D-Raum.

Aus Gründen der Performance werden die im *Kapitel 6.2.3* vorgestellten geometrischen Kollisionen *vorab* vorgenommen und *nicht während* eines Simulationslaufs. Dementsprechend überprüft ein Algorithmus alle Flächen, die sich auf einer mathematischen Ebene innerhalb der gesamten 3D-Geometrie befinden, auf Überschneidungen und somit auf *mögliche* geometrische Kollisionen. Die Flächen, bei denen eine Überschneidung vorliegt, werden als Subfläche erfasst und der aktuell betrachteten Fläche zugewiesen. Das Prinzip der Überschneidungsflächen und der daraus ableitbaren Subflächen wird durch die *Abbildung 6-22* in Verbindung mit der *Tabelle 6-2* veranschaulicht.

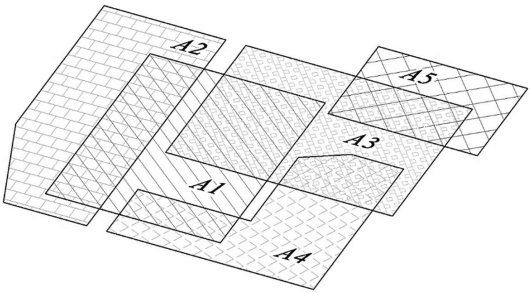


Abbildung 6-22: Beispiel für Flächenzuweisungen geometrischer Konfliktprüfungen[1443]

In Anlehnung an *Abbildung 6-22* weist der oben genannte Algorithmus den Flächen folgende Subflächen gem. *Tabelle 6-2* zu:

Tabelle 6-2: Flächenzuweisungen geometrischer Konfliktprüfungen[1444]

Fläche	Subflächen
A1	A2, A3, A4
A2	A1
A3	A1, A4, A5
A4	A1, A3
A5	A3

Durch die Zuweisungen besteht der Vorteil, dass die Agenten in den späteren Simulationsläufen für das Vorhandensein einer geometrischen Konfliktsituation einer Fläche nur noch ihre Subflächen zu prüfen brauchen, ob diese durch Kapazitäten von einer anderen

[1443] Eigene Darstellung.
[1444] Eigene Darstellung.

Kolonne blockiert sind oder nicht. Beispielsweise ist der Zutritt auf die Fläche *A1* für einen Agenten nicht möglich, wenn bereits eine der drei Subflächen *A2*, *A3* oder *A4* entsprechend als *blockiert* gekennzeichnet ist. Die geometrischen Konflikte werden auf diese Weise im 3D-Raum überprüft. Ebenso wird dieses Prinzip für geometrische Konfliktsituationen von Wandseiten oder beim Wegenetz angewandt.

Überdies können sich durch den Einsatz der Klasse *Blocker* parallel arbeitende Kapazitäten gegenseitig beeinflussen. Eine lokale Produktionsstätte (*LocalQuantity*) ist nicht zugänglich, wenn sie durch Kapazitäten einer anderen Kolonne besetzt ist. Auf Quellcode-Ebene wird dieser Ansatz zur Modifizierung einer Störfläche genutzt, bei der eine „Fake-Kolonne" die entsprechende Blockierung als Hilfsgröße vornimmt. Hierzu ist in der Klasse *Blocker* standardmäßig eine Objektinstanz *fakeBand* der Klasse *Band* enthalten, die sich keinem Gewerk zuordnen lässt und für den Anwender unsichtbar bleibt.

Generell erfolgt das gegenseitige Blocken der Kapazitäten mit dem Attribut *interferenceEffortFactor* der Klasse *Blocker*. Für eine *vollständige* Blockierung muss diese Variable den Wert *1,0* erhalten. Sobald für andere Arbeitsaufgaben (*Task*) eine geometrische Kollision mit dem geblockten Bauteilmodell (*BuildingElement*) vorliegt, findet keine Berechnung der ausstehenden Vorgangsdauer statt, d. h., die Kolonne wird in der lokalen Produktionsstätte blockiert. Bei einem *teilweisen* Blocken findet eine faktorielle Hemmung der Arbeitsaufgabe statt. Dazu ist der Wert der Variablen innerhalb der Bandbreite [*0 < interferenceEffortFactor < 1,0*] durch den Anwender zu setzen. Alle Kolonnen, die ihre Arbeitsaufgaben in einer lokalen Produktionsstätte durchführen müssen und in der Liste *getLuckyBands()* enthalten sind, werden grundsätzlich nicht blockiert. Entsprechend ignorieren sie jegliche faktorielle Beeinträchtigungen einer lokalen Produktionsstätte. Diese Funktion wird standardmäßig dafür genutzt, dass die Kolonnen desselben Gewerks sich nicht gegenseitig in ihrer Ausführung stören. Das Blocken erfolgt während des Simulationslaufs zeitdiskret, sobald eine der Funktionen von der Klasse *Blocker* aufgerufen wird. Die *Tabelle 6-3* liefert hierfür folgende Möglichkeiten:

Tabelle 6-3: Blockier-Funktionen der Klasse Blocker[1445]

Funktion	Betrifft
blocked()	Blockierung einer oder mehrerer Objektinstanzen der Klasse *BuildingElement* (bspw. von einer Produktionsstätte oder Störfläche) mit einer Fake-Kolonne
blocked(cb: Band, fa: float)	Blockierung einer oder mehrerer Objektinstanzen der Klasse *BuildingElement* (bspw. von einer Produktionsstätte oder Störfläche) mit *einer* konkreten Kolonne und einem bestimmten Wert für das Attribut *interferenceEffortFactor*
blocked(cb: Band, lb: List<Band>, fa: float)	Blockierung einer oder mehrerer Objektinstanzen der Klasse *BuildingElement* (bspw. von einer Produktionsstätte oder Störfläche) mit *einer* konkreten Kolonne und einem bestimmten Wert für das Attribut *interferenceEffortFactor* sowie eine Menge von Kolonnen für die Liste *getLuckyBands()*.

Die Klasse ***DisruptionMS*** eignet sich zur Einarbeitung terminabhängiger Konfliktsituationen, die bedarfsweise mit den Eigenschaften der Klasse *Blocker* kombiniert werden können. Sie ist zur Modellierung außerplanmäßiger Störungssachverhalte anzuwenden, bei denen ein

[1445] Eigene Darstellung.

Termin für einen Störungsbeginn sowie ein Termin für ein Störungsende im Sinne von § 6 Abs. 1, 3 VOB/B bekannt sind bzw. bekannt sein müssen. Ein besonderer Fokus liegt bei der Klasse *DisruptionMS* auf dem darin enthaltenen Attribut *processEvent*. Es kann zwei unterschiedliche Verwendungszwecke erfüllen.

Das Kürzel „MS“ steht für „Milestone“ bzw. „Meilenstein“ und deutet den ersten Verwendungszweck an. Entsprechend kann eine Objektinstanz der Klasse *DisruptionMS* genutzt werden, um ein meilensteinähnliches Ereignis als Startbedingung zu definieren – etwa ein geplanter und tatsächlicher Bemusterungstermin. Sollten beide Termine zeitlich auseinanderliegen, trägt das *ProcessEvent* dazu bei, dass Soll- sowie Ist-Termin für ein und dieselbe Sache – nämlich die Bemusterung – in einer Beziehung zueinander stehen. Im Gegensatz zur Netzplantechnik sind diese Meilensteine miteinander assoziiert und bleiben bei zeitlichen Verschiebungen immer gemeinsam verbunden.

Der zweite Verwendungszweck zielt auf einen Störungssachverhalt ab, der einer rein terminbestimmten Vorgangsdauer entspricht. Er dient dazu, dass sich der Blocker beliebiger Bauteilmodelle (*BuildingElement*) über die beiden Termine des *ProcessEvents* „an“ und „aus“ schalten lässt. Soll ein Bauteilmodell (*BuildingElement*) für einen bestimmten Zeitraum durch die Klasse *DisruptionMS* geblockt werden, ist eine Erweiterung terminlicher Fähigkeiten der Klasse *Blocker* notwendig. Im entwickelten Simulator lässt sich die Schaltfunktion mit der der Klasse ***BuildingElementBlockerTransition*** in Form einer spezialisierten Transition umsetzen. Deren Funktionsweise wird in *Kapitel 6.3.5* vorgestellt.

Um den Störungssachverhalt dem Risikobereich eines Unternehmens zuordnen zu können, besteht zwischen der Klasse *DisruptionMS* und der Klasse *Company* eine Beziehung. Mit dem Attribut *disruptionTask* werden alle virtuellen Arbeitsaufgaben (*Task*) anhand der Simulationszeit dokumentiert, die von einem Störungssachverhalt (*DisruptionMS*) betroffen wurden. Die Dokumentation übernimmt der Simulator.

Damit eine Objektinstanz der Klasse *DisruptionMS* in die Ablaufstruktur des Simulationsmodells integriert werden kann, bindet sie ebenfalls die Schnittstelle *Sequence* ein. Abschließend lassen sich gewollte Abhängigkeiten zwischen den Klassen *Category*, *Production*, *Task* bzw. *Process* und *DisruptionMS* bilden.

6.3 Erweiterte Ansätze der prototypischen Entwicklung

6.3.1 Unterscheidungen und Strukturierungen der Teilnetze

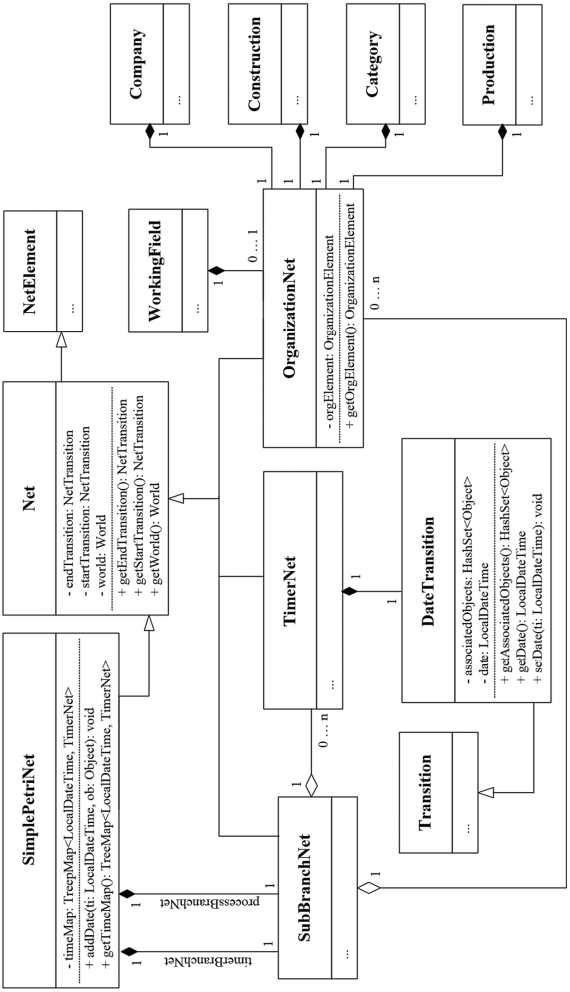


Abbildung 6-23: Klassendiagramm der entwickelten Petri-Netz-Struktur[1446]

Der in diesem Unterkapitel vorgestellte Lösungsansatz erweitert den entwickelten Petri-Netz-Simulator des *Kapitels 6.1.2*. Die Klasse *SimplePetriNet* bildet weiterhin das „Haupt-Petri-Netz", das nun in Teilnetze gegliedert wird. Wie die Klasse *SimplePetriNet* erben ebenfalls alle möglichen Teilnetze die Eigenschaften der Klasse *Net* (siehe *Abbildung 6-1*).

[1446] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

Um die rekonfigurierbare Struktur des Petri-Netzes erreichen zu können, wird das *SimplePetriNet* in zwei Teilnetze ***processBranchNet*** und ***timerBranchNet*** über eine Vererbung der Klasse *SubBranchNet* in zwei „Äste“ aufgeteilt. Während die Integration der kompletten Aufbaustruktur im *processBranchNet* innerhalb der Klasse *SimplePetriNet* stattfindet, erfolgt im *timerBranchNet* eine automatisierte Organisation aller bestimmten oder bestimmbaren Termine. Zusammen bilden sie die Ablaufstruktur des Simulationsmodells.

Die Aufteilung in zwei Teilnetze bleibt während der gesamten Laufzeit aller Simulationsexperimente aufrechterhalten. Hingegen wird ihr „Innenleben“ im Sinne eines emergenten Systemverhaltens umstrukturiert und erweitert. So entstehen im Zuge der späteren Simulationsläufe durchaus neue Elemente und Wirkungsbeziehungen, die dazu führen, dass sich die beiden Teilnetze *gegenseitig* bedingen. Beim *timerBranchNet* werden alle vorgegebenen oder errechneten Termine als terminabhängige Ablaufbedingungen für das *processBranchNet* chronologisch verwaltet. Demgegenüber stellt sich das *processBranchNet* weitaus komplexer als das *timerBranchNet* dar, gerade weil darin die Agentenbewegungen das Schalten der dort enthaltenen Transition mitbestimmen. Alle innerhalb des *processBranchNet* errechneten Termine werden von dort aus in das *timerBranchNet* eingearbeitet.

Mit der *Abbildung 6-24* wird diese Zweiteilung des Petri-Netzes verdeutlicht. Links neben dem Petri-Netz sind zwei unsichtbare Arbeiterkolonnen beispielhaft abgebildet. Deren Fertigungsrichtungen, die aus einer geordneten Liste von Objektinstanzen der Klasse *WorkingField* bestehen, sind exemplarisch innerhalb des *prozessBranchNet* durch geschweifte Pfeile angedeutet. Die Agentenbewegungen stellen sich u. a. durch Anweisungen ein, die der Simulator vorgibt. Zwischen dem *ProcessBranchNet* und dem *timerBranchNet* sind wechselseitige Wirkungsbeziehungen zu sehen, die entweder vom Anwender vorgegeben werden oder sich während der simulationsbedingten Rekonfigurationen der Petri-Netz-Struktur einstellen. Der Übersicht halber werden die Plätze (*Place*) in den Verknüpfungen (*Hank*) nicht gezeigt.

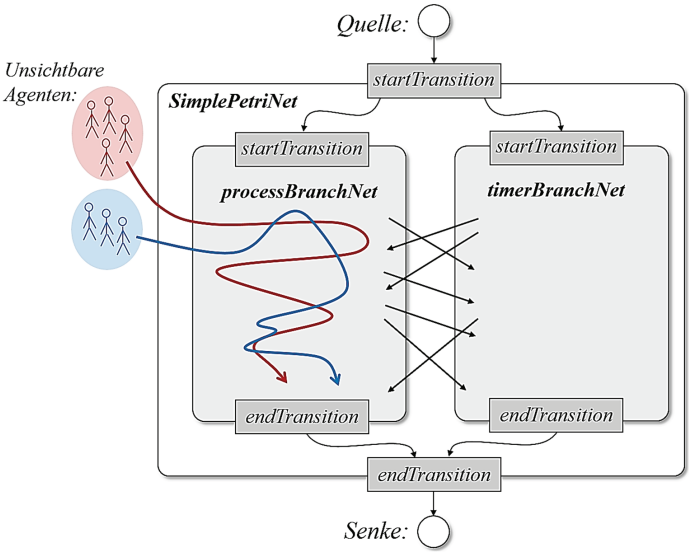


Abbildung 6-24: Zweiteilung in ein processBranchNet und in ein timerBranchNet[1447]

Damit die komplexen Simulationsergebnisse sich im Nachhinein besser differenzieren lassen, wird die Aufbaustruktur des Prozessmodells in das Petri-Netz überführt. Dafür erhalten die bereits gegliederten Klassen *Company*, *Construction*, *Category*, *WorkingField* und *Production* der Aufbaustruktur jeweils ein eigenes Teilnetz der Klasse ***OrganizationNet*** mit einer Referenz ihrer Objektinstanz. Diese Teilnetze werden anhand der Aufbaustruktur ineinander verschachtelt sowie über die Schnittstelle *Sequence*[1448] in die entsprechenden Prozessreihenfolgen verknüpft und anschließend in das *processBranchNet* eingearbeitet (siehe *Abbildung 6-17* und *Abbildung 6-25*).

Alle Teilnetze sind im Petri-Netz durch eine *startTransition* und eine *endTransition* definiert. Gemäß dem Klassendiagramm in *Abbildung 6-28* werden sie durch die Standard-Transition ***NetTransition*** spezialisiert.

[1447] Eigene Darstellung.

[1448] Aus den jeweiligen Startbedingungen (*OrganizationElement.getOrgElement()*...) lassen sich spezialisierte Transitionen der Klasse *DateTransition* ableiten, die ebenfalls eine Verknüpfung zum jeweiligen Teilnetz abbilden. Zudem werden im *TimerNet* die Bestandteile aus der Klasse *DisruptionMS.getProcessEvent()* gebildet. Letztere können eine Abhängigkeitsbeziehung mittels der Schnittstelle *Sequence* eingehen.

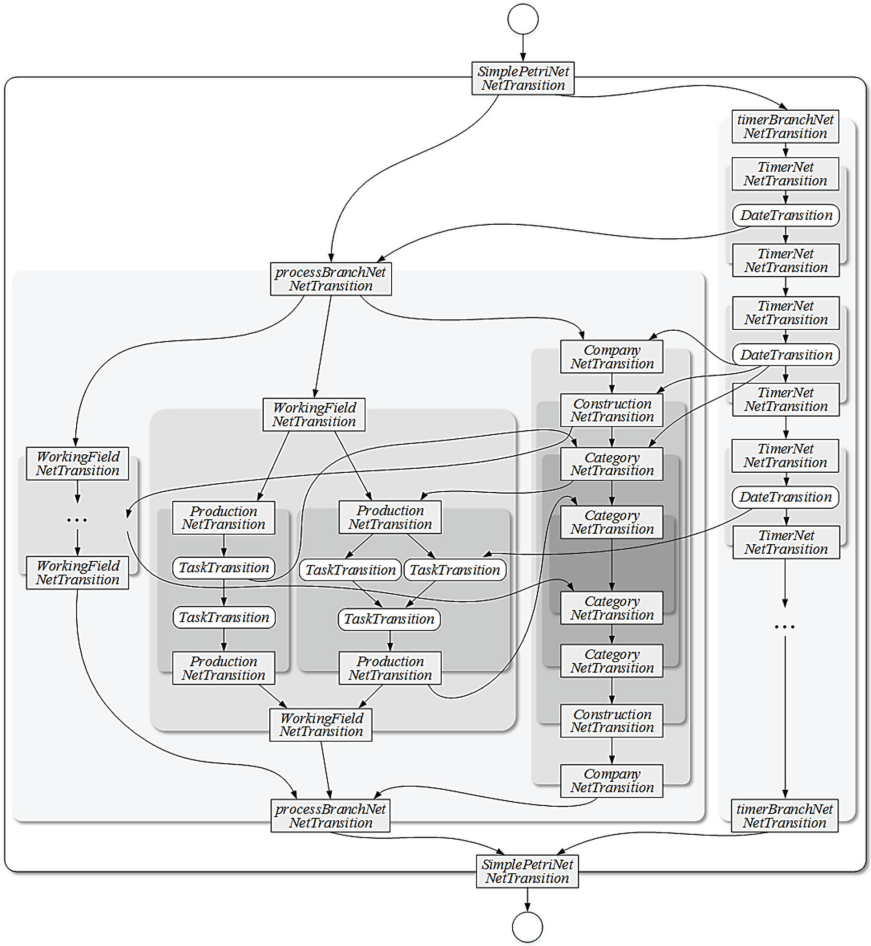


Abbildung 6-25: Mögliche Ausgangssituation der Aufbaustruktur in Teilnetze[1449]

Das in *Abbildung 6-25* dargestellte *processBranchNet* enthält die Teilnetze der Arbeitsbereiche (*WorkingField*), in denen sich die Teilnetze der Klasse *Production* befinden. Die im *processBranchNet* befindlichen Teilnetze der Klasse *WorkingField* dienen als geometrisch-konstante „Anlaufstellen" der Agenten. Dafür sind die Teilnetze der Arbeitsbereiche (*WorkingField*) ablauftechnisch parallel zueinander im *processBranchNet* angeordnet. Daneben können sich mehrere Unternehmensstrukturen – definiert durch *Company*-Teilnetze – befinden. Ihre *Category*-Teilnetze sind dann mit ihren jeweiligen *Production*-Teilnetzen innerhalb der „geometrischen" *WorkingField*-Teilnetze verknüpft. Hierbei ist es möglich, dass sich unterschiedliche *Production*-Teilnetze verschiedener Unternehmen nebeneinander in einem einzelnen *WorkingField*-Teilnetz befinden. Die Teilnetze der Klasse *Production* fassen die wesentlichen Produktionsbeschreibungen der

[1449] Eigene Darstellung. In der Darstellung werden konzeptionelle Bezeichnungen für die Teilnetze aufgeführt.

jeweiligen Unternehmensstrukturen zusammen. Dort können sie – je nach Definition – in Abhängigkeit zueinander stehen. In den *Production*-Teilnetzen befinden sich die elementaren Arbeitsaufgaben (*Task*) in Form spezialisierter Transitionen der Klasse *TaskTransition*. Dort finden die Vorgangsberechnungen statt.

Die Ein- und Ausgänge der Teilnetze der Klasse *Production* sind mit den Ein- und Ausgängen der Klasse *Category* verknüpft, so dass diese infolge der simulierten Zeitberechnungen zeitlich gestreckt oder gestaucht werden können. Die zeitliche Streckung überträgt sich aufgrund ihrer Verknüpfung auf alle umschließenden Teilnetze der unternehmensbezogenen Aufbaustruktur. Dieses Verschachteln der Teilnetze ermöglicht das in *Kapitel 5.1.4* beschriebene Strecken oder Stauchen berechenbarer Vorgangsintervalle. Je nach gewählter Abhängigkeitsbeziehung stellen sich zeitliche Verschiebungen ein.

6.3.2 Kapazitive Verfügbarkeiten aufgrund des Agentenverhaltens

Agenten müssen von sich aus erkennen und dem Simulator mitteilen, welche Arbeitsaufgaben ausführbar sind bzw. welche *TaskTransitionen* sich unter Berücksichtigung geometrischer Konfliktsituationen zum Schalten eignen. Der Simulator unterstützt die Agenten, indem er für verschiedene Kolonnen eine Vorauswahl möglicher Arbeitsaufgaben trifft.

Grundsätzlich dürfen die Agenten *während eines diskreten Zeitpunkts* aufgrund blockierter Flächen *nicht* innerhalb des Wegenetzes „gefangen“ und von der Gebäudeumwelt abgeschnitten sein. Deshalb veranlasst der Simulator die Agenten zu prüfen, ob sie vor jeder ausstehenden Arbeitsaufgabe das *World-WorkingField*[1450] erreichen können. Falls dies nicht möglich ist, setzt der Simulator den einzelnen Agenten „vor die Tür“ – also auf das *World-WorkingField*. Von dort aus kann der Agent anhand der Fertigungsrichtung den nächsten erreichbaren Arbeitsbereich heraussuchen. Diese Ablauflogik schließt z. B. das Betreten von trocknenden und aushärtenden Böden *nebenläufiger Ausführungsarbeiten* aus.

Bei der Vorauswahl verhindert der Simulator das Schalten aller aktivierten *TaskTransitionen*, deren Arbeitsaufgaben aufgrund vorausgegangener Blockierungen durch eine bestimmte Kolonne nicht bearbeitet werden können. Zudem schließt er alle Transitionen aus, die sich wegen unzureichender Werkstoffmengen (*Material*) nicht ausführen lassen. Dies trifft ebenso für jene *TaskTransitionen* zu, bei denen die vorgegebene *Mindestanzahl von Kapazitäten*[1451] einer Arbeitsaufgabe aufgrund der momentanen Kolonnenstärke nicht sichergestellt werden kann. Daraufhin erfolgt eine differenziertere Prüfung durch die Agenten aller verbleibenden und schaltbaren *TaskTransitionen*.

Die Agenten erstellen eine Liste aus den übrig gebliebenen *TaskTransitionen*, deren Arbeitsbereiche sich über das Wegenetz erreichen lassen und bei denen infolge einer erneuten Überprüfung keine Blockierung der lokalen Produktionsstätte (*LocalQuantity*) vorliegt.

[1450] Das *World-WorkingField* wird durch einen Wegknoten definiert, der sich innerhalb der geometrischen Umwelt, aber außerhalb des Gebäudemodells befindet (siehe *Kapitel 6.2.4* und konzeptionelle Darstellungen des *Kapitels 5.2.4*).

[1451] Definiert durch die Klasse *RequiredWorkerTypes* (siehe *Kapitel 6.3.5*).

TaskTransitionen, die keine Kapazitäten erfordern, bleiben in den weiteren Betrachtungen unberücksichtigt. Die übrig gebliebenen *TaskTransitionen* werden daraufhin sortiert nach

- der Höhe des zuletzt erreichten Leistungsstands der Arbeitsaufgabe,
- vorgegebener Prozess-Priorität und
- der Priorisierung der *Production*.

Hieraus bildet sich für jede Kapazität eine geordnete Liste im Sinne einer Warteschlange. An erster Stelle stehen darin die bereits begonnenen Arbeitsaufgaben, die nach den priorisierten Prozessen der Kapazitäten zusammengestellt sind. Die Listen werden jedoch nicht in dieser Reihenfolge abgearbeitet, sondern der gegenwärtig gewählten Fertigungsrichtung der Kolonne angepasst. Jede *TaskTransition* wird entlang der Fertigungsrichtung geprüft. Vorrangig gegenüber der Fertigungsrichtung bleiben Arbeitsaufgaben mit Leistungsständen, die zwischen [$0 < 100\ \%$] liegen. Dies trägt standardmäßig dazu bei, dass alle bereits begonnenen Arbeitsaufgaben möglichst fertiggestellt werden. Aus dieser Kombination bildet jeder Agent eine eigene ***Aufgabenpriorisierung*** schaltbarer *TaskTransitionen*. Der Wert der Priorität leitet sich aus einer *harmonisch divergierenden Folge*[1452] der von den Agenten geordneten Liste ab. Alle Agenten geben ihre priorisierten *TaskTransitionen* an den Simulator zurück.

Vom Simulator folgt daraufhin eine Auswahl möglicher Kolonnenaufteilungen. Anhand einer Gesamtbetrachtung der kapazitiven Aufgabenpriorisierung und der zulässigen Kapazitätsanzahl (*RequiredWorkerTypes*) der lokalen Arbeitsaufgaben (*Tasks*) entscheidet der Simulator, welche Agenten in den weiteren Betrachtungen miteinander arbeiten. Die Zusammenstellung der Arbeitsgruppen ergibt sich aus der dringlichsten Arbeitsaufgabe und der am höchsten priorisierten Kapazität einer Kolonne. Je nach Situation können sich andere Kapazitäten der Kolonne bei gleicher Arbeitsaufgabe an der Ausführung beteiligen.

Die kapazitiven Aufgabenpriorisierungen werden für jede Arbeitsaufgabe aufaddiert und durch die Anzahl der Arbeitskräfte dividiert. Im Anschluss erfolgt eine Gegenüberstellung aller möglichen Kombinationsergebnisse. Der größte Kombinationswert führt zum Ausführen der Arbeitsaufgabe bzw. zum Schalten der entsprechenden *TaskTransition*. Hierzu werden alle erfassten Kapazitäten herangezogen und durch den Simulator mit der Funktion *setUsed(true)* gekennzeichnet. Die jeweiligen Agenten werden in den weiteren Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt. Gleichzeitig blockiert der Simulator mit der Kolonne dieser Kapazitäten alle Steh- und Arbeitsflächen der lokalen Produktionsstätte. Diese Flächen sind für nachfolgende Kolonnen belegt, solange diese nicht als „Lucky-Band“ definiert wurden.

In einem Schleifendurchlauf finden so viele Gegenüberstellungen pro Kolonne statt, bis möglichst alle Kapazitäten eingesetzt werden. Nicht eingesetzte Kapazitäten bleiben übrig, wenn durch den Anwender die Mindest- oder Höchstanzahl der vorhandenen Arbeitsaufgaben (*RequiredWorkerTypes*) unpassend gewählt wurde. Der Simulator hält daraufhin die Kapazitäten so lange zurück, bis sie frühestmöglich wieder zum Einsatz kommen. Dies könnte in einem weiteren Schleifendurchlauf der Fall sein.

[1452] $Fn = 1/n$ für alle n, die den Index der priorisierten Listeneinträge zurückgibt.

Sollte ein Agent mehrere *TaskTransitionen* ausführen können und lässt jede dieser Möglichkeiten eine Mindestanzahl von einer Kapazität zu, erzielt die Aufgabenpriorisierung aufgrund der harmonischen Folge stets einen besonders hohen Wert (nämlich *1,0*). Der Nachteil bei dieser Priorisierungsmethode ist, dass sich aus der Kolonne tendenziell kaum Arbeitsgruppen mit mehreren Kapazitäten bilden und diese stattdessen alleine zeitparallel arbeiten. Um das Auswahlkriterium des Simulators abzuschwächen, wurde die ***Verteilungsvariable c*** für eine Kolonne gebildet. Diese trägt dazu bei, dass in einer momentanen Entscheidung die Anzahl der Arbeitskräfte von einer Arbeitsgruppe entweder gemindert, erhöht oder beibehalten wird. Tendenziell lassen sich somit kleinere oder größere Arbeitsgruppen bilden. Die Bestimmung der Arbeitsgruppen wird dadurch jedoch nicht festgelegt und bleibt weiterhin variabel.

Dazu ist die Bildung einer Bandbreite notwendig, die aus der zulässigen Anzahl von Kapazitäten zu erstellen ist. Im nächsten Schritt wird sie auf das konstante Intervall [*0, 2*] einer Standardnormalverteilung[1453] projiziert. Der Verteilungsvariable *c* skaliert daraufhin die projizierte Bandbreite. Hierüber lässt sich für jede zulässige Arbeitskraftanzahl ein ***Korrekturwert w(c)*** über die Standardnormalverteilung abgreifen. Dieser gewichtet die zuvor ermittelte Aufgabenpriorisierung in Abhängigkeit von der jeweiligen zulässigen Anzahl von Kapazitäten unterschiedlich stark.

Dies erfolgt im Verhältnis zu allen möglichen Kombinationen. Im Ergebnis strebt der Simulator bei kleineren Werten der Verteilungsvariablen *c* eher größere Arbeitsgruppen an als vergleichsweise bei großen Werten. Die Simulationsergebnisse bleiben weiterhin deterministisch und sind reproduzierbar. Zur Veranschaulichung werden die Funktionen durch die qualitative Grafik in *Abbildung 6-26* unterstützt. Oben ist die Bandbreite der Verteilungsvariablen *c* abgebildet und unten das konstante Intervall [*0, 2*] der Standardnormalverteilung.

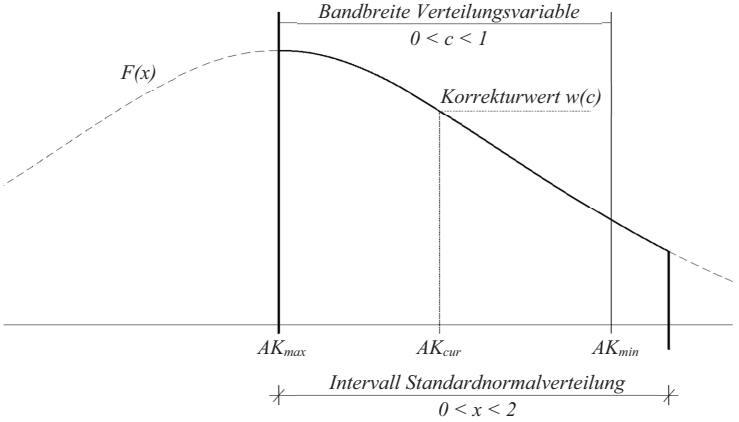


Abbildung 6-26: Standardnormalverteilung für Arbeitsgruppeneinteilungen[1454]

[1453] Alternativ zur *Standardnormalverteilung* wäre eine sog. „Sigmoidfunktion“ *sigmoid(x) = 1 / (1 + e^-x)* geeignet. Sie besitzt einen „weichen Übergang“ zwischen den Werten von *0* bis *1*.
[1454] Eigene Darstellung.

Die gezeigte Gauß-Kurve wird aus der Standardnormalverteilung ermittelt, die immer den maximalen Wert *F(x=0) = 1,0* beibehält. Dies erfolgt durch:

$$F(x) = \frac{g(x)}{g(0)} \qquad \underline{mit:} \qquad g(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot x^2}$$

Auf *F(x)* wird der Korrekturwert *w(c)* abgebildet. Hierfür sind folgende Größen erforderlich:

- die mindest zulässige Arbeitskraftanzahl AK_{min};
- die durch den Simulator momentan untersuchte Arbeitskraftanzahl AK_{cur};
- die maximal zulässige Arbeitskraftanzahl AK_{max} und
- das vorgegebene Intervall [*0, 2*] der Standardnormalverteilung.

Daraus resultiert die *Projektionsfunktion v(c)*, die zur Ermittlung des Korrekturwerts *w(c)* genutzt wird:

$$v(c) = \begin{cases} \frac{AK_{max} - AK_{cur}}{AK_{max} - AK_{min}} \cdot 2\,(1 - c) & \forall\ AK_{max} > AK_{cur}\ oder\ AK_{max} > AK_{min} \\ 0 & \forall\ AK_{max} \leq AK_{cur}\ oder\ AK_{max} \leq AK_{min} \end{cases}$$

$$\underline{in:}$$

$$w(x) = \frac{g(v(c))}{g(0)}$$

Zahlenbeispiel zur Bildung von Arbeitsgruppen einer Kolonne:

Das Zusammenspiel zwischen den Agenten und dem Simulator stellt sich folgendermaßen dar:

Aufgaben des Simulators:

1. Sortierung der am höchsten priorisierten Kolonnen.
2. Vorauswahl aktivierter bzw. schaltbarer *TaskTransitionen*.

Aufgaben der Kapazitäten bzw. Agenten:

3. Prüfung möglicher Arbeitsaufgaben.
4. Aufgabenpriorisierung (AP) hinsichtlich der erreichten Leistungsstände, der Prozess-Prioritäten und der Fertigungsrichtung einer harmonisch divergierenden Folge; z. B.

   Kapazität 1 {[Task C, AP: 1,0]; [Task B, AP: 0,5]; [*Task A*, AP: 0,25]; [Task D, AP: 0,125]}
   Kapazität 2 {[Task C, AP: 1,0]; [*Task A*, AP: 0,5]; [Task D, AP: 0,25]}
   Kapazität 3 {[Task D, AP: 1,0]; [Task B, AP: 0,5]}
   Kapazität 4 {[*Task A*, AP: 1,0]; [Task B, AP: 0,5]}

Aufgaben des Simulators:

5. Sortierung der am höchsten priorisierten Kapazitäten
6. Prüfung der *TaskTransitionen* – hier als „Task" bezeichnet – infolge der priorisierten Kapazitäten (im Beispiel wird angenommen, dass die ***Kapazität 4*** die höchste Priorität von allen Kapazitäten besitzt). Die Tasks der Warteschlange werden geprüft. Kombinationsmöglichkeiten ***Task A*** mit *mindestens zwei* und *höchstens drei* Kapazitäten. Hieraus ergeben sich drei Kombinationen möglicher Arbeitsgruppen:

   3er-Kombination aus Kapazität 1, Kapazität 2 und Kapazität 4:

   AP-Kombinationsmöglichkeit A = (0,25 + 0,5 + 1,0)/3 = 0,583

   2er-Kombination aus Kapazität 2 und Kapazität 4:

   AP-Kombinationsmöglichkeit B = (0,5 + 1,0)/2 = 0,75

   2er-Kombination aus Kapazität 1 und Kapazität 4:

   AP-Kombinationsmöglichkeit C = (0,25 + 1,0)/2 = 0,625

7. a) Aus $AK_{min} = 2$ und $AK_{max} = 3$ sowie mit einer Verteilungsvariablen von $c = 0$ folgt:
   AK_{max}: v(0) = 0
   AK_{min}: v(0) = 2

   b) Es ergeben sich die beiden Korrekturwerte:
   w(0) mit g(0)/g(0) = 1,0
   w(0) mit g(2)/g(0) = 0,0135

   c) Die Korrekturgewichtung der Kapazitätszuweisung stellt sich folgendermaßen dar:
   Kombinationsmöglichkeit A = 0,583 · 1,0 = **0,583**
   Kombinationsmöglichkeit B = 0,750 · 0,135 = 0,0975
   Kombinationsmöglichkeit C = 0,625 · 0,135 = 0,0843

   Im Ergebnis schaltet *Task A* mit *Kapazität 1*, *Kapazität 2* und *Kapazität 4,* da die *Kombination A* den größten Wert erzielt.

8. In den weiteren Untersuchungen wird *Kapazität 3* erneut überprüft und kann nur noch alleine schalten.

Das Ziel der oben gezeigten Berechnungen besteht darin, dass der Anwender ein Werkzeug erhält, mit dem er die komplexen Simulationsläufe tendenziell in eine bestimmte Richtung steuern kann. Dies ist notwendig, da er sonst keine Möglichkeit zur Gestaltung einer geeigneten Arbeitsgruppengröße hätte.

Zur Nachvollziehbarkeit der Simulationsläufe spielen diese Eingriffsmöglichkeiten keine nennenswerte Rolle, da sich die Kapazitäten jederzeit aus den Simulationsergebnissen entnehmen lassen. Dadurch zeigen sie eindeutig, wann welche Kapazität welche Arbeitsaufgabe durchführt. Anwendungsbeispiele sind in *Kapitel 5* zu finden. Die Gesamtzusammenhänge der kapazitiven Verfügbarkeitsprüfungen innerhalb des Simulators lassen sich dem Aktivitätsdiagramm der *Abbildung 6-27* entnehmen. Die dort gezeigte Abfolge beginnt, sobald der Simulator aktivierte *TaskTransitionen* ermitteln konnte.

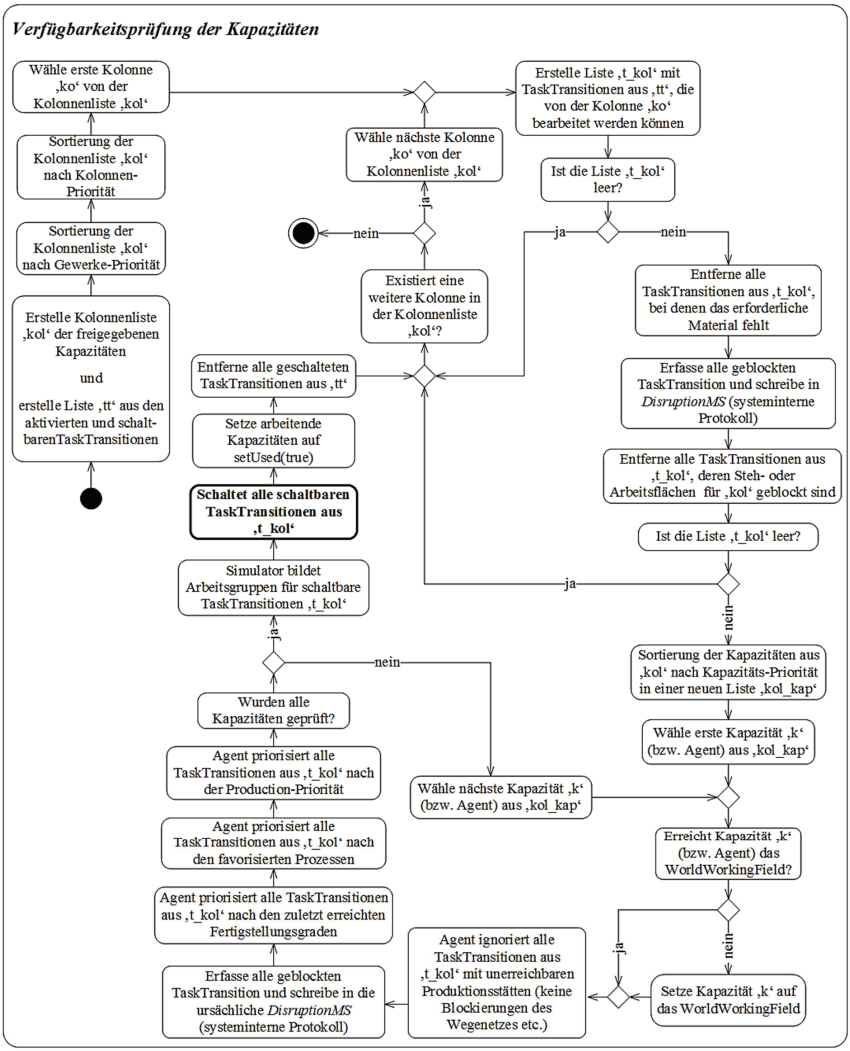


Abbildung 6-27: Aktivitätsdiagramm für kapazitive Verfügbarkeitsprüfungen[1455]

6.3.3 Übersicht spezialisierter Transitionen

Im Folgenden wird auf die Funktionsweisen unterschiedlicher Transitionsarten eingegangen. Das Klassendiagramm der *Abbildung 6-28* verschafft hierzu einen Überblick. Mit den drei erwähnten ***Standard-Transitionen*** *NetTransition*, *DateTransition* und *TaskTransition* ist bereits – wenn auch nur sehr einfach und teilweise unvollständig – eine Bauablaufsimulation möglich. Entsprechend lassen sich keine Arbeitszeiten der Kapazitäten oder terminabhängigen Störflächen berücksichtigen. Um spezielle Verhaltensänderungen des Modells zu

[1455] Eigene Darstellung. Hintergründe zum UML-Aktivitätsdiagramm liefert *Staud*. Vgl. Staud, 2010: S. 129 ff. Die Knoten-Darstellungen erläutert *Staud* ab Seite 154 ff.

bedingen, werden ***Modifizier-Transitionen*** genutzt. Im Rahmen der prototypischen Entwicklung wurden einige *Modifizier-Transitionen* angewandt. Diese sind für weitere Entwicklungen noch ausbaufähig. Das Ziel besteht darin, sie wie Sequenzer einer DAW zu gestalten. Mit einer zweckmäßigen Benutzeroberfläche könnten sie in das gesamte Simulationskonzept gem. *Kapitel 5.1.2* eingebettet werden. Ihren Einfluss auf das Modellverhalten erzielen sie durch spezielle Funktionen und Verknüpfungsreihenfolgen innerhalb des entwickelten Petri-Netzes.

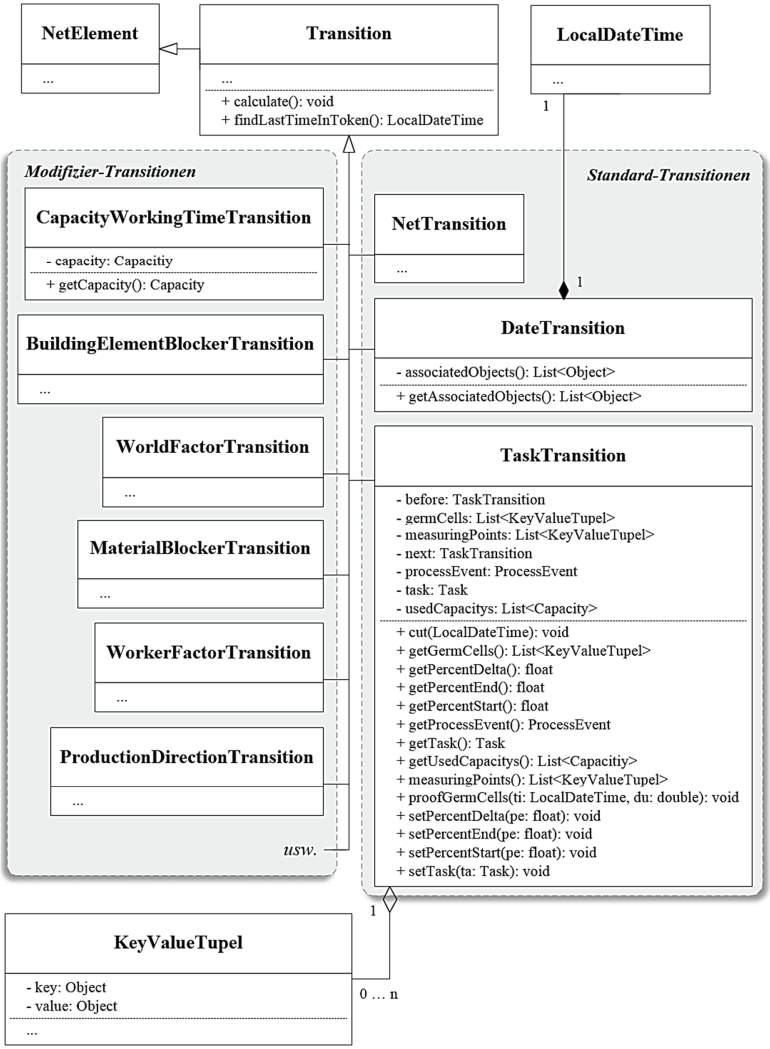


Abbildung 6-28: Überblick verschiedener Transitionen[1456]

[1456] Eigene Darstellung. *Staud* vermittelt allgemeine Kenntnisse zu UML-Klassendiagrammen. Vgl. Staud, 2010: S. 38 ff.

In *Kapitel 6.3.4* folgt die Darstellung der *NetTransition* und der *DateTransition*. Daraufhin wird in *Kapitel 6.3.5* die Herangehensweise zur Erstellung einer *Modifizier-Transition* konzeptionell beschrieben. Von einer umfassenden Beschreibung wird in der vorliegenden Arbeit jedoch abgesehen.

6.3.4 NetTransition und DateTransition

Gemäß *Kapitel 6.3.1* besteht die Aufgabe einer *NetTransition* darin, ein beliebiges Teilnetz (*Net*) zu begrenzen. Dazu erbt sie lediglich die Eigenschaften der Klasse *Transition*, gibt ihr aber eine neue Bezeichnung.

Demgegenüber werden mit einer *DateTransition* alle vom Anwender vorgegebenen oder vom Simulator errechneten Termine als „termindiskrete Transition“ erfasst. Sie erbt ebenfalls die Eigenschaften der Klasse *Transition*. Zusammen mit den in einer *SwitchInformation* hinterlegbaren Informationen und dem ihr zugewiesenen Termin beschreibt eine *DateTransition* alle wesentlichen Voraussetzungen zur Realisierung der in *Kapitel 4.5* entworfenen *Anhaltspunkte*.

Zum Zeitpunkt des Schaltens wird der ihr zugewiesene Termin *getDate()* für weitere Berechnungsschritte an die folgenden Transitionen mit den ausgehenden Token weitergegeben. In ihrer Übergangsfunktion *calculate()* findet keine Ermittlung vorausgegangener Termine statt, siehe folgenden *Pseudocode 6-9*.

Pseudocode 6-9: Funktion *calculate()* der Klasse *DateTransition*

```
0: //Entnehme den Termin der DateTransition (eine Ermittlung vorausgegangener Termine unterbleibt)
1: Entnehme LocalDateTime date = this.getDate()
2: Erstelle neue SwitchInformation info aus List<Information>, date und this
3: Setze neue SwitchInformation info in die gegenständliche Transition this.setSwitchInformation(info)
```

Falls mehrere unterschiedliche Objekte mit einem konkreten Termin in das Petri-Netz eingebracht werden sollen, erfordert jeder Termin eine eigene *DateTransition*. Für jeden Termin darf maximal eine *DateTransition* im Petri-Netz vorhanden sein.

Alle Objekte, die einem identischen Termin angehören, werden innerhalb der *DateTransition* im Sinne des in *Kapitel 5.1.3* beschriebenen *Termincontainers* zusammengefasst. Für diese Aufgabe verfügt eine *DateTransition* über die Liste *getAssociatedObjects()* (siehe *Abbildung 6-28* und *Abbildung 6-29*).

Jede *DateTransition* ist im *timerBranchNet* von einem eigenen *TimerNet* umschlossen. Dort ist sie neben weiteren *DateTransitionen* chronologisch angeordnet (nach *Abbildung 5-4*). Die chronologische Sortierung einer *DateTransition* erfolgt über die Funktion *addDate(ti: LocalDateTime, ob: Object)* der Klasse *SimplePetriNet*.

Mit der Funktion wird für einen Termin eine *DateTransition* erstellt, mit einem *TimerNet* umschlossen und chronologisch in das *timerBranchNet* eingearbeitet. Die chronologische Sortierung ist bereits *vor* dem ersten Simulationslauf sowie *während* der Laufzeit einer Simulation aufrufbar und funktionsfähig. Der folgende *Pseudocode 6-10* beschreibt, wie ein Termin im *timerBranchNet* erweitert oder hinzugefügt wird.

Pseudocode 6-10: Funktion *addDate(ti: LocalDateTime, ob: Object)* der Klasse *SimplePetriNet*

```
0:  //Folgende Berechnungsschritte benötigen den Start- oder Endtermin date der Klasse ProcessEvent
1:  //und die mit dem Termin assoziierte Objektinstanz Object object (z. B. Company, Production,
2:  //DisruptionMS, SwitchInformation etc.)

3:  Erstelle DateTransition dTran

4:  IF date liegt zeitlich hinter dem Termin des Projekts this.getWorld().getStartDate()
5:     IF im timerBranchNet ist das Datum des Termins date bereits enthalten
6:        Entnehme dTran = this.getTimeMap().get(date).getDateTransition()      // (*)
7:        Ergänze HashSet dTran.getAssociatedObjects() um object

8:     //Erstelle neue DateTransition in einem TimerNet, falls diese nicht im timerBranchNet existieren
9:     ELSE wenn Termin date (noch) nicht im timerBranchNet als DateTransition enthalten ist
10:       Erstelle DateTransition dTran = new DateTransition mit date
11:       Ergänze HashSet dTran.getAssociatedObjects() um object
12:       Erstelle TimerNet tNetNew mit dTran

13:       //Suche vorhandene Teilnetze im timerBranchNet mit date
14:       Entnehme vorausgehenden TimerNet lowerNet aus this.getTimeMap().lowerEntry(date)
15:       Entnehme folgenden TimerNet higherNet aus this.getTimeMap().higherEntry(date)
16:       Erstelle Transition from und to

17:       //Suche Vorgänger-Transition für tNetNew im timerBranchNet
18:       IF TimerNet lowerNet existiert als Vorgänger THEN Setze from = lowerNet.getEndTransition()
19:       ELSE es existiert kein Vorgänger THEN Setze from = this.getTimerBranchNet().getStartTransition()

20:       //Suche Nachfolger-Transition für tNetNew im timerBranchNet
21:       IF TimerNet higherNet existiert als Nachfolger THEN Setze to = higherNet.getStartTransition()
22:       ELSE es existiert kein Nachfolger THEN Setze to = this.getTimerBranchNet().getEndTransition()

23:       //Verknüpfe tNetNew im timerBranchNet
24:       Setze neuen Hank zwischen from und tNetNew.getStartTransition()
25:       Setze neuen Hank zwischen tNetNew.getEndTransition() und to
26:    ENDELSE
27: ENDIF
```

(*) Für die Funktion *getTimeMap()* eignet sich eine *TreeMap*, die gewährleisten kann, dass eine chronologische Sortierung aller enthaltenen Termine bereits beim Hinzufügen eines neuen Termins erfolgt. Dadurch kann in *Zeilen 14* und *15* immer auf die „passenden" Teilnetze (*TimerNet*) zugegriffen werden.

6.3.5 Entwurfsansätze für Modifizier-Transitionen

Die Verschachtelung einer *DateTransition* in einem eigenen *TimerNet* ist ein Ordnungsprinzip, das zu einheitlichen Teilnetz-Ebenen innerhalb des *timerBranchNet* beiträgt. Diese Gliederung ist deshalb relevant, weil sich neben den *TimerNets* Teilnetze vereinzelter *Modifizier-Transitionen* befinden können. Dies ist etwa bei den beiden spezialisierten Transitionen *CapacityWorkingTimeTransition* sowie *BuildingElementBlockerTransition* – dargestellt in der *Abbildung 6-29* – in jeweils eigenen Teilnetzen der Klasse *OrganizationNet* der Fall.

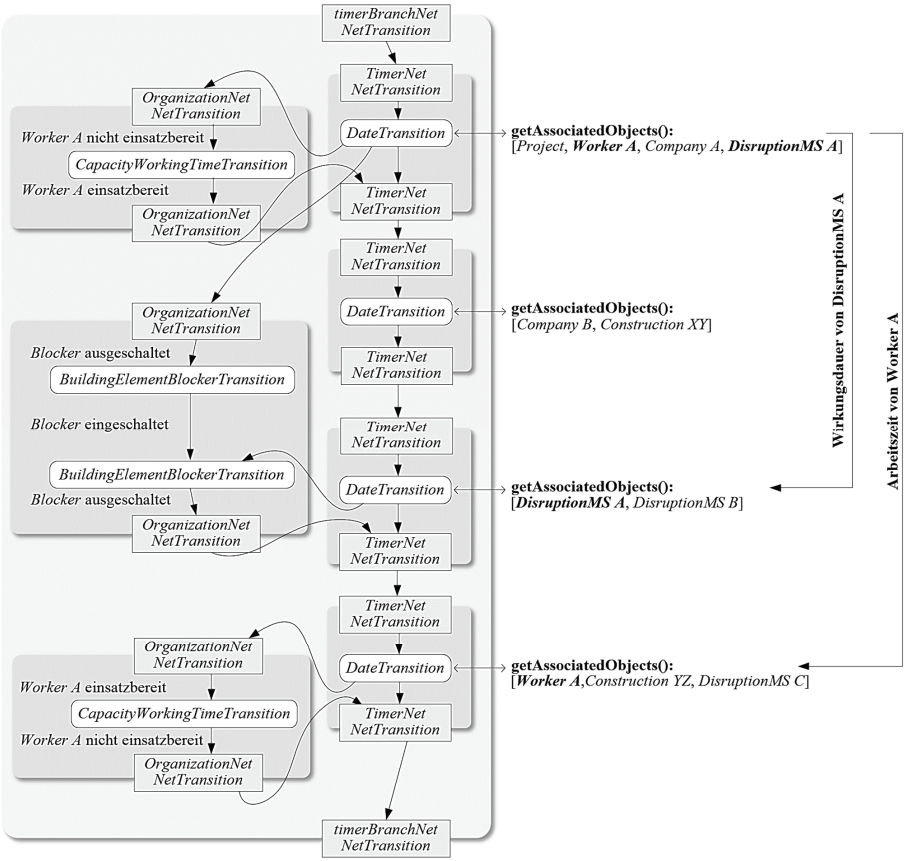


Abbildung 6-29: Schaltlogik zeitabhängiger Modifikationen im timerBranchNet[1457]

Mit der *Abbildung 6-29* wird eine Schaltlogik gezeigt, bei der u. a. die Arbeitszeiten der Kapazität „Worker A“ mit *zwei* Transitionen der Klasse *CapacityWorkingTimeTransition* termindiskret verändert werden. Nach dem Schalten der ersten *DateTransition* wird eine „nicht einsatzbereite“ Kapazität „Worker A“ auf „einsatzbereit“ geschaltet. Da der direkte Input des *OrganizationNet* der Output der ersten *DateTransition* ist, erfolgt das Schalten termindiskret. Erst nach dem Schalten der vierten *DateTransition* wird die bislang „einsatzbereite“ Kapazität „Worker A“ wieder auf „nicht arbeitsbereit“ zurückgesetzt (siehe *Abbildung 6-29*). Folglich ist die Kapazität „Worker A“ zwischen dem ersten und vierten Termin einsatzbereit gewesen. Dieser Aufbau lässt sich nutzen, um Agenten im Zuge eines Simulationslaufs aktiv *oder* passiv zu schalten. So können durch die Vorgabe des Anwenders für jede beliebige Arbeitskraft terminweise Arbeitszeiten während der Simulationszeit berücksichtigt werden.

[1457] Gemäß *Kapitel 5.2.8* – eigene Darstellung.

Für die Umsetzung muss die *CapacityWorkingTimeTransition* einen Zugriff auf eine einzelne Objektinstanz der Klasse *Capacity* – also „Worker A" – erhalten. Sie listet alle Arbeitszeiten in *getWorkingDurations()* auf. Für jeden der dort angegebenen Termine muss einerseits eine *DateTransition* zugewiesen sowie andererseits eine eigene *CapacityWorkingTimeTransition* erstellt werden. Für beide Transitionsarten ist daraufhin eine Vernetzung analog der in *Abbildung 6-29* gezeigten Abhängigkeiten innerhalb des *timerBranchNet* durchzuführen.

Sobald diese Transitionen schalten, können sie innerhalb der überschriebenen Übergangsfunktion *calculate()* die Kapazität blockieren. Der folgende *Pseudocode 6-11* verdeutlicht das Aus- und Einschalten.

Pseudocode 6-11: Funktion *calculate()* der Klasse *CapacityWorkingTimeTransition*

```
0:  //„Standard-Aufgabe" beim Schalten. Weitergabe der Vorgänger-Termine Pseudocode 6-3
1:  Erstelle LocalDateTime date = findLastDateInToken()
2:  Erstelle neue SwitchInformation info aus List<Information>, date und this
3:  Setze neue SwitchInformation info in die gegenständliche Transition this.setSwitchInformation(info)

4:  //Greife auf zugewiesene Kapazität zu
5:  Entnehme Capacity cap aus this.getCapacity()

6:  //Führe das Schalten der Arbeitszeiten für die zugewiesene Kapazität durch („Schalter-Funktion")
7:  IF cap.isBlocked() == true
8:      THEN Setze cap.setBlocked(false)   //Siehe Klassendiagramm F der Abbildung 6-20
9:  ELSE
10:     THEN Setze cap.setBlocked(true)
11: ENDELSE
```

In den *Codezeilen 7 bis 11* wird das Ein- und Ausschalten der Kapazitätsverfügbarkeiten beschrieben. Die Schaltlogik entspricht der eines Lichtschalters.[1458] Die Arbeitszeit einer bestimmten Kapazität beginnt durch das (Ein-)Schalten. Beim erneuten (Aus-)Schalten wird die Arbeitszeit derselben Kapazität wieder beendet. Transitionen dieser Art werden als ***Schalter-Transitionen*** bezeichnet. Sie veranlassen diskrete Zustandswechsel über die simulierte Bauzeit.

Eine vergleichsweise Modifizierung kann ebenso mit der in der *Abbildung 6-29* dargestellten *BuildingElementBlockerTransition* vorgenommen werden. Laut dieser befinden sich für das An- und Ausschalten zwei der Modifizier-Transitionen zusammen in einem *OrganizationNet*. Analog zu der im *Pseudocode 6-11* vorgestellten Schalter-Funktion lässt sich der *Blocker* für ein oder mehrere Objektinstanzen der Klasse *BuildingElement* infolge der beiden *BuildingElementBlockerTransition* terminweise ein- und ausschalten. Dadurch kann eine Störfläche zwischen zwei diskreten Terminen während der Simulationszeit geblockt werden. Im Rahmen der prototypischen Entwicklung wurde so die zeitlich begrenzte Wirkungsdauer eines Störungssachverhalts mit der Klasse *DisruptionMS* modelliert.[1459]

Mit den beiden vorgestellten Schalter-Transitionen werden Modellierungsvorschläge unterbereitet, wie sich spezialisierte Eingriffe in das Petri-Netz – im Sinne eines Sequenzers einer DAW – ausarbeiten lassen. Dadurch sind termindiskrete Änderungen im Simulations-

[1458] *Damriantant und Wakefield* beschreiben eine Schalter-Funktion für zyklische Petri-Netz-Strukturen. In diesem Lösungsansatz werden solche Schalter-Funktionen *nicht* betrachtet. Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 217-222.

[1459] Siehe *Abbildung 6-21*.

modell möglich. Durch das Schalten einer Modifizier-Transition besteht die Möglichkeit einer faktoriellen Gewichtung mit der Wertänderung eines beliebigen *factor*-Attributs. Auch weitere Schaltungen sind denkbar, z. B. termindiskrete Änderungen der Materialverfügbarkeiten, Prioritätsreihenfolgen oder die „schlagartige" Umstellung einer Fertigungsrichtung. Der Simulator würde daraufhin unter den neuen Bedingungen weiter rechnen. Mit dieser Herangehensweise können verschiedene Schalter-Transitionen für spezielle Anwendungsfälle kombiniert werden.

6.3.6 TaskTransition zur linearen Vorgangsberechnung

Im Gegensatz zu einer *DateTransition* kann mit einer *TaskTransition* eine elementare Arbeitsaufgabe (*Task*) berechnet werden. Die Vorgangsberechnungen erfolgen durch den Aufruf der überschriebenen Übergangsfunktion *calculate()*. Dem *Pseudocode 6-12a* und *6-12b* ist die komplette Vorgangsberechnung zu entnehmen.

In der *Zeile 2* des *Pseudocodes 6-12a* findet eine Unterscheidung statt, bei der *kapazitiv abhängige*[1460] und *unabhängige*[1461] Vorgangsberechnungen voneinander getrennt werden. Nur die kapazitiv abhängige Vorgangsberechnung berücksichtigt alle möglichen faktoriellen Gewichtungen. In der Vorgangsberechnung wird auf alle Agenten eingegangen, die das Schalten einer *TaskTransition* auslösen. Aus diesem Grund stehen die dort durchgeführten Berechnungen in einem engen Zusammenhang mit den im *Kapitel 6.3.2* beschriebenen Agentenbewegungen.

Bei der Entnahme der *Leistungsmengen* in *Zeile 4* greift der Algorithmus auf die lokale Produktionsstätte (*LocalQuantity*) zu. Sie sind in der Klasse *Task* hinterlegt, die wiederum der *TaskTransition* zugeordnet ist. Danach werden die faktoriellen Gewichtungen i. A. a. *Kapitel 5.2.6* berechnet. Darüber hinaus umfassen die *Zeilen 64-67* die Ermittlung des *EffortFactors*, der gem. *Zeile 68* an die elementare Arbeitsaufgabe *Task* übergeben wird. Er bildet den *gewichteten Zeitaufwandswert* und gibt Aufschluss über die vom Anwender gewählte Produktivität. In *Zeile 69* findet die Vorgangsberechnung mit der Leistungsmenge, den gewichteten Zeitaufwandswerten und der Anzahl der verfügbaren Arbeitskräfte statt.

Bei den *kapazitiv unabhängigen* Vorgangsberechnungen ergibt sich der Wert der Vorgangsdauer *direkt* aus der Variablen des Zeitaufwandswerts *getEffort()* (siehe *Zeile 71*). Zwar ist die Vorgehensweise baubetrieblich falsch, doch hat sich diese der Einfachheit halber bei der Entwicklung der Datenstrukturen angeboten. Grundsätzlich können derartige Vorgänge nicht unterbrochen werden – sie dauern lediglich an (z. B. Trocknungs- und Aushärtezeiten).

In den *Zeilen 74* und *77* findet die lineare Berechnung des erzielten prozentualen Leistungsfortschritts über die Vorgangsdauer statt. Sie wird zwischen einem vorausgegangenen Leistungsstand x gebildet, der innerhalb des Intervalls $[0 \leq x < 100]$ durch die Variable *getPercentStart()* abrufbar ist, und dem abschließenden Leistungsstand *getPercentEnd(),* der nach einer Vorgangsberechnung immer bei *100 %* liegt. Diese Prozentangaben sind einerseits zur weiteren Simulation erforderlich. Andererseits ermöglichen die Prozent- und Zeitwertzuweisungen der *Zeilen 76* und *77* die Darstellung einer

[1460] Siehe *Zeilen 3-69* in *Pseudocodes 12a* und *12b*.
[1461] Siehe *Zeile 71* in *Pseudocode 12b*.

4D-Visualisierung. Hier wird der prozentuale Leistungsfortschritt über die Zeit mit den im *LocalQuantity* verknüpften Bauteilmodellen visualisiert.

Für die Berücksichtigung *prozessabhängiger Modifikationen*[1462] werden in *Zeile 79* die maßgeblichen Berechnungsergebnisse zur Überprüfung aller Abhängigkeitsbeziehungen aufgerufen, die einen prozentualen Leistungsstand von der gegenwärtigen Arbeitsaufgabe (*Task*) als Startvoraussetzung benötigen. Alle Nachfolger, die eine derartige Abhängigkeitsbeziehung besitzen, werden als ***GermCell*** mit der *TaskTransition* referenziert. Ihre Objektinstanzen verweilen so lange in einer *TaskTransition* – also dem Vorgänger –, bis der prozentuale Leistungsstand im Verlauf der Simulationszeit erreicht ist. Für diese Prüfung erfolgt der Aufruf der Funktion *proofGermCells()* der gegenwärtigen *TaskTransition*. Der Inhalt der Prüfungen ist im *Pseudocode 6-14* nachzulesen.

[1462] Siehe *Kapitel 5.2.8*.

Pseudocode 6-12a: Funktion *calculate()* der Klasse *TaskTransition*

```
0:  Erstelle LocalDateTime startDate = findLastDateInToken()   //Siehe Pseudocode 6-3
1:  Erstelle Variable double taskDuration

2:  IF Vorgangsberechnung erfordert Kapazitäten this.getTask().isNeedBand()
3:      //Entnehme lokale Leistungsmengen
4:      Entnehme Variable float quant = this.getTask().getLocalQuantity().getValue()

5:      //Erstelle Hilfsvariablen
6:      Erstelle Variablen float workerFactor = bandFactor = materialFactor = workingAreaFactor = 0
7:      Erstelle Variablen int workerCount = materialCount = workingAreaCount = 0
8:      Erstelle Hashtable<Band, Integer> differentBands

9:      //Berechne den Gesamt-Materialfaktor
10:     FOR über alle erforderlichen Materialien mat aus this.getTask().getProcess().getReqMaterials()
11:         Inkrementiere materialFactor += mat.getFactor()
12:         Inkrementiere materialCount ++
13:     FOREND

14:     //Berechne den Gesamt-Stehflächenfaktor
15:     FOR über alle lokalen Stehflächen wArea aus this.getTask().getLocalQuantity().getWorkingAreas()
16:         Inkrementiere workingAreaFactor += wArea.getFactor()
17:         Inkrementiere workingAreaCount ++
18:     FOREND

19:     //Berechne die kolonnenbasierten Faktoren
20:     FOR über alle Arbeitskräfte cap aus this.getUsedCapacitys()
21:         //Arbeitskraftfaktor
22:         IF cap ist eine Worker-Objektinstanz
23:             Inkrementiere workerFactor += cap.getFactor()
24:             Inkrementiere workerCount ++
25:         IFEND

26:         //Kolonnenweises Zählen der Arbeitskräfte, die für diese Arbeitsaufgabe (Task) gebraucht
27:         //werden und sich auf den Stehflächen (LocalQuantity) befinden. Die Arbeitskräfte können
28:         //unterschiedlichen Kolonnen desselben Gewerks angehören.
29:         IF differentBands enthalten keine Kapazitäten, die der Kolonne cap.getBand() angehören
30:             Setze neuen Eintrag differentBands.key = cap.getBand() und differentBands.value = 1
31:         ELSE
32:             Erstelle Variable float bandFact = differentBands.value, bei differentBands.key == cap.getBand()
33:             Überschreibe differentBands.value = bandFact + 1, bei differentBands.key == cap.Band()
34:         ELSEEND
35:     ENDFOR

36:     //Summiere die ermittelten Kolonnen-Faktoren
37:     Erstelle Variable float sumBand = 0
38:     FOR über alle Einträge entry aus differentBand
39:         Inkrementiere sumBand += entry.getValue()
40:     ENDFOR

41:     //Zusammengefasste Berechnung der Kolonnen-Faktoren
42:     FOR über alle Einträge entry aus differentBand
43:         Inkrementiere bandFactor += (entry.getValue() / sumBand) * entry.getKey().getFactor()
44:     FOREND
```

...

Pseudocode 6-12b: Funktion *calculate()* der Klasse *TaskTransition*

```
45:   //Bilde Durchschnittswerte bei Berücksichtigung mehrerer Faktoren. Summe(FaktorWert/FaktorAnzahl)
46:   Berechne materialFactor = materialFactor / materialCount
47:   Berechne workerFactor = workerFactor / workerCount
48:   Berechne workingAreaFactor = workingAreaFactor / workingAreaCount

49:   //Erfasse weitere „einfache“ faktorielle Gewichtungen
50:   Entnehme Variable float criticalAreaFactor = this.getCriticalAreaFactor()   //„Blocker-Faktoren“
51:   Entnehme Variable float wFieldFactor = this.getTask().getProduction().getWorkingField().getFactor()
52:   Entnehme Variable float buildElementFactors = this.getTask().getLocalQuantity().getFactor()
53:   Entnehme Variable float worldFactor = this.getNet().getWorld().getWorldFactor()

54:   //Prüfe, ob Faktorwerte negative Werte aufweisen. Vorgangsdauer darf nicht = 0 sein
55:   IF workerFactor <= 0 ODER workerCount == 0 THEN Setze workerFactor = 1
56:   IF bandFactor <= 0 THEN Setze bandFactor = 1
57:   IF buildElementFactors <= 0 THEN Setze buildElementFactors = 1
58:   IF workingAreaFactor <= 0 THEN Setze workingAreaFactor = 1
59:   IF materialFactor <= 0 ODER materialCount == 0 THEN Setze materialFactor = 1
60:   IF criticalAreaFactor <= 0 THEN Setze criticalAreaFactor = 1
61:   IF wFieldFactor <= 0 THEN Setze wFieldFactor = 1
62:   IF worldFactor <= 0 THEN Setze worldFactor = 1

63:   //Bereite den Aufwandswert vor und berechne die Vorgangsdauer (siehe Formel des Kapitels 5.2.6)
64:   Entnehme float effort = this.getTask().getProcess().getEffort() * 60    //Umrechnung in Minuten
65:   Erstelle float effortFactor = effort * workerFactor * bandFactor * buildElementFactors
66:                                       * workingAreaFactor * materialFactor * criticalAreaFactor
67:                                       * wFieldFactor * worldFactor
68:   Setze gewichteten Aufwandswert in this.getTask().setEffortFactor(effortFactor)
69:   Berechne taskDuration = quant * effortFactor / workerCount

70: ELSE //Zu IF-Anweisung, Zeile 2. Falls keine Kapazitäten benötigt werden (z. B. Trocknungsvorgang)
71:   Berechne taskDuration = this.getTask().getProcess().getEffort() * 60   //Umrechnung in Minuten
72: ENDELSE

73: //Hier wird die bereits geleistete Leistung (ggf. nach einem „cut“) abgezogen und neue Startwerte gesetzt.
74: Erstelle Variable int durationMinutes ≈ (this.getPercentEnd() – this.getPercentStart()) * taskDuration)
75: Erstelle neuen Endtermin LocalDateTime endDate = startDate.plusMinutes(durationMinutes)
76: Setze prozentualen Leistungsfortschritt this.setPercentDelta(this.getPercentEnd() – this.getPercentStart())
77: Setze Vorgangszeiten this.getProcessEvent().setPocessEvent(new ProcessEvent(startDate, endDate))

78: //Prüfe Startvoraussetzungen für prozessabhängige Modifikationen. Siehe Pseudocode 6-14
79: Führe aus this.proofGermCells()

80: //„Standard-Aufgabe“ beim Schalten. Siehe Pseudocode 6-1
81: Entnehme neue SwitchInformation info aus List<Information>, this.getProcessEvent() und this
82: Setze neue SwitchInformation info in die gegenständliche Transition this.setSwitchInformation(info)
```

6.3.7 Schneiden simulierter Vorgangsdauern

Damit „plötzliche“ Modelländerungen unmittelbar in den Berechnungen berücksichtigt werden können, lässt sich eine berechnete Vorgangsdauer terminweise mit der Funktion *cut(ti: LocalDateTime)* der Klasse *TaskTransition* schneiden.

Das Schneiden findet gem. *Kapitel 5.1.3* immer zu einem frühesten Termin statt, und zwar dann, sobald sich innerhalb der voranschreitenden Simulation ein momentaner Zustand des Gesamtmodells ändert. Geschnitten werden alle errechneten Vorgangsdauern, die den schneidenden Termin zeitlich überschreiten. Mit dem folgenden *Pseudocode 6-13* wird die Vorgehensweise des Schneidens beschrieben.

Pseudocode 6-13: Funktion *cut(ti: LocalDateTime)* der Klasse *TaskTransition*

```
0:  //Für das Schneiden muss zuvor eine Vorgangsdauer durch die gegenwärtige TaskTransition this berechnet
1:  //worden sein. Zudem muss der Simulator einen festen Schneidtermin cutDate vorgeben. Die ursprünglich
2:  //berechnete Vorgangsdauer lässt sich aus this.getProcessEvent() entnehmen.

3:  //Entnehme den Endtermin aus der zuvor geschalteten TaskTransition
4:  Entnehme LocalDateTime endDate = this.getSwitchInformation().getEndDate()

5:  //Hier wird ausgeschlossen, dass der Schneidtermin cutDate mit dem berechneten Endtermin endDate
6:  //übereinstimmt. Erst dann kann eine Vorgangsdauer geschnitten werden.
7:  IF cutDate ist nicht mit endDate identisch
8:     IF cutDate liegt terminlich vor endDate
9:        Entnehme ProcessEvent procEvent = this.getProcessEvent()
10:       //Erfasse die ursprüngliche Vorgangsdauer in Minuten
11:       Entnehme Variable double oldMin = this.getProcessEvent().getDuration()
12:       //Erfasse die neue Vorgangsdauer in Minuten
13:       Entnehme Variable double cutMin = Zeitdifferenz zwischen procEvent.getStartDate() und cutDate

14:       //Interpoliere den Zwischentermin mithilfe des prozentualen Leistungsfortschritts
15:       Erstelle Variable float percCut, percStart, percEnd
16:       Entnehme percStart = this.getPercentStart() und percEnd  = this.getPercentEnd()

17:       Berechne Variable float percCut = percStart + (percEnd – percStart)  * cutMin) / oldMin

18:       //Setze Berechnungsergebnisse für die gegenwärtige TaskTransition this
19:       Setze den prozentualen Leistungsstand als Endzustand this.setPercentEnd(percCut)
20:       Setze den prozentualen Leistungsfortschritt this.setPercentDelta(percEnd – percStart)
21:       Setze den Schneidtermin als neuen Endtermin procEvent.setEndDate(cutDate)

22:       //Erstelle kopierte TaskTransition´
23:       Erstelle TaskTransition copyTran = new TaskTransition(this)  //Die Kopie erfolgt in der Transition

24:       Erstelle Output-Verknüpfung (Hank) von der alten Transition this zur TaskTransition copyTran
25:       Setze Linked-List-Verknüpfung this.setNext(copyTran) und copyTran.setBefore(this)
26:    IFEND
27: IFEND
```

In *Codezeile 23* kopiert[1463] sich die *TaskTransition* beim Schneiden selbst. Dafür bleibt bei der ursprünglichen *TaskTransition* der zuvor errechnete Leistungsfortschritt bis zum Zeitpunkt des schneidenden Termins erhalten. Die restliche Vorgangsberechnung wird verworfen und von der kopierten *TaskTransition'* unter den situativen Gegebenheiten der

[1463] Infolge einer sog. Tiefenkopie bzw. „deep copy“.

Simulation erneut berechnet. Dabei teilen sich die ursprüngliche *TaskTransition* und die kopierte *TaskTransition'* den geschnittenen Leistungsstand. Dieser Leistungsstand ist für die ursprüngliche *TaskTransition* der Endzustand und für die kopierte *TaskTransition'* der Anfangszustand.[1464]

Beim Kopieren verfügt die kopierte *TaskTransition'* über einen identischen Output wie die ursprüngliche *TaskTransition*. Von der Kopie bleiben Outputs ausgeschlossen, die den Input zu einer bereits geschalteten *GermCell* bilden. Die Token der ursprünglichen *TaskTransition* werden mit den neuen Werten überschrieben.

Zudem erhält die ursprüngliche *TaskTransition* die *DateTransition* als Output und die kopierte *TaskTransition'* die *DateTransition* als Input. Daraufhin werden beide *TaskTransitionen* hintereinander verknüpft. Sodann bietet der Simulator den Agenten die kopierte *TaskTransition'* zum Schalten einer neuen Vorgangsberechnung an. Im weiteren Verlauf der Simulation ist es möglich, dass diese Vorgangsdauer ebenfalls geschnitten wird. Die Vorgehensweise wird in *Abbildung 6-30* in drei aufeinander folgenden Schritten vorgestellt.

[1464] Somit wird im Gegensatz zu *Damriantant und Wakefield* die ursprüngliche Transition nicht erneut aufgerufen. Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 227-228.

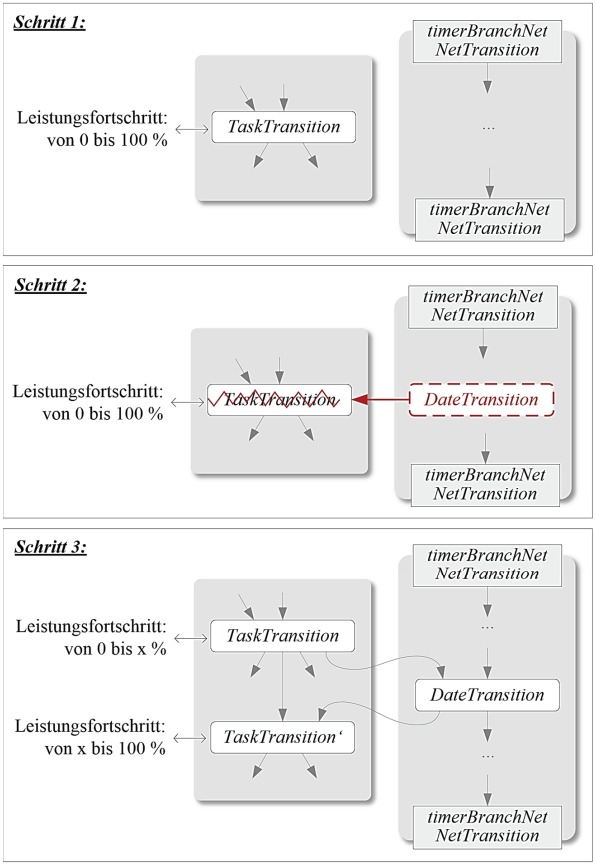


Abbildung 6-30: Prinzip des Schneidens von einer errechneten Vorgangsdauer[1465]

Die Darstellung der *Abbildung 6-30* sieht minimalistisch aus. Tatsächlich erfolgt während der Simulationszeit das Schneiden aller nebenläufigen Vorgangsdauern und kann daher deutlich umfangreicher ausfallen. Dazu werden alle beteiligten *TaskTransitionen* mit der *DateTransition* für den schneidenden Termin ganzheitlich verknüpft. Die ganzheitliche Betrachtung ist durch das Verwerfen bereits ausgerechneter Ergebnisse möglich. Das hat den Vorteil, dass bei erneuten Vorgangsberechnungen immer eine momentane Einzelfallbetrachtung stattfindet. Dabei lassen sich alle zeitparallelen Arbeitsaufgaben untereinander gegenüberstellen und ggf. mit ihren jeweiligen Voraussetzungen verknüpfen, die sie zur Vorgangsberechnung benötigen und bedingen.

Durch das Schneiden dient die *DateTransition* als momentanes, termindiskretes Interface innerhalb der Petri-Netz-Struktur. Vorteilhaft ist, dass aufgrund der verknüpften *DateTransition* die Anzahl der Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den geschnittenen *TaskTransitionen* zueinander reduziert wird. Zudem enthalten die an einem Schnitt beteiligten

[1465] Eigene Darstellung.

TaskTransitionen mit der *DateTransition* einen Referenz-Termin innerhalb des *terminBranchNet*, von dem auf die gesamten momentanen Vorgangsberechnungen zugegriffen werden kann.

Neben dem Schneiden ereignet sich für alle aktivierten *TaskTransitionen*, die nicht schalten können, eine *schrittweise Verschiebung* bis zur nächsten Einzelfallbetrachtung. Folglich findet eine Verschiebung statt, wenn in einer momentanen Einzelfallbetrachtung ungenügende Ressourcen vorhanden sind. Der Simulator verknüpft in diesem Fall die nicht ausführbaren *TaskTransitionen* mit der nächsten *DateTransition*. Dadurch erhält die *TaskTransition* einen spätesten Termin, der in die jeweilige Vorgangsberechnung als Starttermin mithilfe der Funktion *findLastDateInToken()* der Klasse *Transition* ermittelt wird.

Die Vorgehensweise des Schneidens und Verschiebens kann sich so lange wiederholen, bis der Endtermin einer Arbeitsaufgabe erreicht ist. Dieser stellt daraufhin selbst einen neuen Schneidtermin dar, sollte er andere zeitparallele Vorgangsdauern schneiden. Um die gegenseitigen Verknüpfungen realisieren zu können, schaltet der Simulator während dieser Vorgehensweise ***immer wechselseitig*** das *timerBranchNet* und dann das *processBranchNet* fort, bis alle *TaskTransitionen* vom gesamten Petri-Netz vollständig abgearbeitet sind.

Daraus ergibt sich das Fortschreibungsprinzip der in *Kapitel 5.1.3* bezeichneten „Salamitaktik“. In der folgenden *Abbildung 6-31* wird dieses in zehn grafischen Einzelschritten vorgestellt. Eine *TaskTransition* wird durch ein Quadrat mit der Beschriftung „Task“ bezeichnet, eine *DateTransition* hingegen durch eine Raute mit der Beschriftung „Termin“. Die geschwungenen Pfeile stellen in Anlehnung an *Abbildung 5-32* eine *dynamische Dauer* dar, die mithilfe der *TaskTransitionen* berechnet wird. Die Kürzel „cut“ und „push“ bezeichnen einerseits ein momentanes Schneiden und andererseits eine momentane Verschiebung.

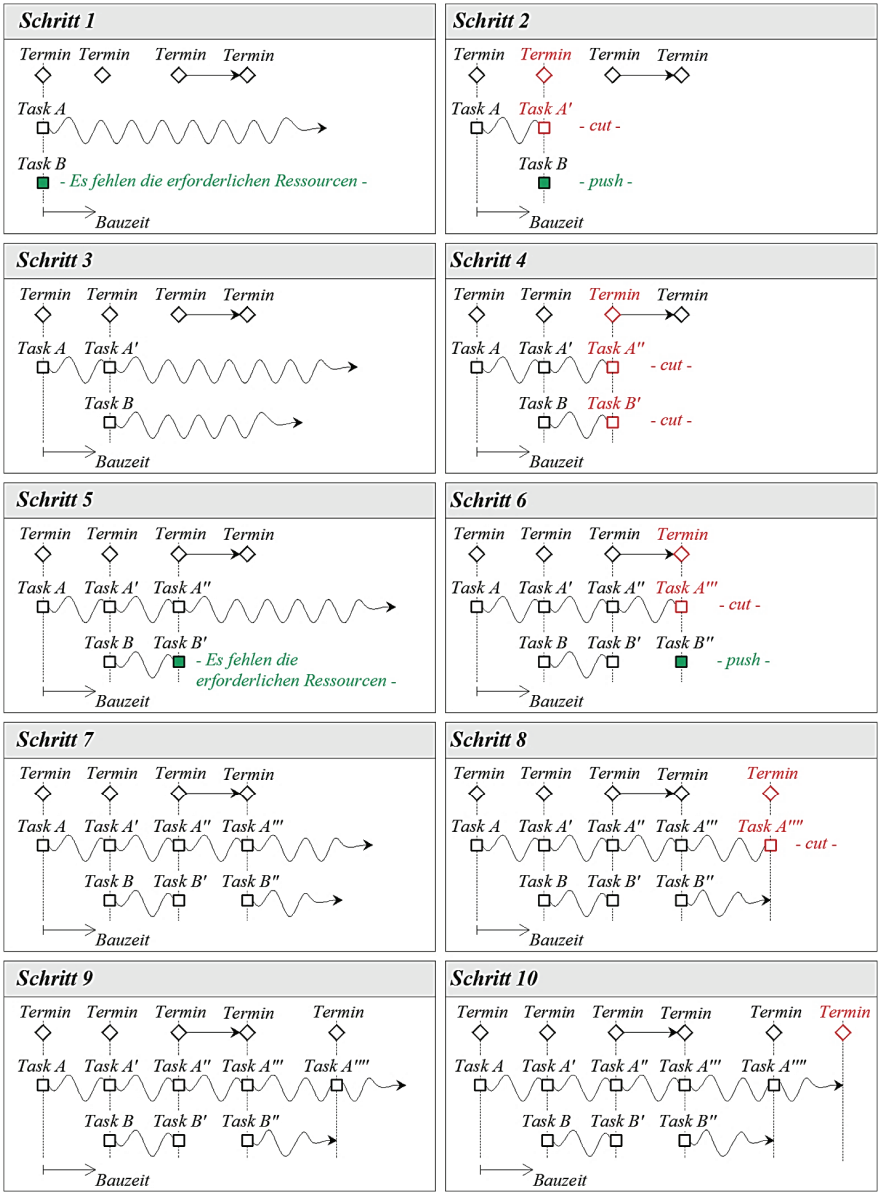


Abbildung 6-31: Fortschreibungsprinzip infolge des Schneidens[1466]

[1466] Eigene Darstellung.

Während des wechselseitigen Schaltens zwischen dem *processBranchNet* und dem *timerBranchNet* findet zu jedem Schritt der *Abbildung 6-31* eine *Einzelfallbetrachtung* statt. In den linksseitigen Einzelbildern schalten die Transitionen des *processBranchNet* und in den rechtsseitigen Einzelbildern die Transitionen des *terminBranchNet*. Dieses wechselseitige funktionale Prinzip umschreibt die rekonfigurierbaren Eigenschaften des entwickelten Simulators. Je nach Anzahl der im Petri-Netz vorhandenen Knoten (bezeichnend für die Varietät) ist die Nachbildung eines komplexen Systemverhaltens mit dem Modell möglich (siehe *Kapitel 2.1*). Darüber hinaus wird durch das Schneiden ein emergentes Systemverhalten im *processBranchNet* und im *timerBranchNet* simuliert. Abhängig von den Simulationssituationen entstehen zu jedem Schnitt neue Elemente (*Transitionen*) und Abhängigkeitsbeziehungen (*Hanks*).

Die simulierten Arbeitsaufgaben erschaffen Termine, die ihre eigenen Startvoraussetzungen sind. Dadurch lässt sich die Weitergabe eines errechneten, zeitlichen *Störungspotentials* erreichen, so dass mit dem wechselseitig funktionalen Prinzip situative Störungssachverhalte gem. *Kapitel 2.1.8* kausal werden.

6.3.8 Nichtlineare Ansätze simulierter Vorgangsdauern

Beim Schneiden muss der Leistungsfortschritt einer Arbeitsaufgabe sukzessiv ermittelt werden, da sich dieser während der Simulation unterschiedlich stark aufbauen bzw. fortschreiben kann. Dies ist abhängig von der jeweiligen Berechnungsfunktion und ihrer Steigung. Letztere gibt die im Sinne des *Kapitels 2.1.7* situative *Produktivität* der Arbeitsaufgaben wieder und kann während der Simulation unterschiedlich ausfallen. Über die simulierte Bauzeit wird immer der letzte Leistungsstand einer *TaskTransition* als konstante Eingangsgröße der Berechnungsfunktion für die sukzessive Weiterberechnung verwendet, bis ein Leistungsstand von *100 %* erreicht ist. Damit wird die in *Kapitel 2.1.6* definierte *Autokorrelation* erreicht. Eine Unterbrechung, die zwischen den geschnittenen Vorgangssegmenten zustande kommt, lässt sich daher für den nächsten Berechnungsschritt als neuer Ausgangszustand (Funktionskonstante) aufrechterhalten.

Auf dieses Prinzip wurde im *Kapitel 6.3.6* mit der Übergangsfunktion *calculate()* der *TaskTransition* für lineare Vorgangsberechnungen eingegangen. Um den Einarbeitungseffekt zu berücksichtigen, könnten auch *nichtlineare Funktionen* mit höheren Polynomgraden verwendet werden. Eine derartige Funktion müsste mit einer spezialisierten *TaskTransition* herausgearbeitet werden.[1467] In den Berechnungen könnte die Anzahl der Wiederholungen einzelner Kapazitäten gezählt werden, die bei der Vorgangsberechnung mit einfließen.

Die folgende *Abbildung 6-32* enthält eine exemplarische Gegenüberstellung einer geschnittenen Arbeitsaufgabe, die einen *linearen Leistungsfortschritt* (oben) und einen *nichtlinearen Leistungsfortschritt* (unten) darstellt. Die Vorgangsdauern der beiden Berechnungsweisen, abgebildet durch jeweils drei Vorgangsintervalle, sind für jeden Schneidvorgang gem. *Kapitel 5.1.3* untereinander angeordnet.

Die erste linear und nichtlinear errechnete Vorgangsdauer ist jeweils mit einem Leistungsfortschritt von *0* bis *100 %* in einem einzelnen Segment zu sehen. Entsprechend darunter ist das Vorgangsintervall mit zwei Segmenten angeordnet. Es wird durch den ersten

[1467] Derartige Vorgangsberechnungen wurden im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet. Der entwickelte Simulationsansatz bietet aber eine entsprechende Grundlage für weitere Forschungsarbeiten.

Termin „date A“ geschnitten. Die darunter liegenden Vorgangsintervalle umfassen jeweils drei Segmente. Diese Aufteilung kommt aufgrund des zweiten Schneidtermins „date B“ zustande. Anhand der Gegenüberstellung der dargestellten Vorgangsintervalle mit den qualitativen linearen und nichtlinearen Leistungsfortschritten ist erkennbar, dass die errechneten Leistungsstände (Funktionskonstanten) trotz identischer Schneidtermine voneinander abweichen können.

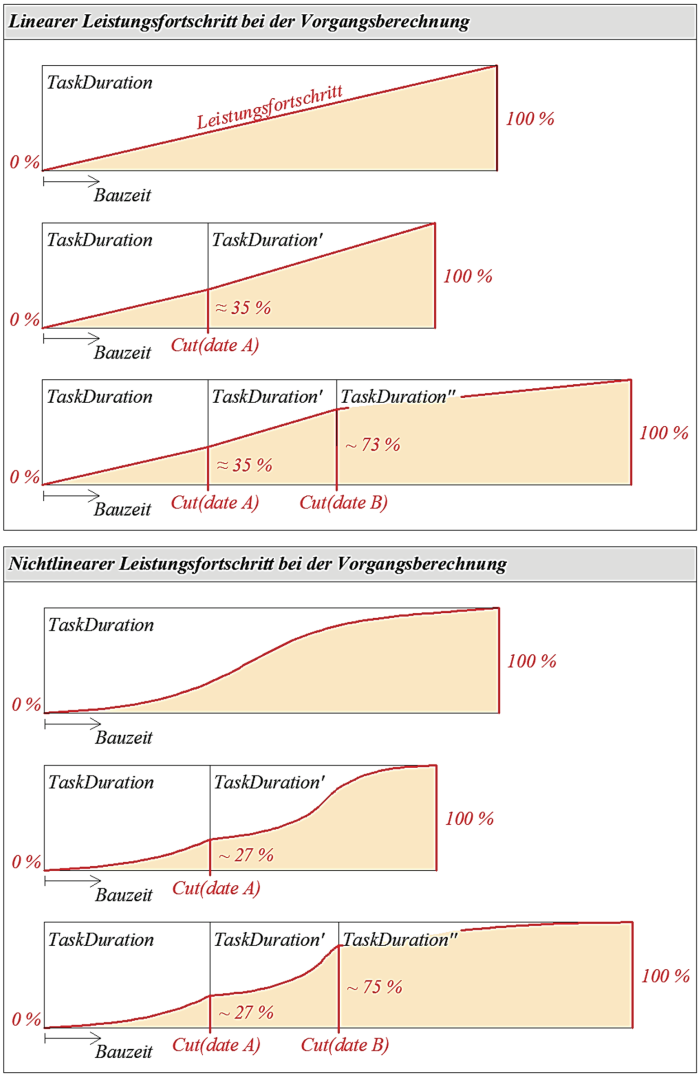


Abbildung 6-32: Leistungsfortschritt geschnittener Vorgangsintervalle[1468]

[1468] Eigene Darstellung.

Wie sich aus *Abbildung 6-32* entnehmen lässt, kann ein nichtlinearer Leistungsfortschritt dazu beitragen, dass prozentuale Vorgangsverknüpfungen – infolge prozessabhängiger Modifikationen – zu einem anderen Zeitpunkt ausgelöst werden. Hierauf wird im weiteren Text näher eingegangen.

6.3.9 Fortschreibungsprinzip prozessabhängiger Modifikationen

Mit der in *Kapitel 6.2.5* beschriebenen Liste *getPredessors()<Sequence, Float>* der Schnittstelle *Sequence* lassen sich prozentuale Abhängigkeitsbeziehungen für nachfolgende Arbeitsaufgaben (*Task*) definieren. Die Nachfolger werden als *GermCell* (Keimzelle) in der ihr zugeordneten Liste *getGermCells()* der jeweiligen *TaskTransition* „mitgeführt". Sobald eine *TaskTransition* ein oder mehrere *GermCells* enthält, ist sie eine ***Wirt-Transition***.

Die *Abbildung 6-33* enthält eine schematische Darstellung über das Mitführen einer *GermCell*, dargestellt in drei Schritten. Für die Abhängigkeitsbeziehung der *GermCell* besteht ein Leistungsstand von *80 %*.

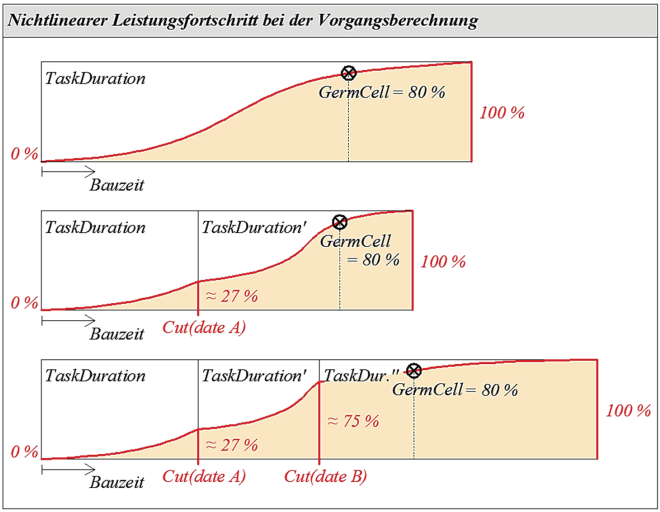


Abbildung 6-33: GermCell-Verschiebung aufgrund fortgeschriebener Berechnungsfunktionen[1469]

Laut *Abbildung 6-33* ist der vorgegebene Leistungsstand von *80 %*, je nach simulierter Produktivität, in verschiedene zeitliche Lagen verschoben. Für den gewollten Leistungsstand von *80 %* können daher unterschiedliche Termine in Frage kommen. Im Zuge des wechselseitigen Schaltens zwischen dem *timerBranchNet* und dem *processBranchNet* muss die vom Anwender vorgegebene Abhängigkeitsbeziehung als prozentuale Startvoraussetzungen erreicht und der dazu passende Termin ermittelt werden.

Mit dem folgenden *Pseudocode 6-14* lassen sich die maßgeblichen Termine aller *GermCells* anhand ihres jeweiligen Leistungsstands für eine *Wirt-Transition* berechnen.

[1469] Eigene Darstellung. Aufbauend auf *Abbildung 6-32*.

Pseudocode 6-14: Funktion *proofGermCells()* der Klasse *TaskTransition*

```
0:  //Dieser Pseudocode eignet sich ausschließlich für einen linearen Leistungsfortschritt. Er wird innerhalb der
1:  //Übergangsfunktion einer TaskTransition aufgerufen (siehe Pseudocode 12b, Zeile 79).

2:  Entnehme LocalDateTime startDate aus this.getProcessEvent().getStartDate()
3:  Entnehme Variable double taskDuration aus this.getProcessEvent().getDuration()

4:  Erstelle Variable int germCellMinutes

5:  //Schleife über alle GermCell-Einträge der gegenwärtigen TaskTransition
6:  FOR über alle Einträge entry aus this.getGermCells()
7:     Entnehme Variable Float x aus entry.getKey() und NetElement el aus NetElement()

8:     //Ermittle die erforderlichen Minuten bis zum terminlichen Eintritt der prozessabhängigen Modifizierung
9:     //für einen linearen Leistungsfortschritt(!)
10:    Berechne germCellMinutes ≈ x * taskDuration
11:    Berechne LocalDateTime measuringDate = startDate.plusMinutes(germCellMinutes)

12:    //Hinterlege potentielle „Cut-Termine“ für den Simulator
13:    Ergänze List<KeyValueTupel> this.getMeasuringPoints().add(new KeyValueTupel(measuringDate, el)
14: ENDFOR
```

Sobald der errechnete Termin *measuringDate* einer *GermCell* durch den Simulator als maßgeblicher „Schneidtermin“ erkannt wird, kann ein Schneiden der zeitparallelen Vorgangsdauern nach der im *Pseudocode 6-13* beschriebenen Vorgehensweise erfolgen. Dieses Schneiden leitet der Simulator ein.

Der gesamte Ablauf zum „Wirksamwerden“ einer prozentualen Startvoraussetzung wird in *Abbildung 6-34* dargestellt. Darin enthält eine *Wirt-Transition* (*TaskTransition*) eine *GermCell*, die auf die *TaskTransition XY* verweist und einen prozentualen Leistungsstand von *x %* als Startvoraussetzung bedingt. Die *Wirt-Transition* ist ein Input der *TaskTransition XY*.

Der maßgebliche Termin *measuringDate* beim Leistungsstand *x %* wird mithilfe des *Pseudocodes 6-14* bestimmt. Mit diesem Termin prüft der Simulator, ob es sich hierbei um den frühesten aller potentiellen Schneidtermine handelt. Sollte dies der Fall sein, ist der Termin *measuringDate* der Schneidtermin aller nebenläufigen Vorgangsdauern. Für diesen wird eine *DateTransition* erstellt – solange für diesen Termin noch keine *DateTransition* innerhalb des *timerBranchNet* existiert.

Daraufhin erfolgt das nach dem *Kapitel 6.3.7* beschriebene Schneiden für die *Wirt-Transition*, so dass sie sich selbst kopiert und verknüpft. Die anfängliche Verknüpfung zwischen der ursprünglichen *TaskTransition* und der *TaskTransition XY* bleibt erhalten. Aufgrund des Schneidens beginnt die Verknüpfung zum Termin des errechneten Leistungsstands von *x %*.

Die *TaskTransition XY* bekommt einen Input von der *DateTransition.* Sollte jedoch eine *Wirt-Transition* zeitlich vor dem prozentualen Leistungsfortschritt geschnitten werden, erhält die kopierte *TaskTransition'* alle nicht wirksam gewordenen *GermCells*. Diese Vorgehensweise wiederholt sich so lange, bis ein Schneidtermin mit dem errechneten Termin *measuringDate* übereinstimmt.

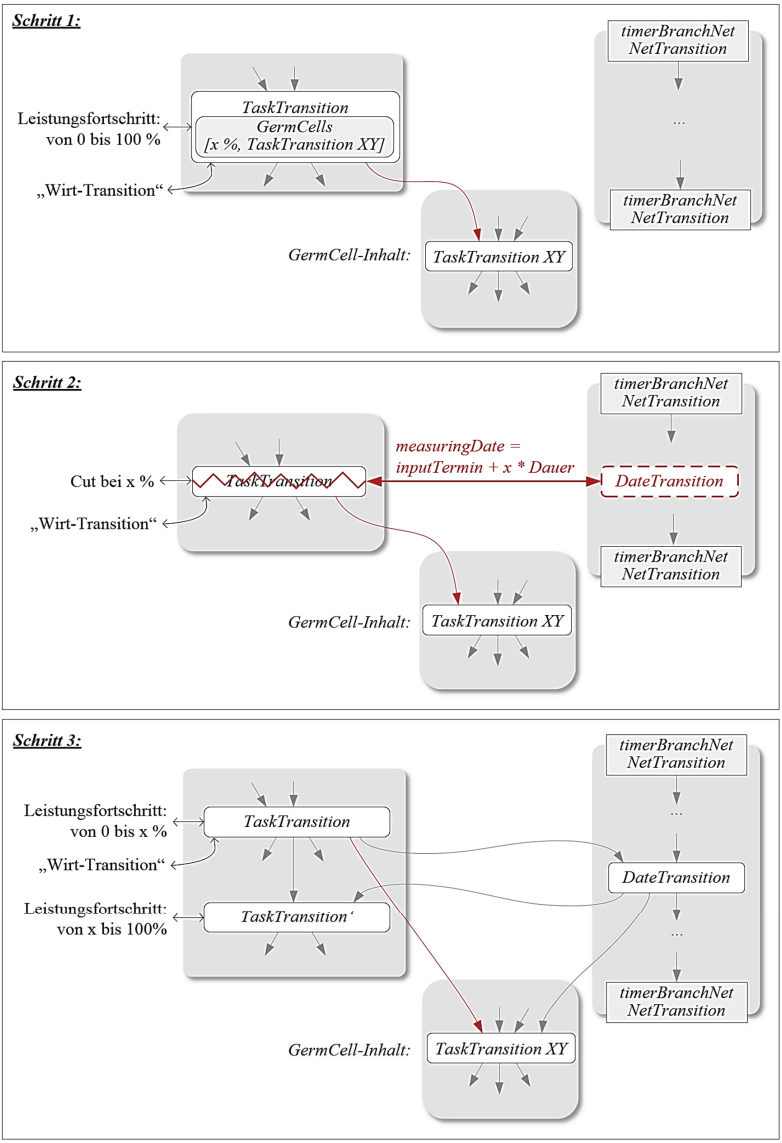


Abbildung 6-34: Prinzip prozentualer Abhängigkeitsbeziehungen (TaskTransition als GermCell)[1470]

Das oben beschriebene Prinzip eignet sich ebenso zur Ermittlung einer wirksam werdenden Abhängigkeitsbeziehung eines *Teilnetzes*, das den prozentualen Leistungsstand von einer Arbeitsaufgabe einer *Wirt-Transition* voraussetzt. Die Vorgehensweise der Verknüpfung erfolgt analog zu dem zuvor beschriebenen Schema (siehe *Abbildung 6-35*).

[1470] Eigene Darstellung.

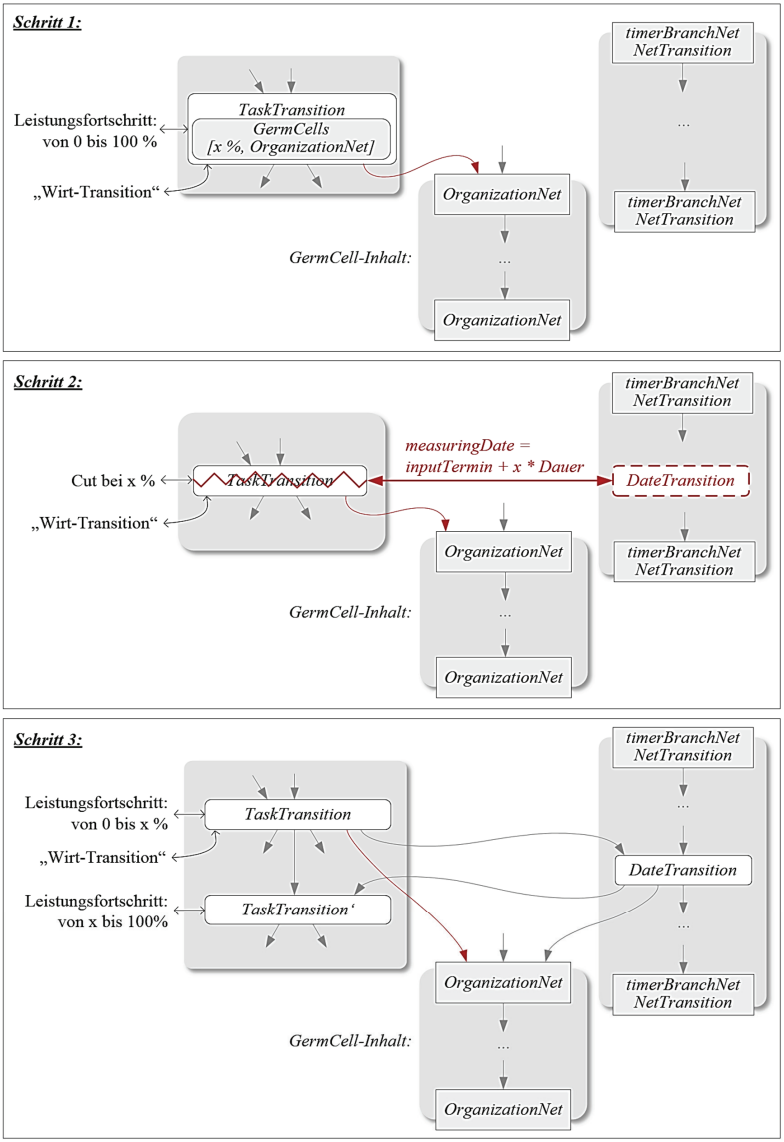


Abbildung 6-35: Prinzip prozentualer Abhängigkeitsbeziehungen (Teilnetz als GermCell)[1471]

In *Abbildung 6-36* wird das Fortschreibungsprinzip für *prozessabhängige Modifikationen* gem. *Kapitel 5.2.8* gezeigt. Dies lässt sich durch das Mitführen einer *GermCell* erreichen. Die *GermCell* ist durch einen Kreis mit einem Kreuz versinnbildlicht und wird im *Schritt 6* wirksam.

[1471] Eigene Darstellung.

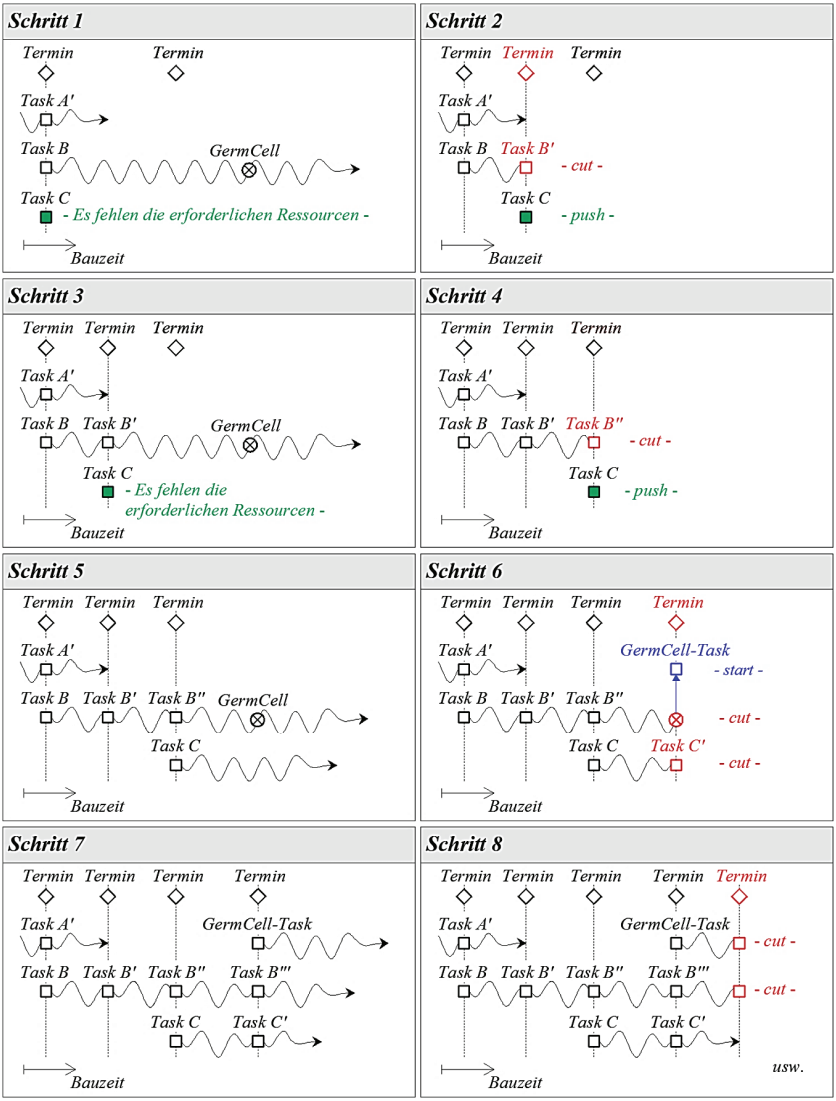


Abbildung 6-36: Fortschreibungsprinzip einer GermCell für prozessabhängige Modifikationen[1472]

Eine *GermCell* kann auch als *einfache leistungsdiskrete Modifikation* ausgearbeitet werden, bei der keine Vorgänge anschließen, sondern lediglich eine Markierung mitgeführt wird (siehe *Kapitel 8.2.3*).

[1472] Eigene Darstellung.

6.3.10 Aufbau der Simulationsschleife (Simulator)

Die Hauptaufgaben des Simulators wurden im vorausgegangenen Text beschrieben. Die wesentlichen Berechnungsschritte sind im *Pseudocode 6-15a* und im *Pseudocode 6-15b* durch die Simulationsschleife einsehbar, in der das „Zusammenspiel" aller vorgestellten Funktionen und Komponenten erfolgt.

Pseudocode 6-15a: Erweiterte Simulationsschleife

```
0:  WHILE Simulationsschleife mit analogen Abbruchkriterien, siehe Pseudocode 6-4
1:    Entnehme Liste<Transition> actTran alle aktivierten Transitionen gem. Pseudocode 6-4, Zeilen 11-16
2:    Erstelle Liste<Transition> swichtedTaskTransitions
3:    Erstelle DateTransition dTran und cutTran

4:    //Schalte alle Transitionen durch, die keine TaskTransition oder DateTransition sind – schalte
5:    //insbesondere NetTransition oder Schalter-Transitionen. Die endTransition vom timerBranchNet darf
6:    //nicht an dieser Stelle geschaltet werden, da noch bestimmbare Termine berechnet werden können.
7:    FOR über alle tran aus actTran  //Schleife muss wegen Remove-Funktion rückwärts mit Iterator laufen
8:      IF tran ist keine Objektinstanz der Klassen TaskTransition ODER DateTransition
9:        IF tran ist nicht timerBranchNet.getEndTransition() THEN Schalte actTran.switchTransition()
10:       ENDIF
11:       Entferne actTran.remove(tran)
12:     ELSE
13:       IF tran ist eine DateTransition THEN Setze dTran = tran und Entferne actTran.remove(tran)
14:       ENDIF
15:     ENDELSE
16:   ENDFOR

17:   //Falls keine Kapazitäten verfügbar sind oder mehrere Termine aufeinander folgen
18:   Setze für dTran jeweils eine Output-Verknüpfung zu allen actTran
19:   Schalte dTran     //Hierdurch kommt die Verschiebung aller wartenden TaskTransitionen zustande

20:   //Schalte alle TaskTransitionen, die keine Kapazitäten erfordern (z. B. für Trocknungsvorgänge)
21:   FOR über alle tran aus actTran  //Schleife muss wegen Remove-Funktion rückwärts mit Iterator laufen
22:     IF tran.getTask().isNeedBand() == false
23:       Schalte tran
24:       Ergänze swichtedTaskTransitions um tran
25:       Entferne actTran.remove(tran)
26:     ENDIF
27:   ENDFOR

28:   //Vorgangsberechnungen infolge der kapazitiven Verfügbarkeitsprüfungen
29:   Schalte alle aktivierten TaskTransition aus actTran, die durch die verfügbaren Kapazitäten erreicht
30:         werden können. Siehe Aktivitätsdiagramm in Abbildung 6-27
31:   Ergänze swichtedTaskTransitions mit allen geschalteten actTran
32:   Setze alle verwendeten Kapazitäten wieder frei mit Capacity.setUsed(false)

33:   //Ermittle den maßgeblichen Termin für ein etwaiges vorgangsbezogenes Schneiden
34:   Erstelle List<KeyValueTupel> cutDates für alle potentiellen Termine

35:   //Ermittle den nächstmöglichen Termin aus dem timerBranchNet
36:   Entnehme TimerNet tiNetNext aus world.getPetriNet().getTimeMap().higherEntry(dTran.getDate())
37:   IF tiNetNext != null THEN Entnehme DateTransition dTranNext = tiNetNext.getDateTransition()
38:   ENDIF
```

Pseudocode 6-15b: Erweiterte Simulationsschleife

```
39:   //Liste alle potentiellen Termine, die zum Schneiden geeignet sind, auf
40:   IF dTranNext != null
41:       //Für die nächste DateTransition
          THEN Ergänze cutDates.add(new KeyValueTupel(dTranNext.getDate(), dTranNext)
42:   ENDIF

43:   FOR über alle TaskTransition tran aus swichtedTaskTransitions
44:       FOR über alle KeyValueTupel germCell aus tran.getMeasuringPoints()
45:           //Für alle GermCells
46:           Ergänze cutDates.add(new KeyValueTupel(germCell.getKey(), tran)
47:       ENDFOR
48:       //Für alle Vorgangsanfänge
49:       Ergänze cutDates.add(new KeyValueTupel(tran.getProcessEvent().getStartDate(), tran)
50:       //Für alle Vorgangsabschlüsse
51:       Ergänze cutDates.add(new KeyValueTupel(tran.getProcessEvent().getEndDate(), tran)
52:   ENDFOR

53:   //Bestimme den schneidenden Termin
54:   Sortiere cutDates chronologisch anhand der eingetragenen Termine
55:   Entnehme LocalDateTime currentCutDate als ersten Eintrag aus cutDates

56:   //Schneide alle swichtedTaskTransitions, die durch currentCutDate zeitlich geschnitten werden können
57:   FOR über alle tran aus swichtedTaskTransitions
58:       //Sobald die Transition tran geschnitten werden kann.
59:       IF Vorgangsdauer ist schneidbar tran.getProcessEvent().isDateInDuration(currentCutDate) == true
60:           //Schneide errechnete Vorgangsdauern, siehe Pseudocode 6-13
61:           Schneide geschaltete Transition tran.cut(currentCutDate)
62:           //Arbeite Transition-Instanzen in das timerBranchNet ein, siehe Pseudocode 6-9
63:           Führe aus world.getPetriNet().getTimerBranchNet().addDate(currentCutDate, tran)
64:       IFEND
65:   FOREND

66:   //Erfasse schneidende DateTransition
67:   Entnehme TimerNet cutTimerNet = world.getPetriNet().getTimeMap().get(currentCutDate)
68:   Entnehme DateTransition = cutTimerNet.getDateTransition()

69:   //Verknüpfe alle am Schneiden beteiligten Transitionen
70:   Entnehme TimerNet cutTimerNet = world.getPetriNet().getTimeMap().get(currentCutDate)
71:   Erstelle Input- und Output-Verknüpfungen (Hank) für alle TaskTransitionen aus switchedTransitions, die
72:           terminlich mit currentCutDate enden gem. Abbildung 6-30
73:   Erstelle Input- und Output-Verknüpfungen (Hank) für alle GermCells, die terminlich mit currentCutDate
74:           wirksam werden gem. Abbildung 6-35 und Abbildung 6-36
75: ENDWHILE //Siehe Zeile 0
```

Mit dieser Vorgehensweise findet eine ganzheitliche Betrachtung statt, bei der die Bestandteile des Petri-Netzes untereinander intensiv verknüpft werden. Die Struktur, die sich daraus ergibt, ist durch Anordnungsbeziehungen kaum mehr nachvollziehbar. Aus diesem Grund wurden die Simulationsergebnisse mit dem *entwickelten Darstellungskonzept* und einer zusätzlichen 4D-Visualisierung für den Anwender ausgearbeitet (siehe *Kapitel 5* und *Kapitel 7*). Diese Darstellung konnte mit den *ProcessEvents* und den Teilnetzstrukturen des Petri-Netzes realisiert werden, die sich aus den *SwitchInformationen* der geschalteten Token, der Liste *world.getTokenHistory()*, entnehmen lassen.

7 Studien mit dem prototypisch entwickelten Simulator

7.1 Testläufe für simulierte Soll(0)-Bauablaufmodelle

7.1.1 Datenaustausch und Vorstellung des Szenarios

Im oberen Teil der *Abbildung 7-1* ist ein Screenshot des in *Kapitel 6.2.1* thematisierten Export-Plugins dargestellt, das in der Modellierungssoftware *Autodesk Revit Architecture 2016* im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Das Export-Plugin ist im Ribbon-Menu innerhalb von *Autodesk Revit Architecture 2016* geöffnet und zum Zeitpunkt des XML-Datenexports zu sehen. Unten befindet sich ein weiterer Screenshot vom 4D-Viewer des entwickelten Simulationstools.

Beide Teilbilder stellen das Ergebnis eines einfachen BIM-Gebäudemodells dar. Dieses dient im weiteren Text als Grundlage für Testläufe zur Evaluierung des entwickelten Simulationsansatzes. Es umfasst ***32 Räume*** über *zwei Etagen*, in denen ***Malerarbeiten*** simuliert werden. Außerdem befinden sich dort ***vier Nassräume*** zur zeitgleichen Simulation von ***Fliesenarbeiten***.

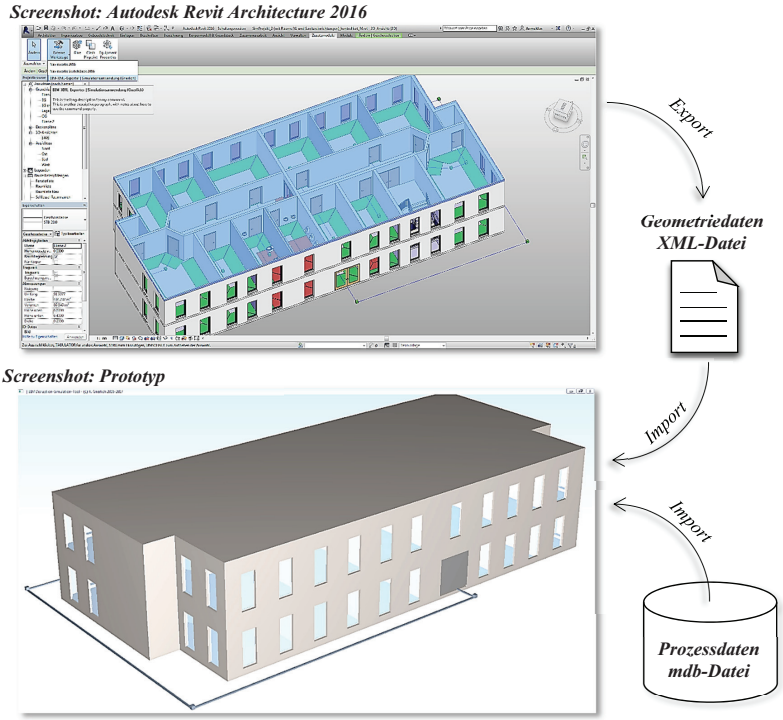


Abbildung 7-1: Entwurf und Datenaustausch des BIM-Gebäudemodells[1473]

[1473] Eigene Darstellung.

Auf die visuelle Darstellung des *Prozessmodells* wird verzichtet, weil die Prozessdaten in einer umfangreicheren *MS Access-Datenbank* vorliegen und deren Visualisierung keinen Mehrwert gegenüber den in *Kapitel 6* gezeigten Datenstrukturen vermitteln würde.

Abbildung 7-2 zeigt das ***Wegenetz***, das die Agenten innerhalb des Gebäudemodells ablaufen. Für eine bessere Übersicht sind dort alle anderen Bauteilmodelle ausgeblendet.

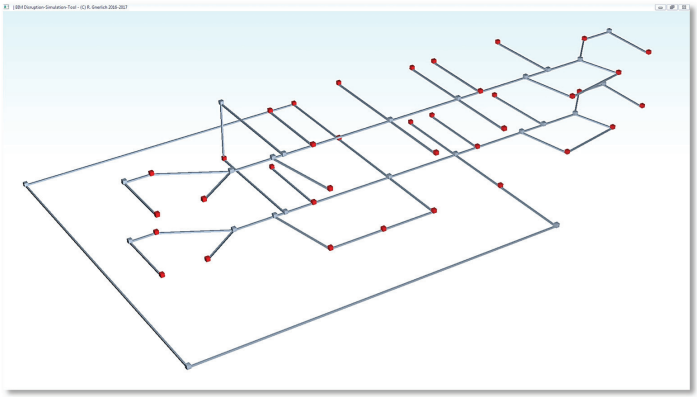


Abbildung 7-2: Wegenetz des entworfenen BIM-Gebäudemodells[1474]

Vorerst werden Soll(0)-Bauablaufmodelle für Malerarbeiten simuliert. Für die Simulationsexperimente stellt sich die Gliederung der Aufbaustruktur wie folgt dar:

Company: *Unternehmen A*
- Construction: *Malerarbeiten*
  - Category: *Wand und Deckenflächen grundieren*
    - Production: *Raumweise Arbeitsbereiche (mehrere)*
      - Task: *Wand- und Deckenflächen vorbereiten, grundieren*
      - Task: *Einwirkzeit Tiefgrund (24 Stunden)*
  - Category: *1. Deckanstrich mit Dispersionsfarbe*
    - Production: *Raumweise Arbeitsbereiche (mehrere)*
      - Task: *1. Anstrich mit Dispersionsfarbe (optional)*
      - Task: *Trocknungszeit (12 Stunden)*
  - Category: *2. Deckanstrich mit Dispersionsfarbe*
    - Production: *Raumweise Arbeitsbereiche (mehrere)*
      - Task: *1. Anstrich mit Dispersionsfarbe (optional)*
      - Task: *Trocknungszeit (12 Stunden)*

Wird näher betrachtet.

Die Malerarbeiten setzen sich aus den *drei* nacheinander auszuführenden Teilvorgängen zusammen:

[1474] Eigene Darstellung.

1. ***„Wand- und Deckenflächen vorbereiten, grundieren“***
   - Zeitaufwandswert = *0,033 h/m²* für alle Raumseiten
2. ***„1. Anstrich mit Dispersionsfarbe“ (optional)***
   - Zeitaufwandswert = *0,083 h/m²* für Wand- und Deckenseiten eines Raums
   - Zeitaufwandswert = *0,090 h/m²* für Deckenseiten eines Raums
   - Zeitaufwandswert = *0,079 h/m²* für Wandseiten eines Raums
3. ***„2. Anstrich mit Dispersionsfarbe“ (optional)***
   - Zeitaufwandswert = *0,100 h/m²* für Wand- und Deckenseiten eines Raums
   - Zeitaufwandswert = *0,120 h/m²* für Deckenseiten eines Raums
   - Zeitaufwandswert = *0,090 h/m²* für Wandseiten eines Raums

Zudem wird nach jedem Teilvorgang eine Trocknungszeit angesetzt. Für die Grundierungsarbeiten dauert die Einwirkzeit *24 h*. Hingegen beträgt die Trocknungszeit der Dispersionsanstriche *12 h*. Bei dem entworfenen Szenario können die Arbeitsaufgaben (*Task*) in jedem Arbeitsbereich nacheinander ausgeführt werden. Alle drei Teilvorgänge werden von einer Kolonne bearbeitet.

Zur Erledigung der Arbeitsaufgaben geht die Kolonne der in *Abbildung 7-3* durch Pfeile hervorgehobenen Fertigungsrichtung nach. Jeder Pfeil stellt einen Arbeitsplatzwechsel dar. Neben den Raumbezeichnungen ist *für jeden Raum* der *lokale Mengenanteil M* der *Malerarbeiten* in der Einheit [m²] angegeben. Die Mengenanteile der Nassräume *R08*, *R09*, *R26* und *R27* sind niedriger, weil dort nur die Decken gestrichen werden – die restlichen Raumseiten werden gefliest. Die Räume weisen teilweise in beiden Etagen unterschiedliche Mengenanteile wegen der Wand- bzw. Deckenöffnungen auf.

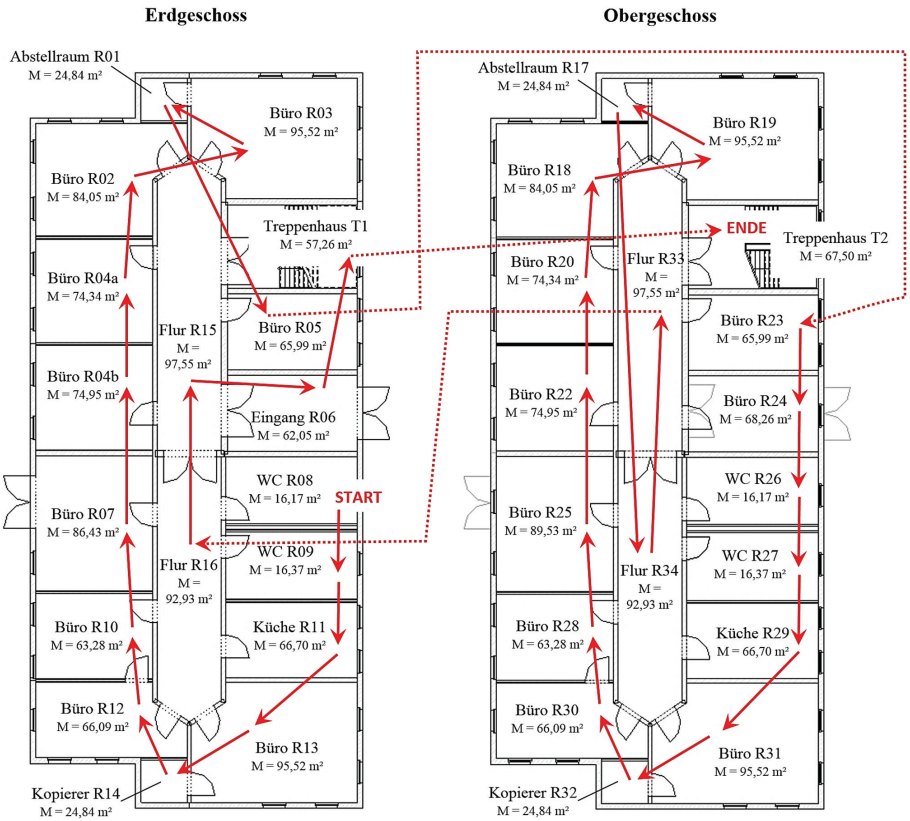


Abbildung 7-3: Darstellung des Gebäudes mit Fertigungsrichtung der Malerarbeiten[1475]

7.1.2 Genauigkeit des Simulationsansatzes gegenüber einer Handrechnung

Zu Beginn wird nur der Teilvorgang „Wand- und Deckenflächen vorbereiten, grundieren" betrachtet. Die darauf folgenden Einwirkzeiten bleiben zuerst außen vor. Aus dem Produktmodell lässt sich für diesen Teilvorgang eine auszuführende Leistungsmenge (als BIM-Menge gem. *Kapitel 5.2.3*) von *2.352,28 m²* ermitteln.

Um die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* in allen Räumen nacheinander auszuführen, können mithilfe der Formel des *Kapitels 3.2.3* folgende Ausführungszeiten berechnet werden:

- ***Bauablaufmodell A:*** Kolonne mit *vier* Arbeitskräften (AK) *19,41 h* Arbeitsstunden,
- ***Bauablaufmodell B:*** Kolonne mit *drei* Arbeitskräften (AK) *25,88 h* Arbeitsstunden,
- ***Bauablaufmodell C:*** Kolonne mit *zwei* Arbeitskräften (AK) *38,81 h* Arbeitsstunden,
- ***Bauablaufmodell D:*** Kolonne mit *einer* Arbeitskraft (AK) *77,63 h* Arbeitsstunden.

[1475] Eigene Darstellung. Angegeben sind die *Leistungsmengen M* der Anstricharbeiten in [m²].

Für einen Vergleich zwischen den einzelnen Vorgangsdauern je Arbeitsbereich stellt das Diagramm der *Abbildung 7-4* die manuell ermittelten sowie die durch den Computer simulierten Berechnungsergebnisse gegenüber. Die Arbeitsaufgaben werden i. S. v. *Kapitel 2.1.7* durch die Kolonnenproduktivität in der Einheit [m²/h] angegeben. Das *Bauablaufmodell D* stellt den gesamten leistungsbezogenen Arbeitsaufwand der eingesetzten Arbeitskräfte dar. Zur Übersicht sind alle Arbeitsaufgaben nach der in *Abbildung 7-3* gezeigten Fertigungsrichtung hintereinander angeordnet.

In der Darstellung der *Abbildung 7-4* autokorrelieren die einzelnen Arbeitsaufgaben und geben eine zusammenhängende Funktion gem. *Kapitel 2.1.6* wieder. Als Orientierungshilfe sind die Fertigstellungszeitpunkte der Räume *R01*, *R07*, *R29* und *R34* eingezeichnet.

Die Simulationsergebnisse stimmen mit der manuellen Berechnung annähernd überein. Jeder abgebildete Kreis gibt das Ausführungsende eines *Arbeitsbereichs* bzw. Raums wieder. Dabei werden in dem Diagramm die Ergebnisse der Handrechnung durch dunkle größere Kreise und die Simulationsergebnisse durch weiße kleinere Kreise dargestellt. Die Abweichung zwischen manueller und simulierter Berechnung lässt sich anhand der Zentrierung der Kreise zueinander nachvollziehen.

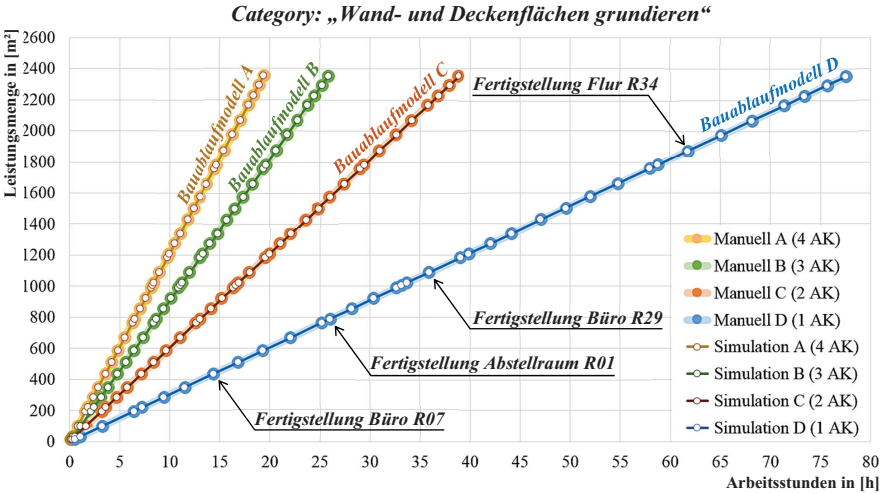


Abbildung 7-4: Gegenüberstellung manueller und simulierter Berechnungen je Arbeitsbereich[1476]

[1476] Eigene Darstellung.

Folgende Unterschiede konnten im Einzelnen festgestellt werden:

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse[1477]

Bauablaufmodell	Berechnete Gesamtarbeitsstunden in [h]			Betrag der größten Abweichung in einem Arbeitsbereich in [h]
	Handrechnung (manuell)	Simulation	Betrag der Abweichung	
A (4 AK)	19,41	19,38	0,03	0,006893127
B (3 AK)	25,88	25,87	0,01	0,007878835
C (2 AK)	38,81	38,88	0,07	0,007611795
D (1 AK)	77,63	77,57	0,06	0,006969838

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem gesamtsimulierten *Bauablaufmodell C* mit zwei Arbeitskräften eine maximale Ungenauigkeit gegenüber der manuellen Berechnung von *0,18 %* mit ca. *4,2 Min.* vorliegt. Die größte Abweichung zwischen Handrechnung und Simulation in einem einzelnen Arbeitsbereich liegt für den Raum *R18* beim *Bauablaufmodell B* vor. Die Abweichung beträgt dort rechnerische *0,473 Min*.

Grundsätzlich sind Abweichungen zwischen der Simulation und der manuellen Berechnung nicht in Gänze vermeidbar. Das lässt sich auf das *minutenweise Auf- und Abrunden* der Simulation zurückführen, das nicht nur bei der Vorgangsberechnung, sondern grundsätzlich auch beim Schneiden der Vorgangsdauern erfolgt. Die Anteile des Rundens können sich akkumulieren. Im Mittel gleichen sich diese aus und nähern sich letztendlich der Handrechnung an. Wie die Ergebnisse zeigen, kommen nur minimale Abweichungen zustande, die für das *tageweise* Auslegen von Fristen und Terminen nach §§ 186 ff. BGB ohnehin nicht ins Gewicht fallen dürften (siehe *Kapitel 3.3.2*).

7.1.3 Evaluierung der geometrischen Gewichtung

Der oben gezeigte Versuchsaufbau wird dadurch erweitert, dass zusätzlich eine geometrische Gewichtung der lokalen Arbeitsbereiche *gem. Kapitel 5.2.7* vorgenommen wird. Diese Gewichtungen sind frei gewählt. Zunächst erhalten alle Räume des Flurs (*R06*, *R15*, *R16*, *R33* und *R34*) einen Gewichtungszuschlag von *+15 %*. Mit dem Zuschlag sollen kurzzeitige Unterbrechungen in den Fluren berücksichtigt werden, da Personen diesen durchlaufen. In Büroräumen ist dies dagegen weniger wahrscheinlich.

Ebenso wird der Treppenflur (*T1* und *T2*) gewichtet. Ursächlich sind die hohen Wände, die sich aufgrund des Treppenlochs nur mit erhöhtem Aufwand streichen lassen. Die Gewichtung des Treppenflurs wird mit *+30 %* beaufschlagt. Diese Gewichtung reduziert die zuvor gewichteten Flure jedoch nicht.

Weiterhin erhalten die vier Arbeitsbereiche der kleinen Räume *R01*, *R14*, *R17* und *R32* eine Gewichtung wegen der ungünstigen Platz- und Lichtverhältnisse um *+25 %*. Diese Maßnahme trägt dazu bei, dass die Gewichtungen aller anderen Arbeitsbereiche (auch die zuvor gewichteten Flure und das Treppenhaus) verhältnismäßig zu ihrer lokalen Leistungsmenge reduziert werden (siehe *Pseudocode 5-1*).

Darüber hinaus werden alle Räume des Obergeschosses jeweils um die Gewichtung *+5 %* gegenüber den Räumen des Erdgeschosses erhöht. Von dieser Erhöhung sind die zuvor gewichteten kleinen Räume abermals betroffen. Um die Erhöhung auszugleichen, erfolgt eine

[1477] Eigene Darstellung.

automatische Reduzierung der Gewichtung der Räume im Erdgeschoss. Dieser Eingriff dient der Plausibilisierung. Es wird pauschal davon ausgegangen, dass die Räume im Obergeschoss eine verhältnismäßig längere Wegstrecke als die Räume des Erdgeschosses benötigen. Da die Mengenanteile der Nassräume verhältnismäßig gering sind, bleiben diese von der Gewichtung komplett ausgeschlossen. Zur besseren Übersicht lassen sich die Gewichtungen tabellarisch nachlesen.

Tabelle 7-2: Gewählte geometrische Gewichtungen[1478]

Schritt	Arbeitsbereiche	Faktor der geometrischen Gewichtung	Auswirkung(en)
1	Nassräume R08, R09, R26 und R27	-	werden bei den geometrischen Gewichtungen generell nicht einbezogen
2	Treppenhaus T1 und T2	+ 30 %	reduzierende Gewichtung auf alle anderen Räume außer Nassräume
3	Flure R06, R15, R16, R33 und R34	+ 15 %	reduzierende Gewichtung auf alle anderen Räume außer Nassräume, T1und T2
4	„kleine Räume“ R01, R14, R17 und R32	+ 25 %	reduzierende Gewichtung auf alle anderen Räume außer Nassräume
5	alle Räume des Obergeschosses	+ 5 %	reduzierende Gewichtung auf alle Räume des Erdgeschosses außer Nassräume

Da die Gewichtungen aufeinander aufbauen, können zuvor durchgeführte Gewichtungen wieder verändert (reduziert oder erhöht) werden. Dies lässt sich gem. *Kapitel 5.2.7* nur durch eine Sperrung verhindern. Entsprechend werden in *Schritt 1* alle Nassräume für die darauf folgenden Gewichtungen gesperrt. Demnach bleiben die oben erzwungenen Gewichtungen der Simulationsläufe nur teilweise erhalten.

In der *Abbildung 7-5* und der *Abbildung 7-6* sind die Ergebnisse des *Bauablaufmodells D* für *eine* Arbeitskraft zu sehen. Hier werden die erzielten Funktionsläufe der ursprünglichen Handrechnung gegenübergestellt. Die *simulierten Arbeitsstunden* weichen mit einer maximalen Zeit von *-3,7 h* gegenüber den *manuell errechneten Arbeitsstunden* sichtbar ab. Diese Abweichung tritt zum Fertigstellungszeitpunkt des Raums *R18* auf.

Insgesamt stellt der Teilvorgang „Wand- und Deckenflächen vorbereiten, grundieren“ einen relativ kleinen Zeitaufwandswert mit *0,033 h/m²* – also *1,98 Min./m²* – im Vergleich zu den anderen Teilvorgängen dar. Sollte bspw. der Anwender den anderen Teilvorgängen die identische Produktionsstätte (*LocalQuantity*) zuweisen, so wirkt sich die geometrische Gewichtung *ebenfalls* auf diese aus. In Abhängigkeit von dem dort gewählten Zeitaufwandswert ist daher mit größeren Zeitabweichungen zu rechnen.

Gemäß *Kapitel 5.2.7* übt die Abweichung, die durch die geometrische Gewichtung zustande kommt, keinen Einfluss auf die *gesamten* simulierten Arbeitsstunden aus.

[1478] Eigene Darstellung. In welcher Höhe die Gewichtungen zu wählen sind, soll *nicht* beantwortet werden, da *keine* Vergleichsdaten vorliegen. Die oben gezeigten Gewichtungen sind „vorsichtig“ gewählt. Je nach Arbeitsaufgabe sind deutlich markantere Verteilungen nicht auszuschließen. In Gerichtsverfahren ließen sich diese durch Gegengutachten bewerten.

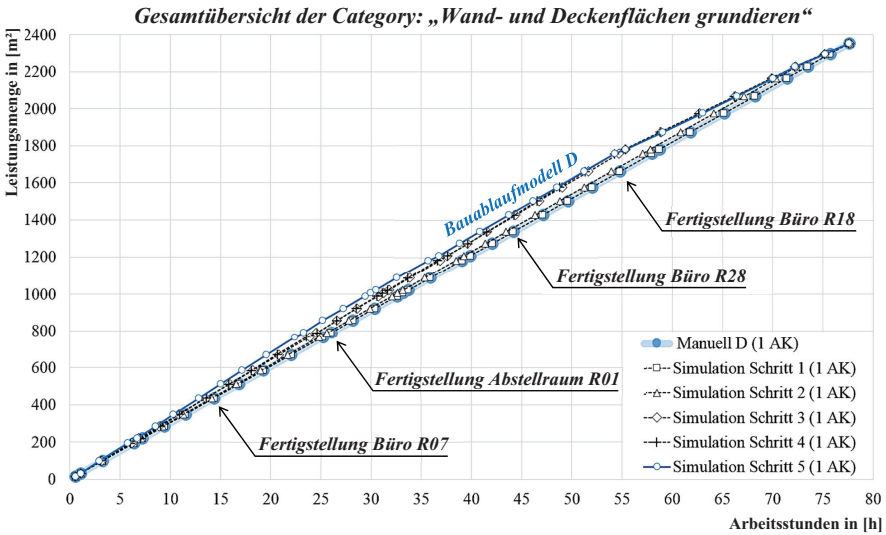


Abbildung 7-5: Übersicht der geometrischen Gewichtung am Bauablaufmodell D[1479]

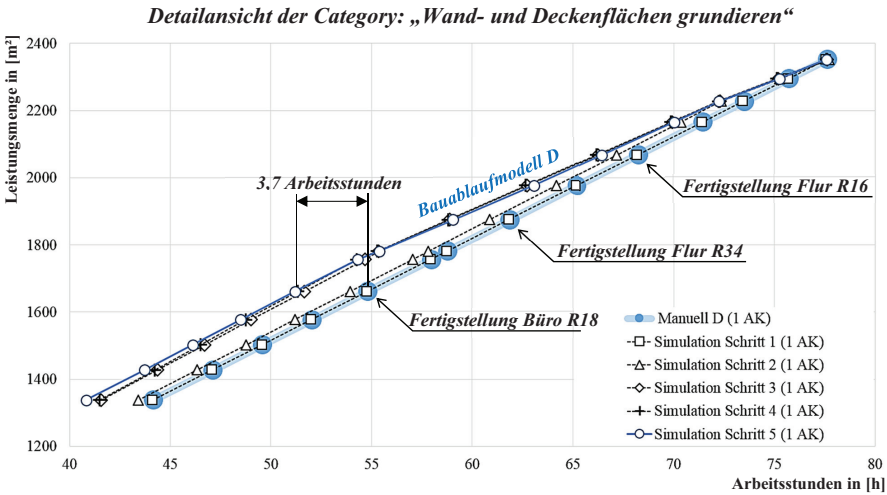


Abbildung 7-6: Detail der geometrischen Gewichtung am Bauablaufmodell D[1480]

Die Erhöhung des Gesamtmengenanteils vom Obergeschoss um *5 %* erzielt einen verhältnismäßig großen Umverteilungseffekt. Im Gegensatz dazu wirkt sich die Erhöhung der kleinen Räume um *25 %* kaum aus, da sie einen relativ kleinen Anteil der Gesamtleistungsmenge ausmachen. Grundsätzlich übt die Gewichtung eines Bauteilmodells

[1479] Eigene Darstellung.
[1480] Eigene Darstellung.

mehr Einfluss auf die anderen Bauteilmodelle aus, wenn deren Mengenanteile in der Summe geringer sind.

In *Abbildung 7-7* wird die zuvor getroffene geometrische Gewichtung der *Bauteilmodelle A-D* gezeigt. Zu den jeweiligen Steigungen verhalten sich die erzielten Abweichungen proportional zueinander.

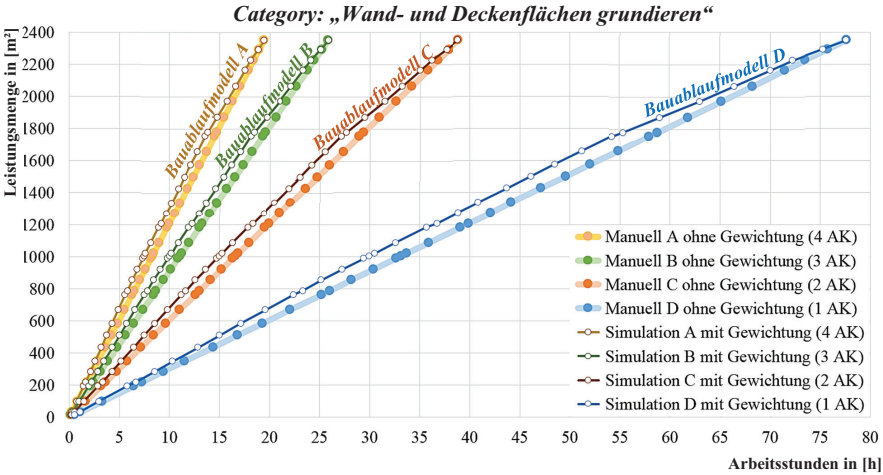


Abbildung 7-7: Geometrische Gewichtung an den Bauablaufmodellen A-D[1481]

Die dargestellten Modifizierungen am Simulationsmodell plausibilisieren das zeitlich verpreiste Leistungsversprechen des Auftragnehmers, da die ursprünglich geplante Gesamtbauzeit eingehalten wird. Vom Anfang bis zum gesamten Ausführungsende verzeichnet das simulierte *Bauablaufmodell B*, gegenüber der Handrechnung, die größte Abweichung aller Simulationsläufe von insgesamt *0,000053 h/m².* Das entspricht einer Abweichung von ca. *0,16 %* des ursprünglichen Zeitaufwandswerts von *0,033 h/m²* und ist damit außerordentlich klein. Die simulierte Fertigstellungsdauer beträgt insgesamt *38,78 h.*

7.1.4 Modellierung eines zusätzlichen Vorgangs

In Ergänzung zu den geometrischen Gewichtungen wird ein zusätzlicher Vorgang für das Aufbauen eines Gerüsts im Treppenhaus nachträglich eingearbeitet. Der Vorgang setzt das Fertigstellungsende des Raums *R06* voraus und ermöglicht erst nach Vorgangsende den Beginn der Grundierungsarbeiten im Treppenhaus *T1* und *T2*. Damit sich die zuvor getätigte Gewichtung nicht auf die Aufbauarbeiten des Gerüsts auswirken, muss eine eigene Produktionsstätte (*LocalQuantity*) im Arbeitsbereich (*WorkingField*) für das Treppenhaus neu definiert werden.

Der Gerüstaufbau benötigt ***vier Arbeitsstunden*** der Malerkolonne, die von ***mindestens einer Arbeitskraft oder maximal zwei Arbeitskräften*** auszuführen sind. Anhand des Diagramms

[1481] Eigene Darstellung.

der *Abbildung 7-8* ist ersichtlich, dass die Funktionen zum zeitlichen Ein- und Austritt des Vorgangs jeweils zwei ausgeprägte Funktionsknicke aufweisen.

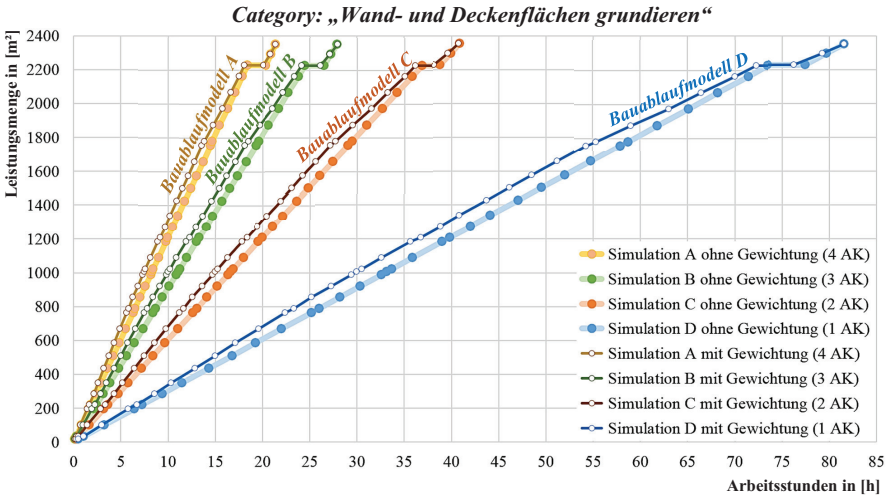


Abbildung 7-8: Nachträgliche Modellierung des Gerüstaufbaus in den Bauablaufmodellen A-D[1482]

Um die verpreiste Leistungszeit des modifizierten *Bauablaufmodells D* von insgesamt *77,63 h* doch noch einhalten zu können, ist es möglich, dass die infolge des Gerüstaufbaus eingebrachten Arbeitsstunden durch eine beschleunigte Kolonnenleistung aufgeholt werden. Diese Zielsetzung ließ sich laut *Kapitel 2.1.4* infolge eines Simulationsexperiments mit drei nacheinander durchprobierten Simulationsläufen erreichen. Für eine hinreichend genaue Ausführungsdauer von *77,60 h* waren ca. drei Minuten Untersuchungszeit notwendig.[1483] Zur Erreichung des Werts wurde die Arbeitsleistung der Malerkolonne gem. *Kapitel 5.2.6* auf den Faktor *0,951* gesetzt; dies entspricht einer Reduzierung von *-4,9 %*.

In *Abbildung 7-9* sind die Simulationsergebnisse mit den manuell berechneten Bauablaufmodellen zu sehen. Die zuvor simulierten Abweichungen, die durch den eingebrachten Vorgang zustande kamen, sind grau angedeutet.

[1482] Eigene Darstellung.
[1483] Aufgrund der prototypischen Entwicklung wurden die Eingriffe im Quellcode und in der *Access-Datenbank* vorgenommen.

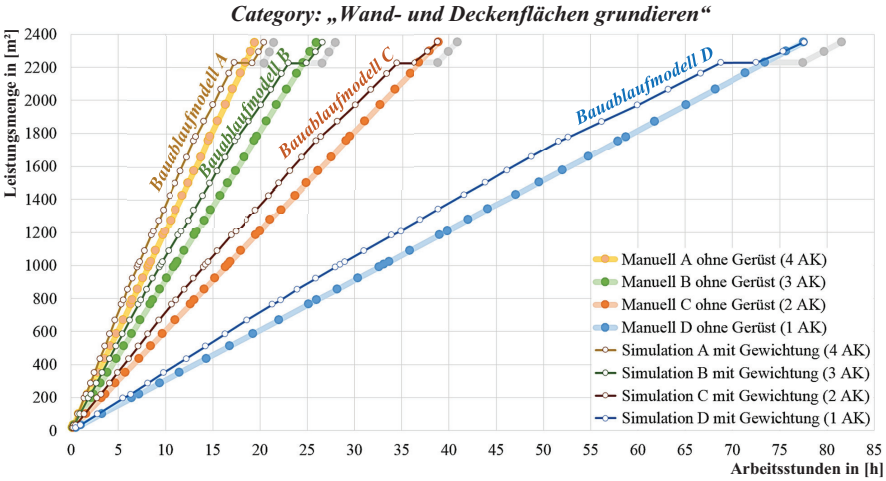


Abbildung 7-9: Beschleunigung wegen der nachträglichen Modellierung des Gerüstaufbaus[1484]

Die *Bauablaufmodelle C* und *D* stimmen mit den manuell berechneten *Fertigstellungszeitpunkten* annähernd deckungsgleich überein. Dies resultiert daraus, dass für den Gerüstaufbau *mindestens* eine Arbeitskraft oder *maximal* zwei Arbeitskräfte durch den Anwender zugelassen wurden. Somit bleibt in beiden Fällen keine Arbeitskraft unproduktiv. Bei den anderen beiden simulierten *Bauablaufmodellen A* und *B* stellen sich allerdings abweichende Ergebnisse gegenüber der Handrechnung ein, siehe folgendes Diagramm mit einer vergrößerten Darstellung des modifizierten *Bauablaufmodells A*.

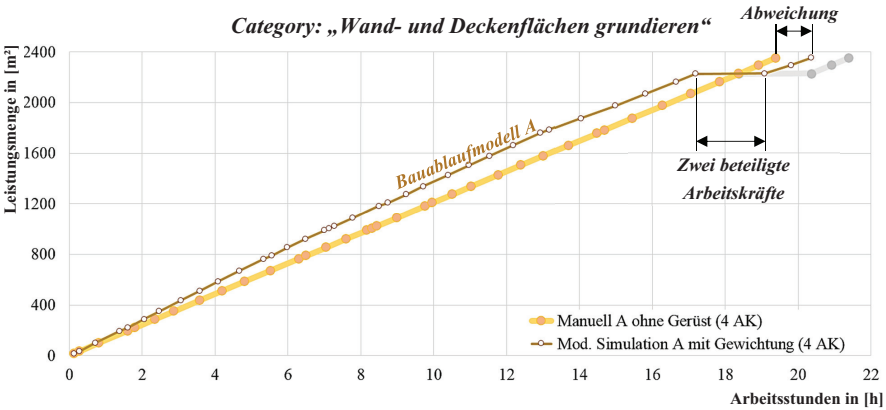


Abbildung 7-10: Zeitliche Abweichungen infolge des Gerüstaufbaus am Bauablaufmodell A[1485]

Die für den Gerüstaufbau zugelassene Anzahl der Arbeitskräfte ist ursächlich für die zeitliche Abweichung in *Abbildung 7-10*. Der *Gerüstaufbau* des modifizierten *Bauablaufmodells A*

[1484] Eigene Darstellung.
[1485] Eigene Darstellung.

schreitet mit einer *halben Arbeitsgeschwindigkeit* gegenüber den *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* voran, da dort nur zwei *anstatt* vier Arbeitskräfte für die zwei Arbeitsstunden berücksichtigt werden. Das heißt, bei *allen anderen Arbeitsaufgaben* werden vier Arbeitskräfte eingesetzt, die zeitlich schneller voranschreiten.

Beim Simulationsexperiment des modifizierten *Bauablaufmodells B* mit drei Arbeitskräften trifft dies ebenso zu. Entsprechend liegt hier während des Gerüstaufbaus ein Produktivitätsverlust von insgesamt *2/3 h* Arbeitsstunden vor. Über diesen Zeitraum können die zwei Arbeitskräfte *nicht* zeitparallel für andere Tätigkeiten eingesetzt werden. Darum ist im Hinblick auf die Zusammenstellung der Kolonne und der simulierten Ausführungsdauer ein Zeitverlust von insgesamt zwei Arbeitsstunden der drei Arbeitskräfte zu verzeichnen. Der Zeitverlust des modifizierten *Bauablaufmodells B* ließe sich egalisieren, wenn drei Arbeitskräfte für den Gerüstaufbau zugelassen werden.

Insgesamt wurden folgende Abweichungen gegenüber der manuellen Berechnung erzielt:

Tabelle 7-3: Zeitliche Abweichungen infolge des zusätzlichen Vorgangs[1486]

Bauablaufmodell	Berechnete Gesamtarbeitsstunden in [h]			Simulierte Dauer in [h]	Eingesetzte Kapazitäten für den Gerüstaufbau
	Handrechnung (manuell)	Simulation	Betrag der Abweichung		
A	19,41	20,35	0,94 ≈ 1,00	2	2 [AK] *verbleiben 2 [AK]*
B	25,88	26,51	0,63 ≈ 2/3	2	2 [AK] *verbleibt 1 [AK]*
C	38,81	38,82	0,01 ≈ 0,00	2	2 [AK] *verbleibt 0 [AK]*
D	77,63	77,60	0,03 ≈ 0,00	4	1 [AK] *verbleibt 0 [AK]*

7.1.5 Simulation nebenläufiger Produktionsabläufe zur Plausibilisierung

Die in *Kapitel 2.1.7* und *Kapitel 3.4.2* vorgestellten Produktivitätsverluste lassen sich vermeiden, wenn parallele Arbeiten während der Bauzeit stattfinden. So kann beim modifizierten *Bauablaufmodell A* der Gerüstaufbau vorgezogen werden. Dazu müssen die in den Arbeitsbereichen hinterlegten Produktionsstätten je maximal zwei der vier Arbeitskräfte zulassen. Die zwei übrig gebliebenen Arbeitskräfte können dann während des Gerüstaufbaus in anderen Arbeitsbereichen nebenläufig tätig sein.

Somit nähern sich die raumweisen Arbeitsstunden des *Bauablaufmodells A* dem des *Bauablaufmodells C* mit seinen zwei Arbeitskräften an. Die gesamte Fertigstellungsdauer weicht um *0,0040 h* Arbeitsstunden zwischen dem modifizierten *Bauablaufmodell A*, mit parallelen Arbeiten, vom manuell berechneten *Bauablaufmodell C* ab (siehe *Abbildung 7-11*). Insgesamt besteht der Vorteil des simulierten *Bauablaufmodells A* darin, dass die anderen zwei Arbeitskräfte in einer eigenen Arbeitsgruppe zeitparallele Arbeitsaufgaben erledigen können und die gesamte Ausführungszeit schneller voranschreitet.

[1486] Eigene Darstellung.

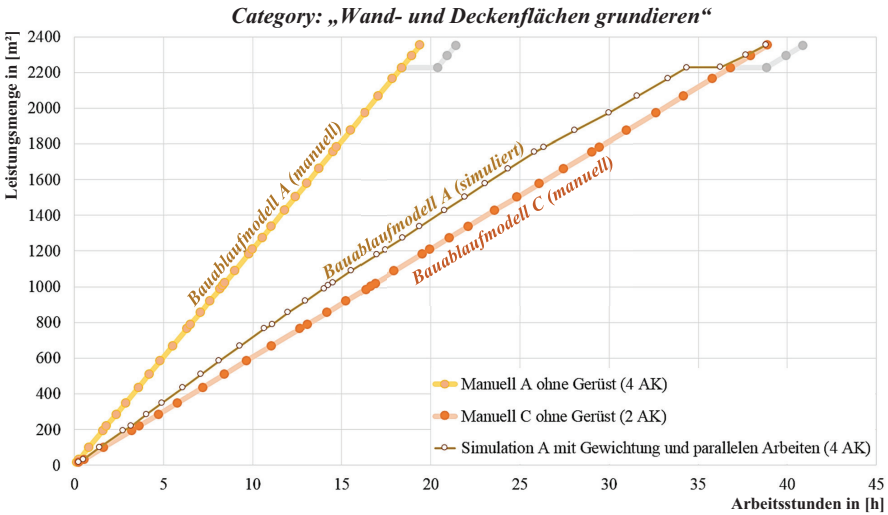


Abbildung 7-11: Berücksichtigung paralleler Ausführungen beim Bauablaufmodell A[1487]

In den bisherigen Darstellungen der Simulationsergebnisse wurde die Bauzeit in *Arbeitsstunden* angegeben. Im folgenden Diagramm der *Abbildung 7-12* wird der Leistungsfortschritt unter den zuvor getroffenen Annahmen in ***Zeitstunden*** wiedergegeben. Jede Zeitstunde entspricht einer terminabhängigen Uhrzeit. Alle weiteren Simulationsexperimente basieren auf dem simulierten *Bauablaufmodell A*.

[1487] Eigene Darstellung.

Fortan wird beim *Bauablaufmodell A* mit der Kolonne von *vier* Arbeitskräften zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- ***serielle Ausführungen*** einer Arbeitsgruppe, bestehend aus vier Arbeitskräften, und
- ***parallele Ausführungen*** mit zwei Arbeitsgruppen, bestehend aus jeweils zwei Arbeitskräften.

Der *Abbildung 7-12* ist zu entnehmen, dass für die seriellen und parallelen Ausführungen jeweils zwei Arbeitstage (*Tagesleistung A* und *Tagesleistung B*) erforderlich sind.

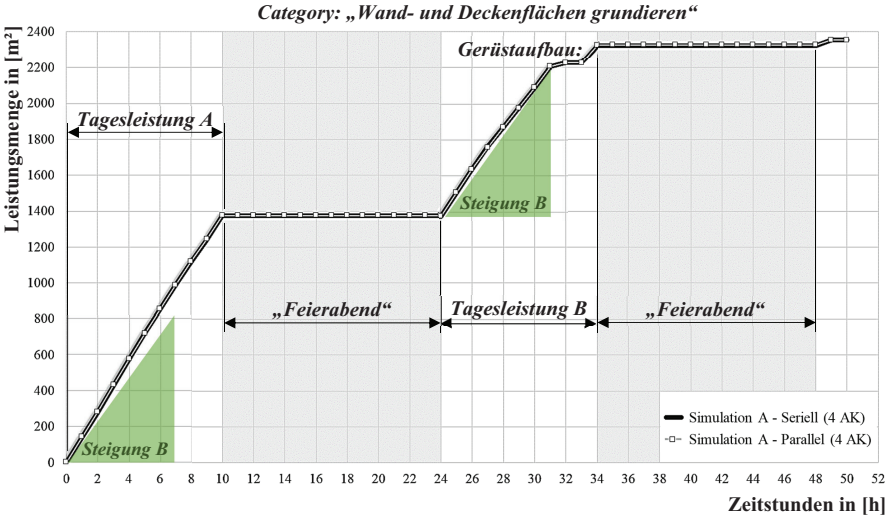


Abbildung 7-12: Serielle und parallele Ausführungen des Bauablaufmodells A[1488]

Der Versuchsaufbau lässt zwar erwarten, dass der Gerüstaufbau bei parallelen Ausführungen hätte vorgezogen werden können. Doch die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass zwei Arbeitskräfte pro Arbeitsgruppe nicht ausreichen, um den gewünschten Effekt mit den getroffenen Annahmen zu erzielen. Die Tagesleistungen der parallelen und seriellen Ausführungen weichen kaum voneinander ab. Beide Funktionsverläufe liegen nahezu aufeinander.

Die größte Differenz des Leistungsfortschritts zwischen beiden Ausführungsvarianten beträgt innerhalb einer Arbeitsstunde *6,973 m²* zur Zeitstunde *27 h*; sie ist in der *Abbildung 7-12* kaum sichtbar. Im Verhältnis zur Gesamtleistung kann der Umfang dieser Abweichung vernachlässigt werden. Demnach ist das parallele Arbeiten nicht ausschlaggebend genug, um die verzögerte Arbeitszeit des Gerüstaufbaus aufzufangen.

Der simulierte Leistungsfortschritt unterscheidet sich an beiden Arbeitstagen. Dies ist erkennbar an den jeweiligen Funktionssteigungen. Zur Nachvollziehbarkeit der simulierten

[1488] Eigene Darstellung. Bei der Darstellung des Liniendiagramms ist die Kennzeichnung der parallel simulierten Arbeitsbereiche nicht mehr möglich. Daher wird die *stündlich* erreichte Leistungsmenge durch eine Linie *ohne Knotenpunkte* dargestellt.

Tagesleistungen dient *ein Dreieck* mit der Bezeichnung „Steigung B“, das einen frei gewählten Steigungswinkel der *Tagesleistung B* als Vergleichsgröße herausgreift. Das Dreieck zeigt, dass die *Tagesleistung A* produktiver ist. Die Unterschiede sind auf die geometrische Gewichtung zurückzuführen. Weiterhin zeichnen die parallelen und seriellen Ausführungen den Gerüstaufbau durch eine einheitliche Produktivitätsabweichung ab.

Laut Simulationsergebnis ist ein kurzzeitiges Vorziehen von acht Minuten der parallel arbeitenden Arbeitskräfte während des Gerüstaufbaus möglich. Die Zusammenhänge werden durch das entwickelte Darstellungskonzept gem. *Kapitel 5.1.3* deutlich. Demnach kann der Gerüstaufbau erst nach den *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* in den beiden Räumen des Treppenhauses beginnen. In *Abbildung 7-9* werden die simulierten Bauablaufmodelle der seriellen Ausführungen (oberhalb) und der parallelen Ausführungen (unterhalb) gezeigt.

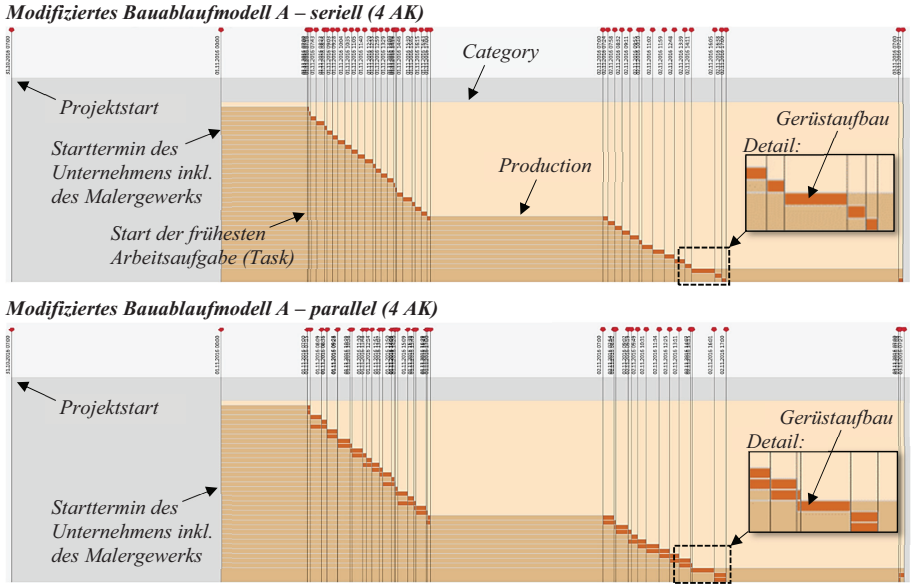


Abbildung 7-13: Gegenüberstellung serieller und paralleler Ausführungen im Darstellungskonzept[1489]

In *Abbildung 7-13* lässt sich das angestrebte Verhalten der Agenten unter den projektbezogenen Startbedingungen erkennen.

Der Beginn des Projektstarts erfolgt gemäß der Prozessmodellierung am 31.10.2016 (Simulationszeit). Die *Category* „Wand- und Deckenflächen grundieren“ richtet sich nach dem Starttermin des modellierten Unternehmens, das erst am 01.11.2016, zeitversetzt zum

[1489] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot). Leicht abweichend von dem Darstellungskonzept nach *Kapitel 5.1.3* werden *Anhaltspunkte* nicht als Dreiecke dargestellt. Ihre Funktionsweise entspricht dennoch den Anforderungen.

Termin des Projektstarts, beginnt. In dieser Bauzeitanalyse wurden virtuelle Arbeitszeiten für die Agenten pro Werktag von 07:00 bis 17:00 Uhr gem. *Kapitel 6.3.5* festgelegt.

Nach *Kapitel 7.1.1* orientieren sich alle *Production* „Raumweise Arbeitsbereiche“ gem. *Kapitel 6.2.5* am Starttermin der übergeordneten *Category* – also am 01.11.2016. Darin enthalten sind die lokalen Arbeitsaufgaben (*Task*) – dargestellt als elementare bzw. kleinste Vorgangsintervalle. Anhand der *Production* ist erkennbar, dass die Arbeitsaufgaben bereits am 01.11.2016 um 00:00 Uhr den Agenten vom Simulator im Sinne des *Kapitels 6.3.2* „angeboten“ wurden. Der früheste Start einer Aufgabe erfolgt jedoch gemäß den definierten Arbeitszeiten um 07:00 Uhr.

7.1.6 Modellierung zulässiger Arbeitskräfte in den Produktionsstätten

Nachdem auf die Genauigkeit, der Darstellungsmöglichkeiten und Prinzipien der entwickelten Simulationsanwendung eingegangen wurde, folgen weitere Plausibilisierungsschritte. Es wird angenommen, dass in den vier kleinen Räumen *R01*, *R14*, *R17* und *R32* jeweils nur *eine* Arbeitskraft tätig sein kann. Wenn unter diesen Voraussetzungen zu einem momentanen Zeitpunkt

- *zwei* Arbeitskräfte in einem Raum tätig sind und
- in einem darauf folgenden kleinen Raum nur eine Arbeitskraft arbeitet,

bleibt von den vier Arbeitskräften der Kolonne *eine* Arbeitskraft übrig, die auf einen anderen Arbeitsbereich ausweichen muss. Erwartungsgemäß wird sie entlang der Fertigungsrichtung eine freie Produktionsstätte suchen – also den nächsten kleinen freien Raum je Etage. Der simulierte Arbeitsablauf lässt sich mit dem entwickelten Prototyp durch eine 4D-Visualisierung konkretisieren (siehe *Abbildung 7-14*).

Um den errechneten Leistungsfortschritt aufzuzeigen, sind die Bearbeitungsflächen durch ein Farbschema gekennzeichnet (von *violett = 0 %* bis *grün = 100 %*; eine belegte Standfläche wird *orangefarbig* dargestellt). Der 4D-Visualisierung ist zu entnehmen, dass der kleine Raum *R01*, entgegen der in *Abbildung 7-14* vorgegebenen Fertigungsrichtung, den sechs Räumen *R12*, *R10*, *R07*, *R04b*, *R04a*, *R02* und *R03* vorgezogen wird, wenn die Grundierungsarbeiten im Raum *R14* stattfinden. Demnach befinden sich zum dargestellten Zeitpunkt zwei Arbeitskräfte im Raum *R13* und jeweils eine Arbeitskraft in den Räumen *R14* und *R01*.

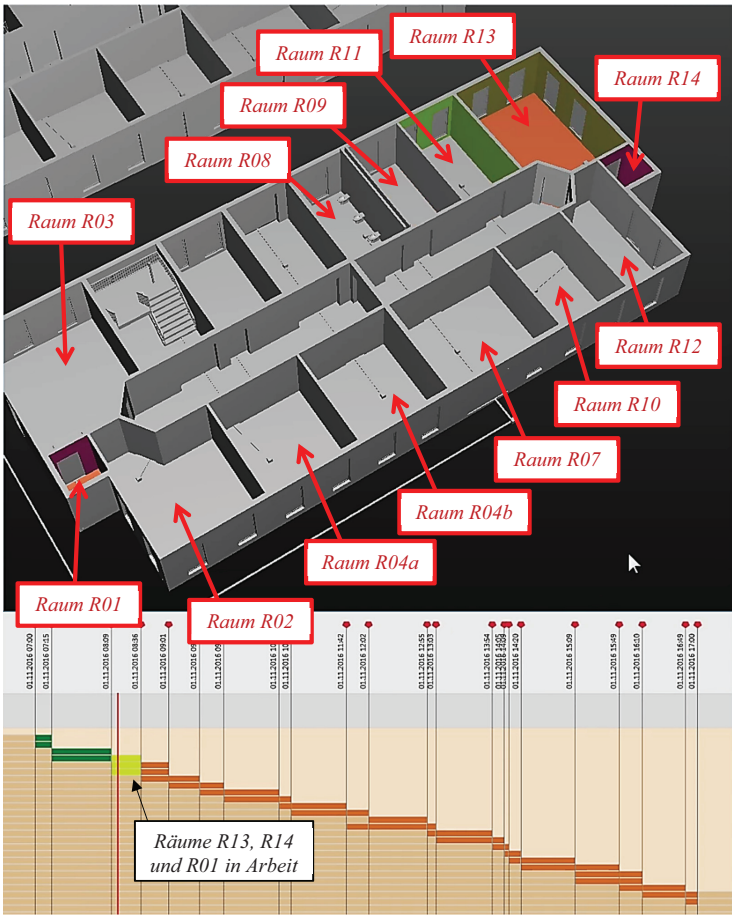


Abbildung 7-14: 4D-Visualisierung während der Arbeiten in den kleinen Räumen[1490]

Nachdem diese Arbeiten abgeschlossen sind, verfolgen die Arbeitskräfte die vorgegebene Fertigungsrichtung (siehe *Abbildung 7-15*). Zeitgleich arbeiten jeweils *zwei* Arbeitskräfte in den Räumen *R12* und *R10*. Das Ausweichen erfolgt automatisch. Entsprechend stellt sich das Verhalten der Ausbauarbeiten etwas komplexer dar als zuvor. Abgesehen von den gerundeten Vorgangsdauern bleibt diese Darstellung streng deterministisch und lässt sich daher vom Beobachter schrittweise nachvollziehen.

[1490] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

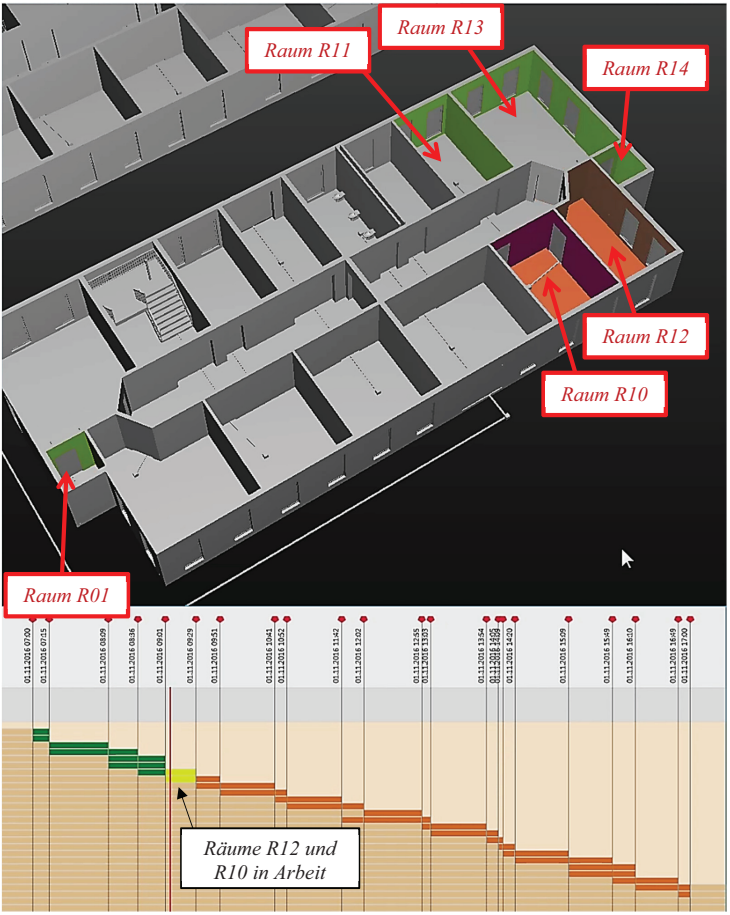


Abbildung 7-15: 4D-Visualisierung nach Fertigstellung der Arbeiten in den kleinen Räumen[1491]

Die in der 4D-Visualisierung dargestellten Simulationsergebnisse lassen im entwickelten Darstellungskonzept *drei Vorgangsintervalle* erkennen, die zeitparallel zueinander sind. In *Abbildung 7-16* sind die möglichen Kombinationen, die sich durch die gegebene Fertigungsrichtung einstellten, im *Detail A* und *Detail B* hervorgehoben. Hieraus folgt, dass die Ausführungsarbeiten bereits am ersten Arbeitstag *im Obergeschoss* stattfinden. Laut Simulation schreiten sie bis zum Raum *R25* voran und können am zweiten Arbeitstag fortgeführt werden.

Daneben sind, mit Ausnahme des Gerüstaufbaus, maximal zwei nebenläufige Vorgänge möglich, da erwartungsgemäß zwei der vier Arbeitskräfte arbeiten können. Dadurch verschieben sich die Arbeitsvorgänge ineinander, wodurch ein „kompakteres Arbeiten“

[1491] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

möglich ist. Der Zeitvorsprung des Gerüstaufbaus erreicht nun *27 Min.*, siehe *Detail C* in *Abbildung 7-16*.

Modifiziertes Bauablaufmodell A – parallel (4 AK)

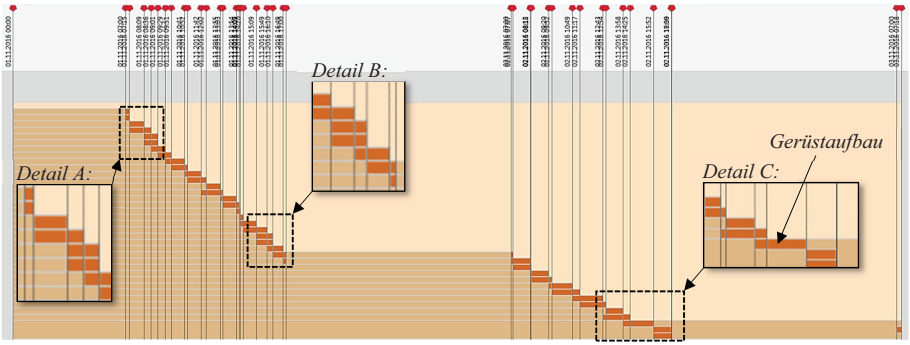


Abbildung 7-16: Simulationslauf mit maximal einer Arbeitskraft in den kleinen Räumen[1492]

Als letzte Plausibilisierungsmaßnahme wird vorgegeben, dass in *allen* benachbarten Räumen *mindestens* eine oder *maximal* zwei Arbeitskräfte arbeiten. Dadurch kann das zuvor erreichte Überspringen mehrerer Arbeitsbereiche verhindert werden. Folglich wird die vorgegebene Fertigungsrichtung weitestgehend durch die Agenten eingehalten. In *Abbildung 7-17* sind die durchgeführten Modifizierungen des *Bauablaufmodells A* dargestellt. Die Eingriffe tragen dazu bei, dass zeitgleiche Ausführungsprozesse häufiger stattfinden und die vorgegebene Fertigungsrichtung tendenziell eingehalten wird. Zudem reduziert sich die Zeit, die für das Vorziehen des Gerüstaufbaus möglich ist, auf *13 Min*.

Abbildung 7-17 gibt hierzu einen simulierten Zeitpunkt vom *Bauablaufmodell A* wieder, bei dem der Arbeitsplatzwechsel zeitparallel über die Räume *R19*, *R17* und *R34* erfolgt. Die Abfrage kann durch den Anwender interaktiv erfolgen. Dazu müssen die grün markierten Segmente der jeweiligen Vorgangsintervalle angeklickt werden. Der Simulator teilt die Arbeitskräfte den Arbeitsbereichen eigenständig zu, solange sie

- nicht priorisiert,
- in eigenen *WorkerType*-Gruppen oder
- in unterschiedlichen Kolonnen voneinander getrennt sind.

Grundsätzlich werden zuerst die bereits begonnenen Arbeitsaufgaben bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der maßgeblichen Fertigungsrichtung vorgezogen. Entsprechend sind die Kapazitäten über alle Räume verteilt. Sie lassen sich bei Bedarf durch die Segmente aus dem Darstellungskonzept aufrufen. Zum Beispiel zeigt *Abbildung 7-17* eine benutzergesteuerte Situation. Nach der Markierung von drei Segmenten erscheint jeweils eine Parameterliste mit allen vorgangsbezogenen Daten aus der Simulation. Gleichzeitig heben sich die betroffenen Produktionsstätten farbig von den restlichen Bauteilmodellen ab.

[1492] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

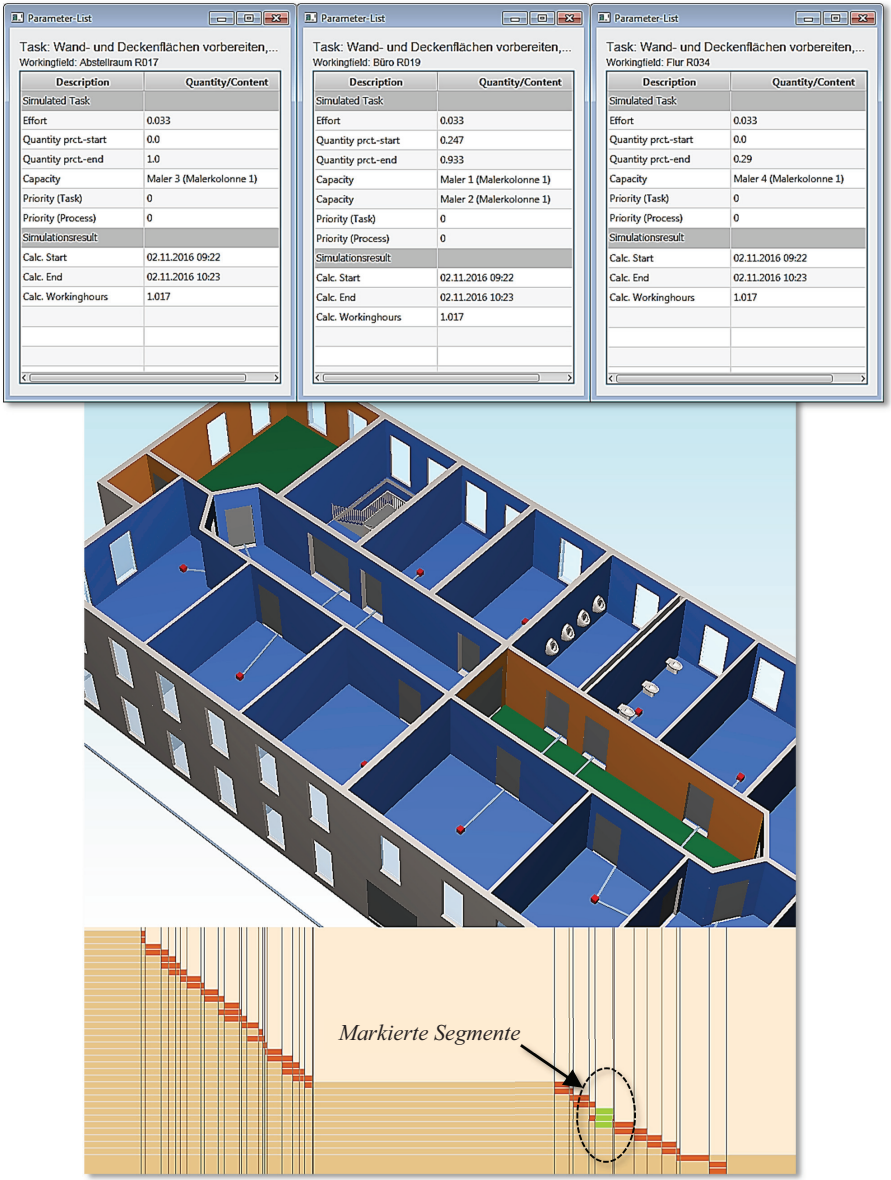


Abbildung 7-17: Zugriff über das Darstellungskonzept auf die Simulationsergebnisdaten[1493]

Die simulierten Arbeitsintensitäten können im Diagramm der *Abbildung 7-18* überblickt werden. Demzufolge lässt sich die ermittelte Arbeitsleistung des simulierten *Bauablaufmodells A*, infolge der vorausgegangenen Modellierungen, in weiten Teilen dem

[1493] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

manuell berechneten *Bauablaufmodell C* gegenüberstellen. Ursächlich für die Annäherung der beiden Bauablaufmodelle ist die maximale Arbeitskraftanzahl von zwei Arbeitskräften, die in den meisten Produktionsstätten durch die Agenten zustande kommt. Gut erkennbar sind die hervorgehobenen „Funktionssprünge“ in den kleinen Räumen. Sie ergeben sich dadurch, dass dort jeweils nur maximal eine Arbeitskraft vorhanden sein darf und ein erhöhter Aufwand infolge der geometrischen Gewichtung vorliegt.

Sobald die einzelnen Segmente der Arbeitsaufgaben (*Task*) durch die situativ ermittelte Anzahl von Arbeitskräften dividiert werden, lassen sich *als Kontrolle* die kapazitiven Arbeitsintensitäten ableiten. Die daraus folgende Funktion nähert sich in den hier durchgeführten Bauzeitanalysen dem manuell berechneten *Bauablaufmodell D* an, dem eine Arbeitskraft zugrunde liegt. Theoretisch muss diese eine Arbeitskraft alle erforderlichen sowie verpreisten Arbeitsstunden der Bauleistung ausführen. Die *Steigung* des *Bauablaufmodells D* ist daher ein *Indikator für bauzeitliche Störungen* und liefert wesentliche Informationen zu *machbaren Produktivitäten*. Hingegen weisen die anderen Bauablaufmodelle immer Unschärfen aufgrund zeitparalleler Arbeiten auf, da z. B. eine Arbeitskraft evtl. etwas schneller und die anderen zeitgleich langsamer arbeiten. Somit spiegelt *die Steigung der Funktion* des *Bauablaufmodells D* einen „bereinigten“ Leistungswert wider. Sollten am Simulationsmodell Gewichtungen vorgenommen werden, gibt die Inverse der Funktion für den dargestellten Fall den *gesamtgewichteten Zeitaufwandswert* Aw_{mod} wieder (siehe *Kapitel 5.2.6*). In *Abbildung 7-18* wird die Handrechnung dem simulierten Aufwand gegenübergestellt.

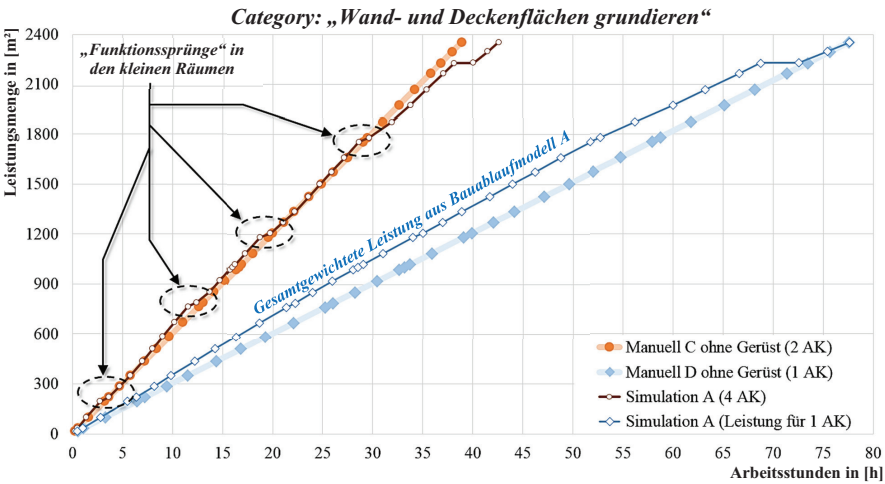


Abbildung 7-18: Plausibilisiertes Bauablaufmodell A mit Leistungsfunktion[1494]

Trotz Modifizierungen stimmen die *simulierten Stunden der Gesamtfertigstellung* des *Bauablaufmodells A* mit der Handrechnung des *Bauablaufmodells D* nahezu überein. Hieraus lässt sich ableiten, dass das zeitlich verpreiste Leistungsversprechen *eingehalten* wurde. Über

[1494] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

die Ausführungsintensitäten wird in der vorliegenden Arbeit keine wertende Aussage getroffen.

Die zuvor durchgeführten Simulationsexperimente zeigen, dass zwar die erforderliche arbeitskraftbezogene Arbeitsleistung eingehalten wird, der reine Zeitverbrauch nach den Plausibilisierungsmaßnahmen aber höher ausfällt. Folglich bietet das Bauablaufmodell nach der Plausibilisierung mehr „Angriffsfläche" für mögliche Behinderungen. Besonders deutlich lässt sich dieser Umstand aus der Gegenüberstellung der seriellen und parallelen Arbeiten anhand der *Abbildung 7-13* entnehmen. Generell sind weiterhin Ausweichmöglichkeiten durch das Vorziehen anderer Arbeitsbereiche möglich. Ebenso lassen sich andere Teilvorgänge der Malerarbeiten vorziehen. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

7.1.7 Modellierung mehrerer Teilvorgänge und gesteuerte Arbeitsgruppen

Die nächste Untersuchung unterliegt der theoretischen Annahme, dass alle Teilvorgänge der Malerarbeiten zeitgleich beginnen. Die Agenten beachten unter dieser Annahme die technologischen Abhängigkeiten, definiert durch die vorgegebenen Prozessreihenfolgen gem. *Kapitel 6.2.5*. Von einer Kolonne mit vier Arbeitskräften werden pro Arbeitsbereich

- zuerst die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten*,
- dann die *1. Anstricharbeiten* mit Dispersionsfarbe und
- abschließend die *2. Anstricharbeiten* mit Dispersionsfarbe

ausgeführt.

Alle Dispersionsanstriche erfolgen in einzelnen Arbeitsaufgaben (*Task*) je Wand- und Deckenfläche pro Raum. Damit sind die beiden zusätzlich betrachteten Anstricharbeiten viel detaillierter modelliert als die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten*. Die zur Vorgangsberechnung verwendeten Zeitaufwandswerte liegen in *Kapitel 7.1.1* vor. Bei allen Anstricharbeiten wurde eine geometrische Aufwandsverteilung vorgenommen, die analog mit den *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* übereinstimmt.

Neben den Abhängigkeiten der Prozesse besteht innerhalb jedes Arbeitsbereichs eine weitere Abhängigkeit der einzelnen *Production*[1495]. Dadurch lassen sich die Startvoraussetzungen aller raumweisen Arbeitsschritte durch das umschließende Vorgangsintervall ermitteln. Außerdem wird gewährleistet, dass keine Situation eintritt, bei der z. B. die *1. Anstricharbeiten* an einer Wand zeitparallel mit den *2. Anstricharbeiten* an einer anderen Wand innerhalb eines Raums stattfinden. Vom genannten Detaillierungsgrad bleiben die kleinen Räume, die Flure sowie das Treppenhaus unberücksichtigt – also: *R01*, *R14*, *R15*, *R16*, *R17*, *R32*, *R33*, *R34*, *T1* und *T2*. Die Anstricharbeiten werden dort, wie bei den *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten*, für alle Wand- und Deckenflächen gleichzeitig betrachtet. Zur Vereinfachung bleibt der *Abbau des Gerüsts unbeachtet*. Die gesamten Malerarbeiten umfassen daraufhin *306 Arbeitsaufgaben* (*Task*), die zu Beginn der Simulation für die Agenten als *TaskTransition* bereitstehen.

Unter diesen Umständen erzielt die Simulation die in der *Abbildung 7-19* dargestellten Leistungskurven je Teilvorgang. Graue Bereiche im Diagramm geben Zeiträume wieder, in

[1495] Beim Modellentwurf grenzt eine *Production* alle Teilvorgänge in einem eigenständigen Vorgangsintervall innerhalb eines Raums bzw. Arbeitsbereichs voneinander ab (siehe *Kapitel 6.2.5*).

denen nicht gearbeitet wird. Dies kann entweder der tägliche Feierabend oder das Wochenende sein. Weiße Bereiche markieren Ausführungszeiten der erzielten Tagesleistung – erkennbar am dargestellten Leistungsfortschritt der Funktionsverläufe. Laut den Simulationsergebnissen benötigen die gesamten Ausführungsarbeiten *388 h* Zeitstunden. Dies entspricht einer Gesamtausführungszeit von ca. zwei Wochen.

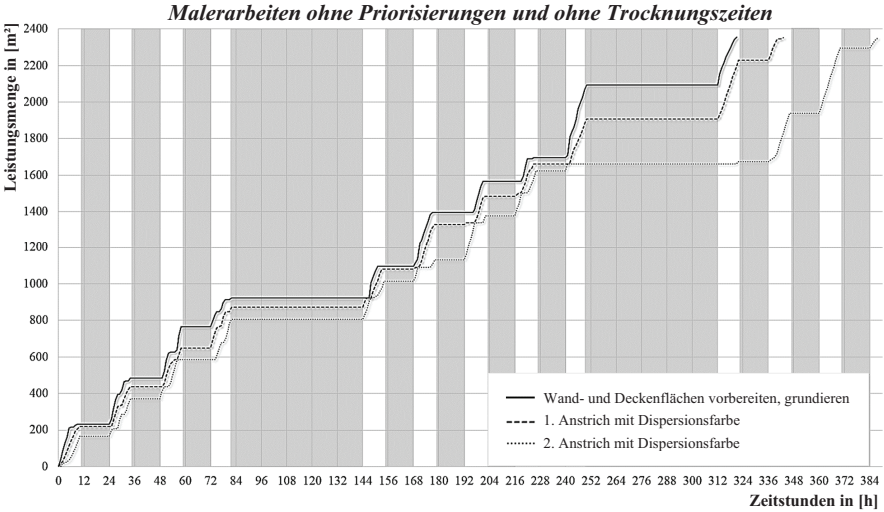


Abbildung 7-19: Simulierte Malerarbeiten ohne priorisierte Prozessabfolgen[1496]

Der Simulationslauf erforderte *11.908 Token*[1497] und allein für die Malerarbeiten *847 TaskTransitionen* in insgesamt *9,47 Sekunden*[1498] Berechnungszeit. Die Erhöhung der *TaskTransitionen* umfasst damit das *2,77-fache* gegenüber der Ausgangssituation. Sie ist auf das situative Schneiden durch den Simulator zurückzuführen.

Die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* erfordern nun aufgrund der zusätzlichen Anstricharbeiten *zehn* anstatt *zwei* Arbeitstage. Alle Teilvorgänge liegen u. a. zeitlich sehr nah zusammen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Arbeitskräfte zuerst alle Teilvorgänge *vor* einem Arbeitsplatzwechsel abarbeiten. Sie streben grundsätzlich danach, die Fertigungsrichtung einzuhalten und die angefangenen Arbeitsaufgaben *je Arbeitsbereich* zu beenden. Die Agenten priorisieren tendenziell die gleichen Arbeitsaufgaben. Das führt zu einer maximal möglichen Anzahl von Arbeitskräften in den Produktionsstätten. Bei einer derartigen Fertigung können sich viele Wartezeiten während der Ausführung eines bestimmten Teilvorgangs einstellen, da die anderen Teilvorgänge vor einem Arbeitsplatzwechsel ausgeführt werden müssen. Entlang der Fertigungsrichtung schreiten daher die

[1496] Eigene Darstellung.

[1497] Die Anzahl der Token ist weitaus höher als die der berechneten Tasks. Ursächlich dafür ist, dass das prototypische Simulationsmodell über *780 Tasks* von sieben verschiedenen Gewerken umfasst, die im Zuge der Entwicklung getestet wurden. Für die Präsentation der Simulationsergebnisse wurden die nicht relevanten Tasks *ausgeschaltet*. Trotz der Ausschaltung werden in den Simulationsläufen für die ausgeschalteten Tasks sowie für die strukturierenden Transitionen weiterhin eigene Token erzeugt. Sie üben keinen Einfluss auf die in den Experimenten vorgestellten Simulationsergebnisse aus.

[1498] „Handelsüblicher Computer im Normalbetrieb“.

Arbeitskräfte augenscheinlich „holprig“ voran (siehe *Abbildung 7-19*). Strukturiertere Simulationsergebnisse sind möglich, wenn für die Arbeitskräfte eine Priorisierung der Prozesse vorgenommen wird.

Im folgenden Simulationsexperiment werden daher die Prozesse je Arbeitskraft priorisiert. Darüber hinaus findet zwischen den Agenten eine Arbeitskraft-Priorisierung statt, bei der etwa der *Maler 4* zuerst und der *Maler 1* zuletzt berücksichtigt wird.

Tabelle 7-4: Vorgenommene Priorisierung der Arbeitskräfte und die dazugehörigen Prozesse[1499]

Arbeitskraft	Prozess	Priorisierungswert
Maler 1 *Priorität = 1*	Wand- und Deckenflächen vorbereiten und grundieren	2
	Gerüstaufbau	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	4
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	4
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	4
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	3
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	3
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	3
Maler 2 *Priorität = 2*	Wand- und Deckenflächen vorbereiten und grundieren	2
	Gerüstaufbau	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	4
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	4
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	4
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	3
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	3
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	3
Maler 3 *Priorität = 3*	Wand- und Deckenflächen vorbereiten und grundieren	4
	Gerüstaufbau	3
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	1
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	2
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	2
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	2
Maler 4 *Priorität = 4*	Wand- und Deckenflächen vorbereiten und grundieren	4
	Gerüstaufbau	3
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	1
	1. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	1
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wand- und Deckenseiten	2
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Deckenseiten	2
	2. Anstrich mit Dispersionsfarbe für Wandseiten	2

Die gewonnenen und in *Abbildung 7-20* als Leistungskurven dargestellten Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* durch die Priorisierungen „am Stück“ ausgeführt werden. Während des Simulationslaufs helfen sich die Agenten bei situativen Gelegenheiten untereinander aus und gehen dem nächstpriorisierten

[1499] Eigene Darstellung.

Teilvorgang nach. Folglich beginnen die Arbeitskräfte der dargestellten Grafik – vorwiegend sind dies *Maler 3* und *Maler 4* – mit den *2. Anstricharbeiten*, nachdem die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* abgeschlossen sind (siehe Ende des *4. Arbeitstags* bzw. zur Zeitstunde *81 h*). Ein deutlicher Anstieg der *2. Anstricharbeiten* ist ab Zeitstunde *312 h* erkennbar; also nach dem Ende der *1. Anstricharbeiten*. Hier ergänzen die Arbeitskräfte *Maler 1* und *Maler 2* die Ausführungsarbeiten.

Die Gesamtausführungszeit dauert laut Simulation nun *387 h* Zeitstunden und weicht damit von dem zuvor gezeigten Simulationsergebnis unwesentlich ab. Allerdings hat sich die Anzahl der erforderlichen Token gegenüber dem zuvor durchgeführten Simulationsexperiment mit *29.127 Token* mehr als verdoppelt. Zudem sind für die Malerarbeiten in der Summe *864 TaskTransitionen* abgearbeitet worden. Gegenüber der Ausgangssituation entspricht dies dem *2,82-fachen*.

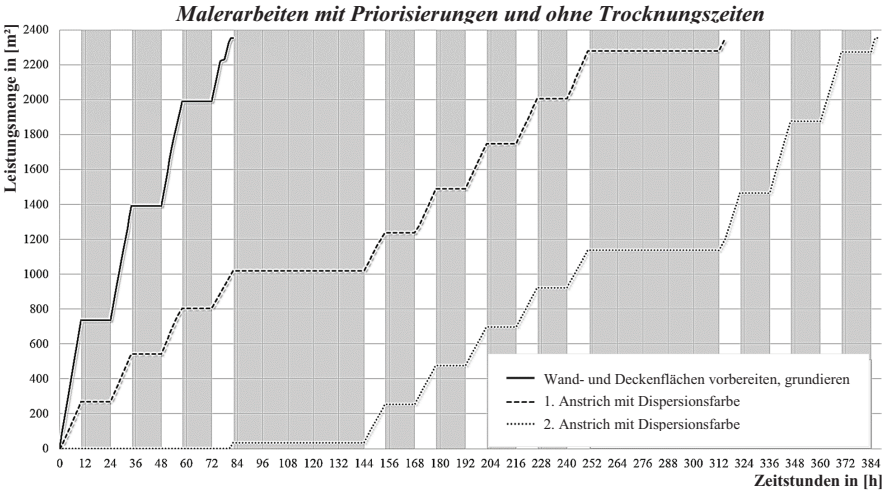


Abbildung 7-20: Simulierte Malerarbeiten mit priorisierten Prozessabfolgen[1500]

Eine Unterscheidung hätte vorgenommen werden können, in der ein Agent den Deckenanstrich priorisiert, während die anderen Agenten die Wandanstriche vorrangig ausführen. Daraus resultiert eine umfangreichere Analyse, die im weiteren Text aber nicht näher vorgestellt wird.

7.1.8 Leistungsdiskrete und termindiskrete Modellierungen

Im folgenden Simulationsexperiment werden Einwirk- und Trocknungszeiten (*Trocknungsvorgänge*) als *leistungs-* sowie *termindiskrete Modifikation mit konstanter Dauer* betrachtet (siehe *Kapitel 5.2.8*). Sie folgen auf jeden beendeten Anstrichvorgang, der einen Leistungsstand von *100 %* erreicht. Mit diesen Trocknungsvorgängen, für die keine Arbeitskräfte erforderlich sind, müssen als neue Ausgangssituation der gesamten Malerarbeiten *609 Tasks*[1501] bearbeitet werden. Auf dieser Basis erzielt der Simulator

[1500] Eigene Darstellung.
[1501] *609 Tasks* folgen aus: „(*305 Vorgängen - 1 Gerüstaufbau*) · *2 Trocknungsvorgänge + 1 Gerüstaufbau*“.

61.283 Token. Das Simulationsergebnis der Malerarbeiten umfasst *10.752 TaskTransitionen*. Die daraus ableitbaren Ergebnisse der reinen Arbeitszeiten ohne Trocknungszeiten sind in *Abbildung 7-21* als Leistungskurven dargestellt.

Durch die Berücksichtigung der Trocknungsvorgänge rückt der Starttermin der Malerarbeiten der *1. Anstricharbeiten* zeitlich nach hinten. Dies erfolgt automatisch. Die simulierten Bauabläufe der *1. und 2. Anstricharbeiten* sind demgegenüber tendenziell näher zusammengerückt. Zu Beginn der Bauleistung können durch die Trocknungsvorgänge alle vier Arbeitskräfte die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* ausführen. Im Simulationsergebnis macht sich dieser Umstand z. B. am ersten Arbeitstag bemerkbar. Hier erreicht die Leistungskurve eine Leistungsmenge von ca. *1.400 m²*.

Ein vergleichbarer Effekt ist gegen Ende der *2. Anstricharbeiten* zu erkennen (ab Zeitstunde *360 h*). Dann sind die Ausführungsarbeiten der *1. Anstricharbeiten* weitestgehend beendet, so dass sich alle Arbeitskräfte an den *2. Anstricharbeiten* beteiligen können. Zudem untermauern die Simulationsergebnisse, dass die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* aufgrund der zusätzlichen Trocknungsvorgänge ca. drei Arbeitstage dauern. Trotz zusätzlicher Trocknungsvorgänge umfasst die reine Arbeitszeit der gesamtsimulierten Ausführung unverändert *387 h* Zeitstunden.

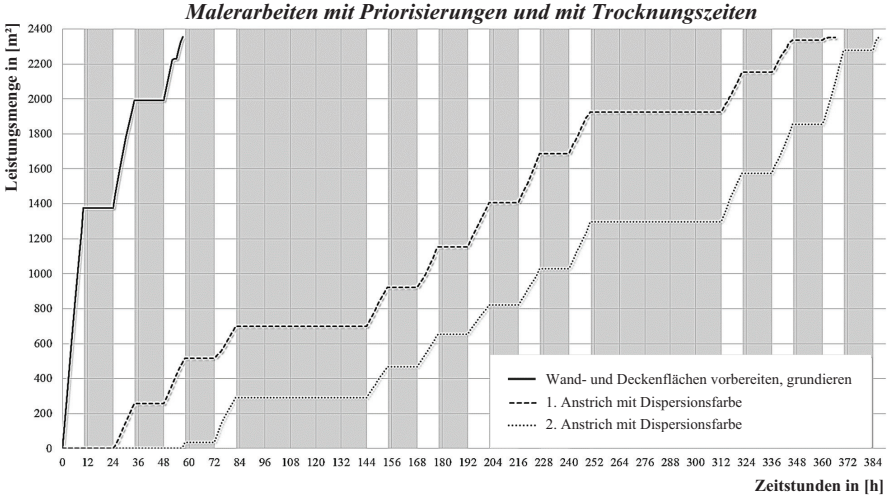


Abbildung 7-21: Simulierte Malerarbeiten mit Trocknungsvorgängen[1502]

Die simulierten Bauablaufmodelle bilden innerhalb der *387 h* Zeitstunden eine „enggestrickte" Prozessabfolge, die sich flexibel umstellen lässt, ohne dass der zuvor ermittelte Fertigstellungstermin – der ggf. als kritischer Termin anzusehen ist – zeitlich überschritten wird. Um dies zu verdeutlichen, erhält jede *Category* für die *1. und 2. Anstricharbeiten* jeweils einen neu versetzten Starttermin:

- *1. Anstricharbeiten* am 03.11.2016 um 07:00 Uhr (bzw. ab Zeitstunde *49 h*);
- *2. Anstricharbeiten* am 07.11.2016 um 07:00 Uhr (bzw. ab Zeitstunde *145 h*).

[1502] Eigene Darstellung.

Aufgrund der terminweisen Anfangsverschiebungen verzeichnen die neuen Simulationsergebnisse keine Änderung der Gesamtbauzeit. Die gesamte Ausführungsdauer beträgt unverändert *387 h* Zeitstunden, hingegen änderten sich die Prozessgeschwindigkeiten. Auch die Zeitabstände zwischen den Anstricharbeiten sind im Verhältnis zum vorausgegangenen Simulationsexperiment teilweise größer. Darüber hinaus ist die Dauer der Teilvorgänge kürzer, wodurch der Bauablauf weniger Angriffsfläche für Störungen bietet. Allerdings stellt er sich terminkritischer dar, weil die Starttermine zeitlich nach hinten verschoben und daher weniger Pufferzeiten für Umstellungen vorhanden sind.

Für das Simulationsexperiment benötigt der Simulator *9.938 TaskTransitionen*. Die verringerte Anzahl ergibt sich aus den schnelleren Ausführungen und ihren kürzeren Dauern, die vom Simulator weniger geschnitten werden können. Ebenso reduziert sich die Anzahl der nun *61.205 Token*. Dies ist ein Hinweis darauf, dass während des Simulationslaufs weniger Einzelfallbetrachtungen aufgrund geringerer Komplexität stattfinden.

In *Abbildung 7-22* werden die Simulationsergebnisse dargestellt. Nach zwei Arbeitstagen sind die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* fast vollständig fertiggestellt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen den *1. und 2. Anstricharbeiten* sind auf die Trocknungsvorgänge zurückzuführen.

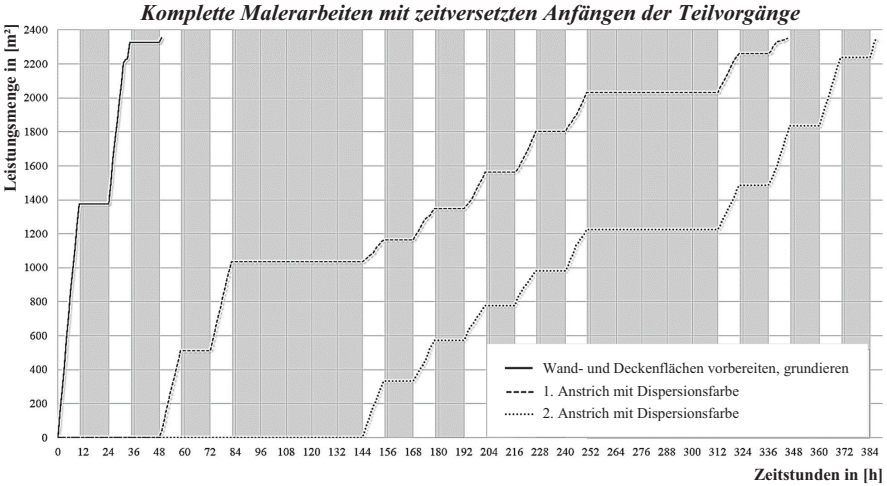


Abbildung 7-22: Simulierte Malerarbeiten mit zeitversetzten Teilvorgängen[1503]

Weitere Analysen zeigten, dass bereits der verzögerte Beginn der *1. Anstricharbeiten* um *einen* Arbeitstag ausreicht, damit eine *Gesamtverzögerung* der Malerarbeiten von *einem* Arbeitstag eintritt. Laut Simulation lässt sich die gleiche Gesamtverzögerung, also *ein* Arbeitstag, *erst* dann erzielen, wenn die *2. Anstricharbeiten* vier Arbeitstage später beginnen – vorausgesetzt, dass die *1. Anstricharbeiten* unverändert am 03.11.2016 um 07:00 Uhr (Zeitstunde *49 h*) starten.

[1503] Eigene Darstellung.

Beginnen die *2. Anstricharbeiten* nur *drei* Arbeitstage später, ist kein Verzug der gesamten Malerarbeiten zu verzeichnen. Solche frei gewordenen Arbeitstage nutzen die Agenten, um die nächstpriorisierten Arbeiten aufzunehmen, indem sie sich z. B. *gegenseitig aushelfen*. Dabei ziehen sie die freien Arbeiten vor.

Allgemein lassen sich viele Kombinationsmöglichkeiten, u. a. zur Verlagerung der Startvoraussetzungen für die Teilvorgänge, mit dem entwickelten Simulator untersuchen, ohne dass der Fertigstellungstermin der gesamten Malerarbeiten überschritten wird.

7.1.9 Zwischenfazit simulierter Soll(0)-Bauablaufmodelle

Die vorausgegangenen Simulationsexperimente basieren hauptsächlich auf faktoriellen Gewichtungen sowie Modellerweiterungen. Sie liefern Ansätze, wie im Zuge einer Simulationsstudie ein Soll(0)-Bauablauf gestaltet werden könnte und gewähren Einblicke über den entwickelten Simulator sowie das daraus ableitbare Modellverhalten. Folgende Simulationsexperimente wurden dafür durchgeführt:

- Genauigkeit der Berechnungsergebnisse im Abgleich mit manuellen Berechnungen;
- Auswirkungen der geometrischen Gewichtungen bei Einhaltung der verpreisten Gesamtbauzeit;
- Beschleunigungsmaßnahmen aufgrund eines nachträglich ergänzten Vorgangs (Gerüstaufbau);
- Plausibilisierung nebenläufiger Ausführungen unter Einhaltung der Fertigungsrichtung;
- zeitliche Verschiebungen infolge Trocknungsvorgängen unter Beachtung priorisierter Prozesse;
- zeitliches Verschieben durch verzögerte Startbedingungen.

Für den konkreten Untersuchungsfall wurden als Bauleistung Malerarbeiten analysiert. Laut den Simulationsergebnissen würden die untersuchten Malerarbeiten bis zur Fertigstellung *13 Arbeitstage* benötigen. Damit stimmen die erzielten Simulationsergebnisse mit den Einschätzungen eines Malers, zwei Malermeistern und eines Bauingenieurs, der hauptsächlich Ausbauarbeiten betreut, überein. Im Konsens wurden von den Befragten für die Bauleistung zwischen *12* und *14 Arbeitstage* geschätzt. Die Simulationsergebnisse sind demnach hinsichtlich des Fertigstellungstermins hinreichend plausibel. Vorteile wurden ferner in den Möglichkeiten gesehen, wie die Plausibilität der Abläufe unter Einhaltung des gesamten Fertigstellungstermins herausgearbeitet werden kann.

Anhand verschiedener Darstellungsmöglichkeiten konnten Aussagen zur Machbarkeit für den Anwender aufbereitet werden. Ein Hauptaugenmerk ist auf das *Bauablaufmodell D* zu richten, das für die Arbeitsstunden einer einzelnen Arbeitskraft entwickelt wurde. Diese Darstellung gibt Aufschluss über die zu erreichende Leistungsintensität, die eine Arbeitskraft für die gesamte Bauleistung erbringen muss. Hiermit kann der Anwender Erkenntnisse über den gewichteten und notwendigen Zeitaufwand gewinnen. Die Ergebnisse sind mit den in *Kapitel 5.2.6* aufgezeigten gewichteten Zeitaufwandswerten vergleichbar.

Darüber hinaus erwies sich die 4D-Visualisierung bei der Durchführung der Simulationsexperimente als sehr hilfreich. Sie zeigt im Sinne eines Animationsfilms die simulierten Fertigungen auf. Sprunghafte Arbeitsplatzwechsel sind hierüber klar erkennbar.

Hinsichtlich der Soll-zu-Ist-Modifikation ist den Segmenten und Anhaltspunkten eine besondere Bedeutung beizumessen. Durchaus kann die große Anzahl an *Token* unübersichtlich wirken. Allerdings lassen sich daraus wesentliche Informationen herausfiltern und in Statistiken oder für anderweitige Darstellungsarten – einige wurden im vorausgegangenen Text gezeigt – kombinieren.

7.2 Testläufe zur Modifizierung möglicher Ist-Bauablaufmodelle

7.2.1 Modifizierung termindiskreter Hemmungen und Beschleunigungen

In diesem Unterkapitel findet eine Demonstration *termindiskreter Modifikationen mit dynamischen Dauern* i. S. v. *Kapitel 5.2.8* statt. Dazu sind in *Abbildung 7-23* die Ergebnisse eines Simulationsexperiments der zuvor betrachteten Malerarbeiten zu sehen. Das Diagramm gibt eine termindiskrete Parametrierung der Arbeitsintensität von zwei Agenten wieder.

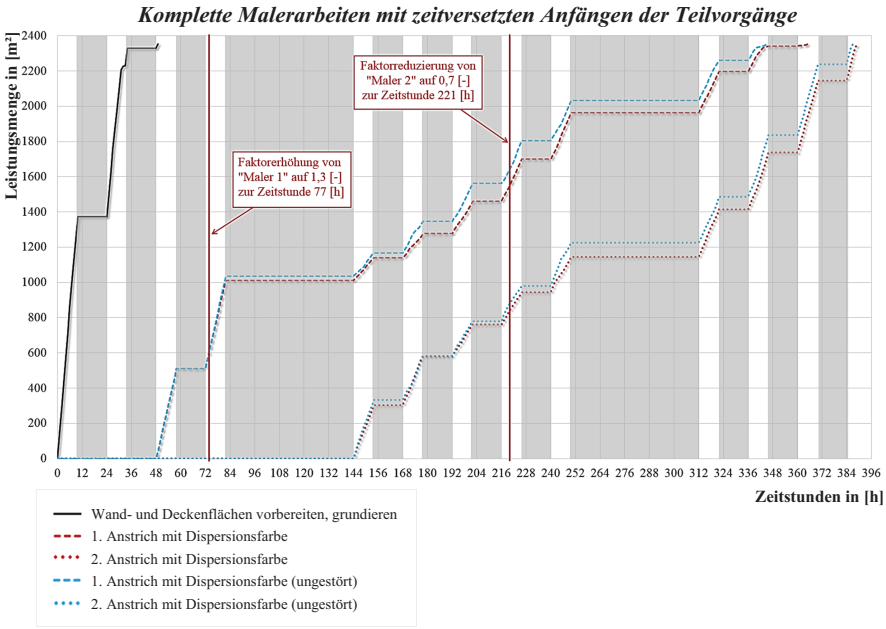


Abbildung 7-23: Simulierte Malerarbeiten mit termindiskreten Aufwandsänderungen[1504]

Konkret erfolgt eine Änderung der faktoriellen Gewichtungsvariablen von *Maler 1* am 04.11.2016 um 10:00 Uhr bzw. zur Zeitstunde *77 h*. Der Wert seiner Gewichtungsvariablen wird zu diesem Zeitpunkt von *1,0* auf *1,3* gesetzt. Die *Aufwandserhöhung* führt dazu, dass die weiteren Anstricharbeiten für den einen Agenten *langsamer* voranschreiten, als es ursprünglich vorgesehen war. Das Diagramm zeigt die Auswirkungen einer weiteren faktoriellen Gewichtung des *Malers 2*. Seine faktorielle Gewichtungsvariable hat zum 10.11.2016 um 11:00 Uhr bzw. zur Zeitstunde *221 h* den neuen Wert *0,7* erhalten, woraufhin der Agent seine Arbeiten ab dem vorgegebenen Termin beschleunigt.

[1504] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

Die getroffenen Annahmen sind frei gewählt und sollen das Modellverhalten verdeutlichen. Nach der ersten Gewichtung wurde ein schrittweiser degressiver Funktionsverlauf der simulierten Arbeitsstunden erwartet, der sich in der Darstellung der Simulationsergebnisse bestätigt. Hingegen „stabilisiert" sich der weitere Funktionsverlauf gegenüber den nicht modifizierten Funktionsverläufen durch die Herabsetzung des Aufwands vom *Maler 2*. Der veränderte Simulationslauf erfordert *60.955 Token* bei insgesamt *9.957* geschalteten *TaskTransitionen*.

Die erzielten Simulationsergebnisse lassen erkennen, wie Hemmungen oder Beschleunigungen für einzelne Arbeitskräfte simuliert werden können. Analoge Modifizierungen können betreffen:

- Erhöhung oder Herabsetzung weiterer Gewichtungsfaktoren,
- Umstellung der Verfahren,
- Fertigungsrichtung,
- Kolonnenzusammensetzung,
- Umwelt.

7.2.2 Modifizierung infolge modellierter Störflächen

Im folgenden Simulationsexperiment werden ausschließlich die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* mit *Trocknungsvorgängen* betrachtet – die darauf folgenden beiden Anstricharbeiten bleiben für eine vereinfachte Darstellung außen vor.

Es wird ein Szenario nachträglicher Bewertungen der Malerarbeiten auf Basis einer Behinderungsanzeige angenommen. Die Malerarbeiten sollen durch eine ***Lagerfläche*** in Raum *R05* für einen bestimmten Zeitraum, durch ein Nebengewerk, beeinträchtigt und diese Fläche nach mehrfacher Aufforderung geräumt worden sein. Aus der Behinderungsanzeige ist zu entnehmen, dass die Beeinträchtigung der Ausführungsarbeiten:

- zum 01.11.2016 um 08:00 Uhr bzw. Zeitstunde *2 h* begann und
- am 03.11.2016 um 10:00 Uhr bzw. Zeitstunde *52 h* beendet wurde.

Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich nachweisen, dass die Arbeitskräfte zum Eintrittszeitpunkt andere Arbeiten hätten vorziehen können, so dass die Einhaltung des Fertigstellungstermins *nicht* gefährdet war. Dieser Umstand soll nicht vertieft, sondern die Modellierung und die unmittelbare Auswirkung der Störung auf die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* vorgestellt werden.

Durch das Einbringen einer zusätzlichen Störfläche in das Simulationsmodell, zu sehen in *Abbildung 7-24* durch einen Screenshot, konnte der Sachverhalt modelliert werden. Der Wirkungszeitraum der Störfläche wird im entwickelten Darstellungskonzept durch ein rötliches Vorgangsintervall wiedergegeben, das sich bei Bedarf zu unterschiedlichen Zeitabschnitten mit zusätzlichen Informationen über den Sachverhalt anreichern lässt.

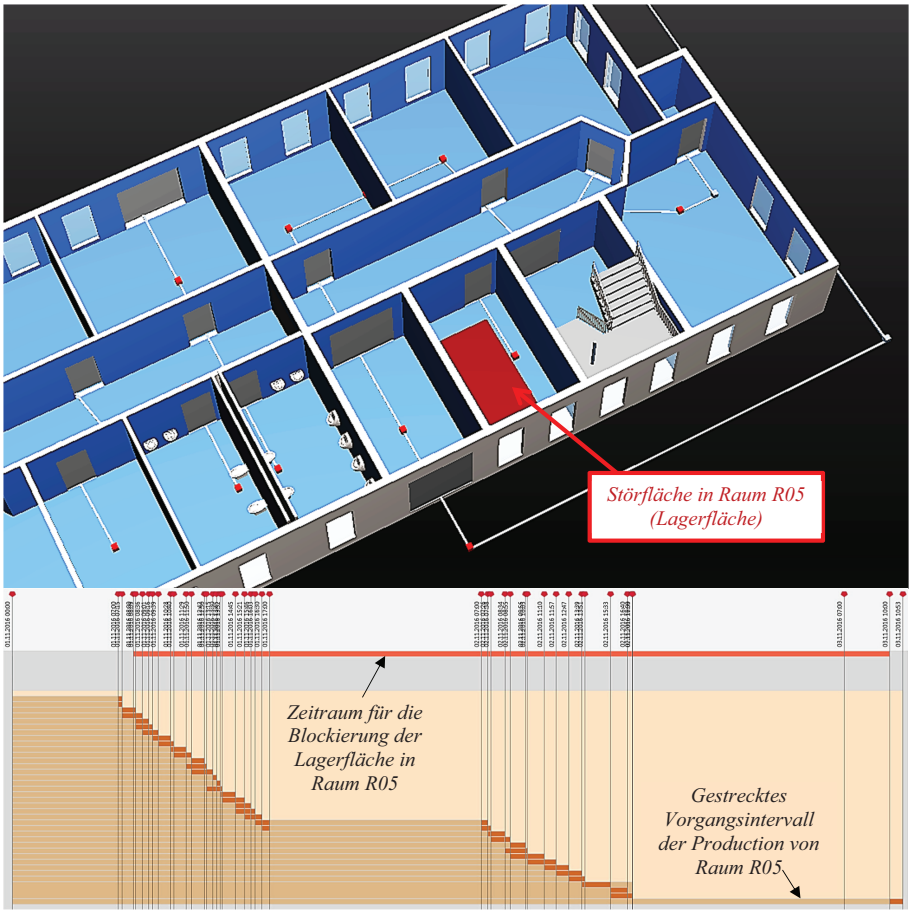


Abbildung 7-24: Screenshot zur Modellierung einer Störfläche in Raum R05 als Lagerplatz[1505]

Den in *Abbildung 7-24* gezeigten Simulationsergebnissen ist zu entnehmen, dass die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* im Raum *R05* erst *nach* Ende des Störungssachverhalts stattfinden. Gut erkennbar ist das gestreckte Vorgangsintervall der entsprechenden *Production*. Hieraus ist der Zeitraum zu entnehmen, wie lange die Arbeitsaufgabe ruhte.

[1505] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

7.2.3 Systeminternes Störungsprotokoll

Der Simulator ermittelt mithilfe eines systeminternen Protokolls die Verschiebungsschritte aller gestörten Arbeitsaufgaben (*Task*), die durch die Agenten hätten ausgeführt werden können, jedoch aufgrund des Störungssachverhalts nicht ausgeführt wurden.

So kann nachträglich nachvollzogen werden, zu welchen Zeitpunkten alle durchführbaren Arbeitsaufgaben aufgrund des modellierten Störungssachverhalts beeinträchtigt oder gar verhindert wurden. Anders ausgedrückt: Es lassen sich Daten ermitteln, mit denen die komplette Verschiebung der behinderten Vorgänge rein rechnerisch rekonstruiert werden kann. Der entwickelte Prototyp listet die gewonnenen Daten als Parameter für das Vorgangsintervall der Störfläche auf oder gibt die Messungen durch eine Sprachausgabe wieder. Die Auflistung der Parameter wird mit *Abbildung 7-25* dargestellt.

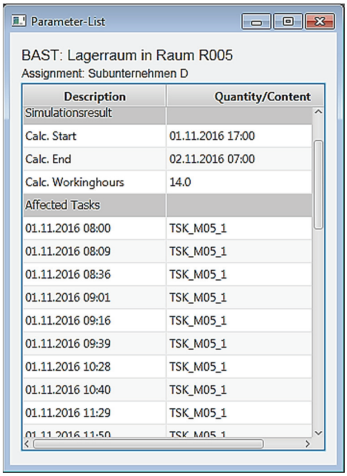


Abbildung 7-25: Screenshot vom systeminternen Protokoll[1506]

Dieses systeminterne Protokoll ermöglicht die Ausgabe von Abhandlungsfolgen, die als „erklärende Informationen“ gem. *Kapitel 3.3.1* verfeinert werden könnten. Solche Daten lassen sich mit einem Balkenplan nicht gewinnen. Tests zeigten, dass diese Daten umfangreich ausfallen können.

7.2.4 Modifizierung blockierter Raumflächen

Neben der Definition von Störflächen lassen sich ebenso Steh- oder Raumflächen termindiskret mit einer konstanten Dauer für andere Störungssachverhalte modellieren. Im nächsten Simulationsexperiment wird entsprechend die ***Wandfläche*** des Raums *R04b* der Malerkolonne blockiert, um offene Schlitze aufgrund fehlender Elektrokabel in den Simulationsberechnungen zu berücksichtigen.

Des Weiteren findet die Blockierung der ***Bodenfläche*** im Raum *R03* statt, z. B. für die Modellierung eines nicht fertiggestellten Estrichs oder die Versiegelung eines Laminatbodens, der nicht betreten werden darf (siehe bspw. *Kapitel 4.5.2* und *Kapitel 6.3.2*).

Sobald eine Raumseite oder die dafür vorgesehene Stehfläche für eine Kolonne blockiert ist, sind die lokalen Produktionsstätten der Malerarbeiten vollständig gestört und somit nicht mehr ausführbar. Über die angegebenen Störungszeiträume bleibt jeweils eine geometrische Konfliktsituation aufrechterhalten. Zum jeweiligen Beginn einer Blockierung tritt dadurch die Störung der *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* in den Räumen ein. Daraufhin weichen die Agenten automatisch auf freie Produktionsstätten aus.

[1506] Eigene Darstellung.

Folgende Voraussetzungen bestehen:

- Die Blockierung der *Wandfläche* im Raum *R04b* beginnt am 01.11.2016 um 10:00 Uhr und dauert bis zum 02.11.2016 um 11:00 Uhr an.
- Die Blockierung der *Bodenfläche* des Raums *R03* fängt am 01.11.2016 um 12:00 Uhr an und hört am 03.11.2016 um 14:00 Uhr wieder auf.

Laut Simulationsergebnis werden die beiden Ausführungsarbeiten in ihren Räumen unterbrochen. Bis zum *Eintritt* der Störungen können die *Vorbereitungs- und Grundierungsarbeiten* einen prozentualen Leistungsstand erreichen:

- für die *Wandfläche* des Raums *R04b* ungefähr *34 %* und
- für die *Bodenfläche* des Raums *R03* ca. *73 %*.

Die restlichen Arbeiten erfolgen erst nach dem jeweiligen Störungsende. Beide modellierten Störungssachverhalten werden mit der in *Kapitel 7.2.2* erwähnten *Lagerfläche* im Raum *R05* zusammengebracht und im Rahmen des Simulationsexperiments berücksichtigt. Anhand des Simulationsergebnisses in *Abbildung 7-26* ist erkennbar, dass die behinderten Ausführungsprozesse zeitlich hinten liegen.

Die Störung des Raums *R03* betrifft auch den Abstellraum *R01*. Sie kommt dadurch zustande, dass der Zuweg zum Raum *R01* über die Bodenfläche des Raums *R03* erfolgt und es keine Ausnahmeregelung der Wegstrecken gibt. Da die Arbeiten im Raum *R01* ebenfalls starteten, werden sie synchron zum Raum *R03* unterbrochen und setzen frühestens nach Störungsende wieder ein.

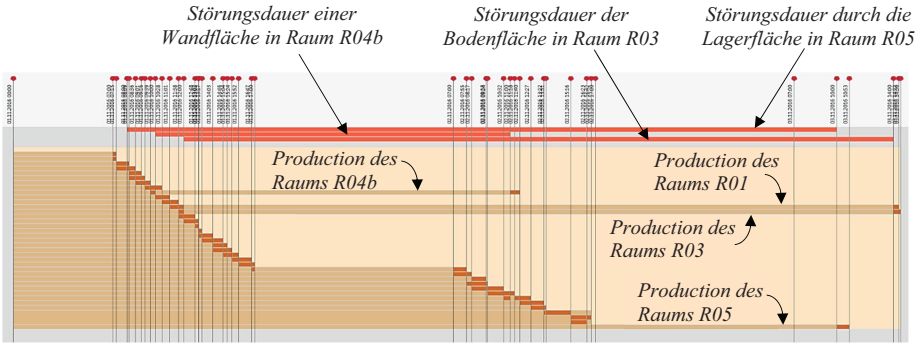


Abbildung 7-26: Screenshot der Simulationsergebnisse mit gestörten Raumflächen[1507]

[1507] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

7.2.5 Simulationsläufe parallel arbeitender Ausbaugewerke

Die folgende Bauzeitanalyse baut auf den zuvor durchgeführten Simulationsexperimenten mit den blockierten Steh-, Arbeits- und Bodenflächen auf. Ergänzend wird ein zweites, zeitparallel arbeitendes Gewerk für Fliesenarbeiten in den Nassräumen – also in den Räumen *R08*, *R09*, *R26* und *R27* – unter den zuvor dargestellten Umständen berücksichtigt.

Die Bauleistung des zusätzlichen Gewerks umfasst das „Verlegen und Verfugen von Bodenfliesen 15/15 cm“. Vorgesehen ist eine Kolonne mit *zwei* Arbeitskräften, für die ein Zeitaufwandswert von *0,8 h/m²* zugrunde liegt. Nach Beendigung der Fliesenarbeiten sind die Räume *nach* der Aushärtezeit des Fliesenklebers wieder *begehbar*. Für die Begehbarkeit wird ein Zeitraum von *24 h* nach jeder Arbeitsaufgabe vorgesehen. Die *Category* der Fliesenarbeiten umfasst raumweise *Production* mit je zwei *Tasks*. Ein *Task* ist für das Verlegen und Verfugen, der andere *Task* für die Aushärtezeit vorgesehen.

Die Fliesenarbeiten einerseits sowie die Malerarbeiten andererseits beeinträchtigen sich gegenseitig. Die Vorgänge des jeweils anderen Gewerks erzeugen mehrere *prozessabhängige Störungsereignisse mit dynamischer Dauer*. Mithilfe des Szenarios sollen die Auswirkungen gegenseitiger Beeinträchtigungen demonstriert werden. Dazu beginnen beide Gewerke innerhalb des Simulationsexperiments zeitgleich mit den Ausführungsarbeiten. Die Fliesenarbeiten erhalten jedoch eine höhere Priorisierung als die Malerarbeiten und werden daher vom Simulator zuerst betrachtet.

Zwischen den *Production* von den Fliesen- und den Malerarbeiten wird nun *pro Raum* eine technologische Abhängigkeit vorgegeben. Alle Fliesenarbeiten müssen in einem Raum fertiggestellt sein – also inkl. Aushärtungszeit des Fliesenklebers –, bevor die Malerarbeiten in den jeweiligen Arbeitsbereichen starten können. Um die Arbeitsweise des Simulators zu verdeutlichen, wird eine weitere (doppelt anmutende) Abhängigkeit zwischen den erforderlichen *Prozessen* berücksichtigt, bei der zuerst der Fliesenkleber aushärten muss, bevor die Malerarbeiten beginnen.

Abbildung 7-27 stellt die erzielten Simulationsergebnisse vor. Für die Malerarbeiten sind die vier Vorgangsintervalle der *Production* mit den Nassräumen *R08*, *R09*, *R26* und *R27* durch zurückversetzte Startzeiten gegenüber der *Category* erkennbar. In diesen Räumen sind die Fliesenarbeiten eine Startbedingung für die Malerarbeiten. Darum beginnen die Malerarbeiten in diesen Arbeitsbereichen verspätet. In der Darstellung sind überdies die Trocknungs- und Aushärtezeiten eingeblendet – dargestellt als dunklere Balken. Letztere schließen an alle Ausführungsprozesse an und dauern zeitlich deutlich länger als die reinen Arbeitszeiten je Produktionsstätte. Laut Simulationsergebnissen schreiten die Fliesenarbeiten gemäß der vorgegebenen Fertigungsrichtung voran. Dabei handelt es sich um die identische Fertigungsrichtung wie die der Malerarbeiten. Somit fanden Fliesenarbeiten in den Räumen *R08*, *R09*, *R26* und *R27* anhand der genannten Reihenfolge statt.

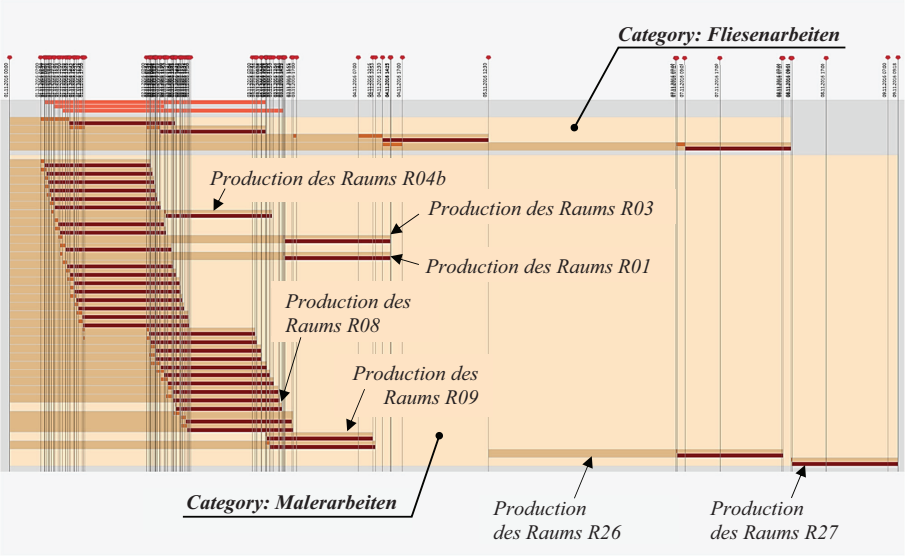


Abbildung 7-27: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (A)[1508]

In der darauf aufbauenden Untersuchung werden nun die technologischen Abhängigkeiten zwischen den *Production* beider Gewerke aufgelöst, so dass die Agenten weiterhin nur noch die vorgegebenen Prozessabhängigkeiten beachten. In *Abbildung 7-28* sind die erzielten und unkommentierten Simulationsergebnisse zu sehen.

Die Fliesenarbeiten beanspruchen demnach eine deutlich längere Ausführungszeit als zuvor. Ursächlich dafür ist zum einen, dass die Fliesenarbeiten keine zwingende Voraussetzung der Malerarbeiten darstellen. Zum anderen konnten die Fliesenarbeiten während der Einwirkzeiten des Grundierungsanstrichs nicht beginnen – die Produktionsstätten waren für sie blockiert. Aus diesem Grund sucht sich die Fliesenlegerkolonne zu Beginn des Simulationslaufs freie Fertigungsorte und wartet gegen Ende des Simulationslaufs auf freie Produktionsstätten. Von den Blockierungen ist ebenso das Wegenetz betroffen, da ein Zutritt im Flurbereich für die Fliesenlegerkolonne zu bestimmten Zeitabschnitten nicht möglich ist. Hierdurch kommen die größten Zeitverluste der Fliesenleger zustande.

[1508] Eigene Darstellung (kommentierter Screenshot).

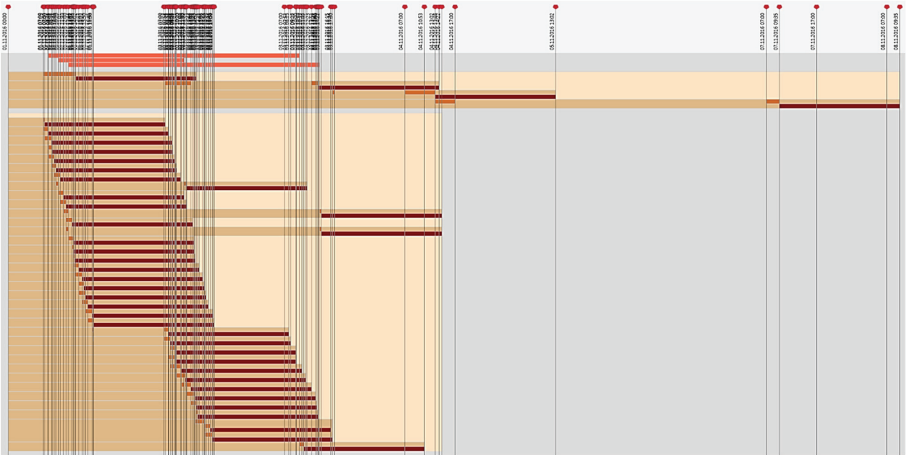


Abbildung 7-28: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (B)[1509]

Zweifellos sind die zuvor getroffenen Annahmen für die Einwirkzeiten des Grundierungsanstrichs zu hoch angesetzt. Aus diesem Grund folgen in der letzten Untersuchung Plausibilisierungsmaßnahmen, mit denen die Beschränkungen der Fliesenlegerkolonne reduziert werden können. Damit die Räume während der Einwirkzeiten betreten werden können, lässt sich die Fliesenlegerkolonne als *LuckyBand* für Vorgänge der Einwirkzeiten definieren. Die daraufhin erzielten Simulationsergebnisse stellen sich für die gesamten Ausbauarbeiten augenscheinlich „kompakter" dar und sind inhaltlich sachlogischer als zuvor (siehe *Abbildung 7-29*). Auf weitere Einzelheiten wird nicht weiter eingegangen.

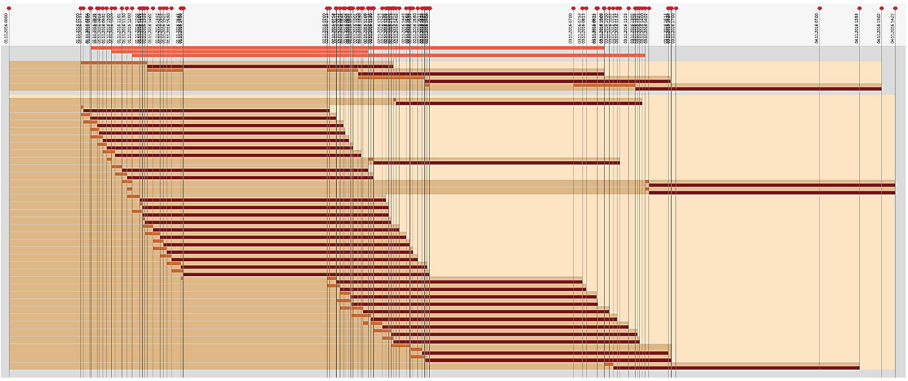


Abbildung 7-29: Simulation mit Abhängigkeiten zwischen Maler- und Fliesenarbeiten (C)[1510]

[1509] Eigene Darstellung.
[1510] Eigene Darstellung.

7.2.6 Simulation von Trockenbauarbeiten

Ebenso sind Simulationsläufe über Trockenbauarbeiten für die Erstellung von Leichtbauwänden möglich. Eine Herausforderung bei diesem Gewerk liegt darin, dass sie neue Räume bilden. Zum Beispiel können aus einem Raum, durch die Erstellung einer zusätzlichen Wand, zwei kleinere Räume entstehen. Andernfalls kann durch den Rückbau einer Wand aus zwei Räumen ein neuer Raum gebildet werden. Gemäß den *Kapiteln 6.3.3 ff.* ist dies mit spezialisierten Transitionen realisierbar. Sie müssen beim Schalten die neu erstellten Bauteile für weitere Untersuchungen aktivieren und die alten Bauteile deaktivieren. Die Deaktivierung der Bauteile verhindert weitere Vorgangsberechnungen, auch sind Blockierungen der Wandseiten nicht mehr möglich. Alternativ können die Bauteile detaillierter modelliert werden, um raumbildende Umstände zu simulieren. Dafür sind alle erforderlichen Bauteile bereits beim Entwurf des BIM-Gebäudemodells auszuarbeiten. Der entwickelte Prototyp kann *Modellversionen*[1511] von *Autodesk Revit Architecture 2016* separieren. Sie lassen sich vom Simulator gesondert betrachten. Die Modellierung des zugehörigen Prozessmodells unterscheidet sich im Vergleich zu den Malerarbeiten lediglich in dem Punkt, dass die Arbeitsaufgaben entweder als bearbeitbar oder als nicht bearbeitbar zu kennzeichnen sind.

In *Abbildung 7-30* ist ein Screenshot aus einem Simulationsexperiment zu sehen. Die Darstellung betont die Raumseiten des (gesamten) Raums *R04*, die nach der Errichtung der farbig hervorgehobenen Trockenbauwand in die beiden kleineren Räume *R04a* und *R04b* aufgeteilt werden. Im entwickelten 4D-Viewer sind alle erforderlichen Raumseiten eingeblendet und liegen geometrisch ineinander (sie stellen sich schraffiert dar, wenn sie unterschiedliche Farben erhalten). Mit diesem Prinzip konnten plausible Bauablaufmodelle für Trockenbauarbeiten simuliert werden.

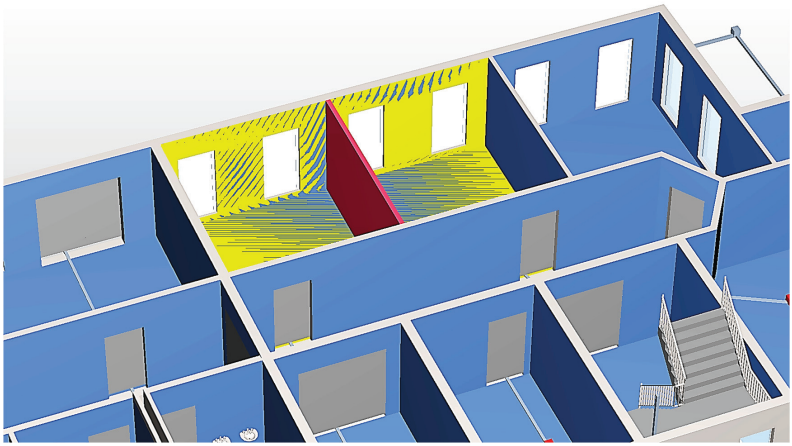


Abbildung 7-30: Raumflächen zur Simulation von Trockenbauarbeiten einer Leichtbauwand[1512]

[1511] Begriff der *Revit-API*. Hierbei handelt es sich um Detaillösungen, wie sie etwa bei Konstruktions- oder Entwurfsänderungen üblich sind.
[1512] Eigene Darstellung.

7.2.7 Zwischenfazit zur Simulation modifizierter Ist-Bauablaufmodelle

Die vorausgegangen Simulationsexperimente stellen Anwendungsbeispiele für die Modifizierung von Ist-Bauablaufmodellen dar. Die Evaluierung des entwickelten Simulators erfolgte durch Parameterstudien und die Darstellung des Modellverhaltens mit folgenden Testläufen:

- Modifizierung termindiskreter Hemmungen und Beschleunigungen einzelner Arbeitskräfte;
- Modifizierung durch Störflächen (Lager);
- Modifizierung durch Blockierungen der Raumflächen;
- Modifizierung durch Beeinträchtigungen parallel arbeitender Gewerke;
- Modifizierung durch raumtrennende Bauteile.

Darüber hinaus wurde ein kurzer Einblick in die *systeminterne Dokumentation* gewährt, womit für jeden Störungssachverhalt eine Chronologie über die Beeinträchtigung ausführbarer Arbeitsaufgaben protokolliert wird. Hiermit lassen sich umfangreichere Simulationsergebnisse für „erklärende Informationen" ableiten.

Weitere Plausibilisierungsmaßnahmen sind über andere Modellbestandteile, z. B. die Wegstrecken des Wegenetzes, möglich. Ihr Einfluss auf die Simulationsergebnisse kann, ähnlich wie bei den vorgestellten Testläufen, verändert werden. Da diese Möglichkeiten umfangreicher sind und die wesentlichen Simulationsprinzipien bereits vorgestellt wurden, soll hierauf nicht näher eingegangen werden.

7.3 Verifizierung und Validierung des Simulationsansatzes

In diesem Unterkapitel wird Bezug auf mehrere Untersuchungen über den entwickelten Simulationsansatz genommen. Hierzu zählen *Expertenbefragungen* und *durchgeführte Analysen* mit dem Prototyp. Eine Bauzeitanalyse realer Ausbauarbeiten wurde aufgrund des erreichten Entwicklungsstands nicht vorgenommen. Somit fanden ausschließlich fallibilistische Erhebungen statt.

7.3.1 Softwaretests während der Entwicklungsarbeiten

Ursprünglich wurde der Petri-Netz-basierte Simulator für eine 2D-Umgebung entworfen und später in die von Grund auf neu entwickelte 3D-Umgebung integriert.[1513] In der 2D-Umgebung konnte er bereits Bauablaufmodelle simulieren. Die daraus ableitbaren Simulationsergebnisse ließen sich in einer PPM-Software[1514] als Balkenplan aufrufen.[1515] Die erzielten Balkenpläne waren für spätere Soll-Ist-Vergleiche zu umfangreich, was zur Entwicklung des Darstellungskonzepts gem. *Kapitel 5.1.3* führte.

Die Entwicklungsarbeiten des Simulators in der 2D-Umgebung wurden von zahlreichen Testläufen begleitet, die sich rein visuell wie die Userstory gem. *Kapitel 5.2.4* darstellten. Ein wesentliches Ziel der Entwicklungen bestand darin, dass die dort beschriebenen *funktionalen Anforderungen* durch den Simulator erfüllt werden. Erst nachdem dies gelang, erfolgte die

[1513] In der 2D-Umgebung bilden die Stehflächen gleichzeitig die Arbeitsflächen ab.
[1514] In diesem Fall *MS Project*.
[1515] Anhand der daraus ableitbaren Balkenpläne wurde das Darstellungskonzept gem. *Kapitel 5.1.3* entwickelt, das für die Soll-zu-Ist-Modifikation gem. *Kapitel 8* von Bedeutung ist.

Integration des Simulators in die 3D-Umgebung. Dafür wurden regelmäßig folgende Einzelfallbetrachtungen, u. a. kombiniert, überprüft und bedarfsweise korrigiert:

- Tauglichkeit und Wirkungen blockierter Stör-, Steh- und Arbeitsflächen;
- Blockierungen durch Agenten parallel arbeitender Gewerke;
- Bildung von Arbeitsgruppen durch die Agenten;
- Erstellung systeminterner Störungsprotokolle;
- Beschleunigungen und Hemmungen mithilfe faktorieller Gewichtungen in den TaskTransitionen;
- termin- und prozessbezogene Abhängigkeiten sowie Modifikationen;
- Ausfall erforderlicher Baustoffmengen;
- Korrektheitsprüfungen bei der Wegfindung im Wegenetz, in Abstimmung mit der Fertigungsrichtung;
- Mengenverteilungen infolge geometrischer Gewichtungen.

Darüber hinaus fanden Prüfungen *nichtfunktionaler Anforderungen* statt. Hierbei wurde ein Hauptaugenmerk auf folgende Korrektheitsprüfungen gelegt:

- Vorgangsberechnungen bzw. Berechnungen der Leistungsstände;
- Schneiden der Vorgänge;
- folgerichtige Auswahlmethoden diverser Priorisierungen;
- Erstellung neuer Transitionen und Kanten (emergentes Modellverhalten);
- Vermeidung redundanter Strukturen im Petri-Netz;
- termingemäße Fortschreibungen des Petri-Netzes.

Um den Simulator in der „neuen" 3D-Umgebung ausführen zu können, mussten geometrische Kollisionsprüfungen auch in der dritten Dimension möglich werden. Hierzu fanden in der 3D-Umgebung entsprechende Tests für beliebige Flächen (*Surface*) und für das Wegenetz statt. Im Rahmen dieser Tests ließ sich z. B. feststellen, dass die Raumseiten aus *Autodesk Revit Architecture 2016* keine Bauteilöffnungen besitzen. Diese mussten gem. *Kapitel 6.2.3* nachträglich ergänzt werden. Unter den neuen Voraussetzungen der 3D-Umgebung blieb der Simulationskern bzw. die Simulationsschleife als wesentlicher Bestandteil des Simulators funktionstüchtig. Einbußen in der Berechnungsgeschwindigkeit ließen sich überwiegend auf die Ausmaße der Simulationsexperimente zurückführen.

Zudem wurden die Berechnungsgeschwindigkeiten des Simulators während der gesamten Entwicklung durchgehend mit verschiedenen Benchmarkings gemessen und bedarfsweise überarbeitet. Die umfangreichen Berechnungen benötigten im Zuge eines Simulationslaufs nur den Bruchteil einer Sekunde.[1516] Ziel der prototypischen Entwicklung war die theoretische Erforschung einer geeigneten Funktionsweise. Für schnellere Berechnungen besteht aber noch großer Optimierungsbedarf.

Die zeitliche Toleranz des Schneidens gem. *Kapitel 6.3.7* erfolgt im aufgerundeten Minutenbereich. Tests zeigten, dass bereits bei einer Toleranz von *fünf Minuten* große Ungenauigkeiten entstehen können. Entsprechend reichen für eine Stunde Arbeitszeit zwölf Schneidvorgänge aus, die infolge der Simulationsläufe durchaus erreicht werden. Je nach

[1516] Ein Benchmarking zeigte, dass die Berechnungsgeschwindigkeit einer Vorgangsberechnung zwischen ca. $2{,}07 \cdot 10^{-5}$ und $1{,}44 \cdot 10^{-4}$ Sekunden bei einem nicht repräsentativen Versuchsaufbau liegt („handelsüblicher Computer im Normalbetrieb").

Simulationsexperiment wäre bei einer solchen Genauigkeitsbetrachtung die Akkumulierung eines kompletten Arbeitstags schnell möglich.

Durch das Schalten einer *TaskTransition* findet eine Einzelfallbetrachtung statt, die mithilfe mathematischer Regeln ganzheitlich zu einem Bauablaufmodell verknüpft werden kann. Nach dem Schalten einer Transition bleiben alle herangezogenen Daten für Analysen erhalten. Darüber lassen sich alle Produktionsfaktoren von einer *TaskTransition* nach einem Simulationslauf auswerten. Beispielsweise können alle simulierten Arbeitsaufgaben abgefragt werden, wann wie viele Arbeitskräfte in den einzelnen Räumen tätig sein mussten und wann diese wo in ihren Ausführungen gestört wurden. Im prototypischen Ansatz erfolgte die Abfrage der Arbeitskräfte über aufrufbare Parameterlisten. Denkbar sind auch Arbeitskraftkurven mit der Kennzeichnung ihrer Auslastungen.

Durch die einfache Ausführung des Petri-Netz-basierten Simulators erfolgen die Verifizierungen aller Simulationsmodelle. Diese Möglichkeit lässt sich in der gewählten Struktur des Petri-Netzes wiederfinden. Ein Simulationsmodell ist erst dann verifiziert, wenn ein Token in der Quelle startet und sich nach Abschluss des Simulationslaufs ein Token in der Senke befindet. Um Netzverklemmungen auszuschließen, muss bei jedem Schleifendurchlauf des Simulators mindestens eine Transition des Netzes schalten.

7.3.2 Testläufe durch Testpersonen

Von drei Testpersonen wurden mehrere Softwaretests durchgeführt. Im Wesentlichen sollten sie die Simulationsergebnisse validieren und getroffene Annahmen kritisch hinterfragen. Zudem sollten Softwarefehler durch die Anwendung des Prototyps aufgedeckt werden.

Im Fokus der Studien standen die Prüfungen der in *Kapitel 5.2.9* gezeigten funktionalen Anforderungen an den Simulator. Alle Simulationsexperimente wurden vor den und während der Untersuchungen besprochen. Insgesamt fanden *15* verschiedene Ablaufszenarien mit oder ohne Störungen statt. Hierbei wurden folgende sechs Gewerkegruppen betrachtet:

- Malerarbeiten,
- Fliesenarbeiten,
- Bodenbelagsarbeiten (Linoleum-Verlegearbeiten),
- Betonwerksteinarbeiten,
- Trockenbauarbeiten und
- Elektroarbeiten.

Da sich die Untersuchungen relativ umfangreich gestalteten und die kritischen Testergebnisse ausschließlich individuelle Detailfragen betrafen, folgen im weiteren Text lediglich die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse.

In den Untersuchungen ließen sich keine Fehler beim Prototyp finden. Tatsächliche Fehler wurden in falschen Eingaben der Prozessdaten erkannt. Beim überwiegenden Teil lagen jedoch *vermeintliche Fehler* gem. *Kapitel 4.5.1* vor, die sich erst nach intensiveren Auseinandersetzungen mit den Simulationsergebnissen erklären ließen. Häufig führte das komplexe Modellverhalten zu Unstimmigkeiten, die sich bei näherer Betrachtung als folgerichtig und somit plausibel herausstellten. Ursächlich für Unstimmigkeiten waren

regelmäßig zuvor getroffene Erwartungen, die den erzielten Simulationsergebnissen widersprachen.[1517]

Um das kritische Hinterfragen anzuregen, sollten die Simulationsergebnisse manuell in eine Balkenplandarstellung überführt werden. Damit die Aufgabe nicht zu umfangreich wurde, fassten die Testpersonen nur den ersten Anfangstermin und den spätesten Endtermin aller möglichen *Tasks* in einer *Production* als Vorgangsbalken zusammen. Die daraus ableitbaren Simulationsergebnisse konnten in einem weiteren Schritt mit manuell erstellten Balkenplänen verglichen werden. Auch hier kristallisierten sich, trotz gleicher Ausgangsdaten, Unterschiede heraus, indem die Abfolge der Vorgänge nicht konsequent eingehalten wurde. In der Regel stellten sich die Bauablaufmodelle der Simulationsergebnisse plausibler dar als die der manuell erstellten Balkenpläne.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Projektarbeit[1518] untersucht, inwieweit vergleichbare Ergebnisse zur Simulation mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms[1519] – zur Berechnung von Vorgangsdauern – und einer PPM-Software[1520] – zur Darstellung eines Balkenplans – erzielt werden können. Hierzu mussten alle Vorgänge der Ablaufstruktur mit Anordnungsbeziehungen manuell verknüpft werden. Auf dieser Basis fanden umfangreichere Parameterstudien in Form von Sensitivitätsanalysen statt. Dazu wurden im Tabellenkalkulationsprogramm Hemmungs- und Beschleunigungsfaktoren in den Vorgangsberechnungen vorgesehen.

Es hat sich erwiesen, dass mit dieser Herangehensweise grundsätzlich Verhaltensexperimente eines Modells möglich sind. Änderungen der Hemmungs- und Beschleunigungsfaktoren erzielten zeitlich kürzere oder längere Vorgangsbalken. Verschiebungen der Vorgangsbalken waren unter Einhaltung der vorgegebenen Anordnungsbeziehungen möglich.

Jedoch war der erforderliche Arbeitsaufwand um ein Vielfaches höher, sobald vergleichbare Ergebnisse, wie die des entwickelten Simulators, zustande kommen sollten. Mit dem Tabellenkalkulationsprogramm musste der Anwender seine Arbeitsschritte zur Modellbildung gut durchdenken, da die endgültigen Analyse-Ergebnisse *direkt* zustande kamen. Tiefergehende Betrachtungen waren nicht notwendig, wie z. B. Bewertungen situativer Konflikte, die der entwickelte Simulator zu allen Zustandsänderungen durch das korrektive Schneiden der Vorgangsdauern vornimmt. Beim Tabellenkalkulationsprogramm war dafür die Eingabe aller folgerichtigen Anordnungsbeziehungen im Sinne einer Planung erforderlich. Nur durch manuelle, punktuelle Anpassungen ließen sich Änderungen erreichen.[1521] Gerade nachträglich integrierte Störungssachverhalte mussten unter Berücksichtigung zahlreicher Einzelheiten verknüpft werden.[1522] Teilweise waren hierfür beachtliche Umstrukturierungen der Bauablaufmodelle notwendig, um die in sich stimmigen Unterbrechungen sowie Verschiebungen der Vorgangsbalken zu erreichen.

[1517] Auch während der Entwicklungsarbeiten fanden regelmäßig abweichende Einschätzungen über folgerichtige Simulationsergebnisse statt.
[1518] Vgl. Stanzel, 2017.
[1519] In diesem Fall *MS Excel*.
[1520] In diesem Fall *MS Project*.
[1521] Vgl. Stanzel, 2017: S. 105.
[1522] Vgl. Stanzel, 2017: S. 85-86.

Im Vergleich zu den automatisierten Fortschreibungseigenschaften des entwickelten Simulators wurden die manuellen Anpassungen der Abläufe mit dem Tabellenkalkulationsprogramm im Rahmen der Projektarbeit als „bedeutendster Nachteil" bezeichnet.[1523] Dementsprechend richtet sich der zu erbringende Arbeitsaufwand mit dem Tabellenkalkulationsprogramm nach der Verhaltenskomplexität des Bauablaufmodells und kann hoch ausfallen.[1524] Zudem besteht ein Risiko darin, dass durch die manuell vorgegebenen Ablaufreihenfolgen ein Fehler übersehen oder nur geringfügig objektiv gearbeitet wird. Dies ist besonders bei detaillierteren Betrachtungen der Fall.[1525]

Darüber hinaus erwies sich beim Gebrauch des Tabellenkalkulationsprogramms die Zusammenstellung von Sammelvorgängen als schwierig, weil dafür *kein* entsprechender Automatismus ausgearbeitet wurde.[1526] Vergleichend dazu bietet der entwickelte Simulationsansatz umfangreiche Gliederungsmöglichkeiten (siehe *Kapitel 6.3.1*). Ein weiterer Vorteil des entwickelten Simulators lässt sich zudem in der bauteilorientierten Visualisierung der Simulationsergebnisse wiederfinden.

Zusammenfassend stellte sich der entwickelte Simulationsansatz durch einen variantenreichen Automaten dar, der die errechneten Bauablaufmodelle umfangreich plausibilisieren und darstellen kann. Die drei beachtlichsten Erkenntnisse durch die Testläufe sind:

Erkenntnisse zum Modellverhalten:

Alle Testpersonen gaben an, dass kleinste Wertänderungen unterschiedliche Simulationsergebnisse erzielen und nicht erwartete Ablaufreihenfolgen stattfinden können. Zudem wurde durch die nachträgliche Einarbeitung von Störungen in die Bauablaufmodelle erkannt, dass unter den getroffenen Annahmen häufig nicht beachtete Ausweichmöglichkeiten vorhanden sind.

Erkenntnisse zur Wahrnehmung durch das Modellverhalten:

Der Simulator erzielte in den Untersuchungen durchgängig folgerichtige Ergebnisse. Trotz dieser Umstände wurden teilweise zuerst Fehler in den Simulationsergebnissen vermutet, obwohl sich die „Fehlerquelle" häufig auf eine nicht erfüllte Erwartungshaltung zurückführen ließ. Damit bestätigte sich die in *Kapitel 4.5.1* gebildete *These 4*, dass die Simulation einen Beitrag für das Aufdecken fehlerhafter Annahmen leistet. Dazu mussten die Unstimmigkeiten zwangsläufig intensiver betrachtet werden, um das Simulationsergebnis sachlogisch[1527] zu durchdringen.

Für die Feststellung möglicher Unstimmigkeiten braucht keine Kontrolle der einzelnen Vorgangsberechnungen stattzufinden. Diese Erkenntnis ist wesentlich, da die Menge aller geschalteten *TaskTransitionen* die Anzahl von zehntausend schnell überschreiten kann. Vielmehr zeigten die Tests, dass nach einer kürzeren Einarbeitungszeit ein „gesundes, aber misstrauisches Überprüfen" der Simulationsergebnisse ausreicht, um mögliche Unstimmigkeiten innerhalb des Darstellungskonzepts zu identifizieren. Alle Testpersonen gaben an, dass

[1523] Vgl. Stanzel, 2017: S. 104.
[1524] Vgl. Stanzel, 2017: S. 104.
[1525] Vgl. Stanzel, 2017: S. 104-105.
[1526] Vgl. Stanzel, 2017: S. 88 ff.
[1527] Der Begriff „sachlogisch" umfasst den Inhalt des Einzelfalls, der gleichzeitig mit bestimmten Rechtsfragen in Einklang steht (siehe Näheres in *Kapitel 4.5* und in *Kapitel 4.6.2*).

die 4D-Visualisierung und die mit den Bauteilmodellen verknüpften Vorgangsintervalle sehr wirksame Hilfsmittel waren. Negativ beurteilt wurde hingegen die Usability des Darstellungskonzepts des Prototyps, weil Beschriftungen der Vorgangsintervalle in einer Gesamtübersicht fehlten. Hingegen wurde die Funktionstüchtigkeit des Simulators insgesamt positiv bewertet.

Erkenntnisse über aufgetretene Fehler:

Tatsächliche Fehler ließen sich in den Untersuchungen ausschließlich auf falsch eingegebene Prozessdaten zurückführen. Hauptsächlich waren es fehlerhafte alphanumerische Daten, die weitgehend manuell eingegeben worden sind. Die entdeckten Fehler ließen sich relativ leicht beheben. Diese Fehlerquelle könnte durch die Erstellung einer geeigneten Benutzeroberfläche erheblich reduziert werden.

8 Soll-zu-Ist-Modifikation (baubetriebliches Nachweisverfahren)

8.1 Aufgaben und Einordnung

8.1.1 Anwendungsgrundsätze

Gemäß *Kapitel 8.1.2* ist die *Soll-zu-Ist-Modifikation* ein baubetriebliches Nachweisverfahren, das zur Rekonstruktion und für die Analyse zeitlicher Wirkungen aus gestörten Bauabläufen geeignet ist. Sie wurde nach den in *Kapitel 4.5* gebildeten *Arbeitshypothesen* und den Anforderungen des Softwarekonzepts nach *Kapitel 5* entworfen. Sie kann zur ***Bauzeitanalyse*** von *zeitabhängigen Ansprüchen* gem. *Kapitel 4.3* i. V. m. *Kapitel 4.4* unter Einbeziehung *simulierter Bauablaufmodelle* im Sinne des *Kapitels 7* genutzt werden.

Dementsprechend eignet sich die Soll-zu-Ist-Modifikation, um die Arbeit eines Sachverständigen bei der Erstellung baubetrieblicher Gutachten zu unterstützen. *Leupertz* mahnt an, dass diese „[…] *ausschließlich bei der Aufklärung und Feststellung von Tatsachen helfen*, *die der Richter dann seiner rechtlichen Beurteilung des jeweiligen Streitfalles zugrunde zu legen hat. Diese Aufgabentrennung ist sinnvoll und notwendig, weil sie Fachwissen und Befugnis an den richtigen Stellen zusammenführt. Sie lässt sich zu dem Satz verdichten, dass der Sachverständige nicht dazu berufen ist, einen bauvertragsrechtlichen Streitfall zu entscheiden*."[1528] Rechtsfragen muss der Sachverständige daher nicht beantworten, da diese außerhalb seines Zuständigkeitsbereichs liegen. Die rechtliche Bewertung bleibt allein Juristen vorbehalten, die sich spätestens zur Vertragsauslegung i. S. d. §§ 133, 157 BGB mit Rechtsfragen am Themenkomplex beteiligen.[1529] Grundsätzlich ist die Auslegung von Verträgen Aufgabe des Gerichts und nicht des Sachverständigen.[1530] Vielmehr hat er bestimmte Erkenntnisse aus einem zumeist unklaren Sachverhalt festzustellen, die er nur mit Themen *seines Fachs* zielgerichtet herausarbeiten und objektiv konkretisieren darf. Zudem hat er seinen Erkenntnisgewinn übersichtlich zu gestalten, damit dieser leicht nachvollzogen werden kann. Widersprüche sind deshalb zu vermeiden. Die genannten Grundsätzlichkeiten erstrecken sich auf alle Formen von Gutachten (siehe *Kapitel 8.1.2*).[1531]

Bei der Erstellung eines baubetrieblichen Gutachtens über gestörte Bauabläufe ist keine absolute Trennung zwischen baubetrieblichen sowie baurechtlichen Fragestellungen möglich, da aus beiden Fachrichtungen immer eine ablauforganisatorische und vertragsrechtliche Schnittmenge vorliegt. Eine fachbezogene Abgrenzung ist am ehesten dadurch zu erreichen, dass regelmäßige Plausibilitäts- und Machbarkeitsstudien über die streitgegenständlichen Ausführungsprozesse stattfinden. Bezogen auf die Vorüberlegungen aus *Kapitel 4.5* sind diese Bewertungen auf *belegbare* Dokumente inkl. *sachlogischer* Kommentierungen abzustimmen, um weiterführende vertragsrechtliche Themen – wie die Ausfüllung bestimmter Tatbestandsvoraussetzungen – begründen zu können.

[1528] Leupertz, DS 2013: 297.
[1529] Vgl. Althaus, BauR 2012: 361; Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Rdn. 1418. Siehe *Kapitel 4.1.4*.
[1530] Vgl. Leupertz, DS 2013: 296.
[1531] Vgl. Luz, BauR 2017: 14 ff.

8.1.2 Abgrenzung der Einsatzgebiete

Baubetriebliche Gutachten können durch das Gericht infolge eines *Beweisbeschlusses* beauftragt werden. Dies sind etwa Gutachten aus *selbstständigen Beweisverfahren* oder *durch das Gericht angeordnete Gerichtsgutachten* in Zivilstreitigkeiten. Im Beweisbeschluss sind fachliche Fragestellungen enthalten, die entweder zu einer einvernehmlichen Lösung führen oder das Gericht in seiner Entscheidungsfindung unterstützen sollen.

Die Soll-zu-Ist-Modifikation eignet sich ebenso zur Erstellung von *Privatgutachten*. Solche Gutachten werden nicht über das Gericht, sondern *von einer Partei beauftragt* und können in einen Zivilprozess eingebracht werden. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Gutachten stellen Privatgutachten in Rechtsstreitigkeiten *keine Beweismittel* dar, sondern lassen sich als *qualifizierter Parteivortrag*[1532] ansehen.

Im Gegensatz zu Gutachten, die von Amts wegen eingeleitet werden, sind Privatgutachten *für die Gegenpartei nicht verbindlich* und können von ihr in der Sache argumentativ „erschüttert“[1533] werden. Ein bedeutender Vorteil von Privatgutachten besteht darin, dass sie sich *baubegleitend* erstellen lassen. Das begünstigt ein strategisches Vorgehen für eine umfassendere und aussagekräftigere Dokumentation, die sich darüber hinaus für unterschiedliche vertragsrechtliche Sachlagen gezielt aufbereiten lässt. Hiervon kann auch das Baustellencontrolling profitieren. Der Vorteil liegt darin, dass bestenfalls alle relevanten Informationen in das Gutachten eingebracht werden, um Komplexfragen zeitnah – und somit eindeutiger – auszuarbeiten. Darüber hinaus können Privatgutachten Streitfragen vorbeugen und für einvernehmliche Lösungen hilfreich sein, da sich die *strittigen Lebenssachverhalte*[1534] frühzeitig erklären und Widersprüche aufdecken lassen. Grundsätzlich bedarf es auch bei baubegleitenden Privatgutachten einer nachträglichen Rekonstruktion der tatsächlichen Baustellensituation, da die Begutachtung aufgrund eines gewissen Zeitabstands nur rückblickend durchgeführt werden kann.

Die Soll-zu-Ist-Modifikation sollte sich besonders für Gutachten eignen, die nach einem Beweisbeschluss erstellt werden. Das bedeutet jedoch nicht, dass Privatgutachten gänzlich ausgeschlossen sind. Je nachdem können sie entweder in Form einer baubegleitenden Nachweisführung oder im Falle einer strategisch ungünstigeren Variante als nachträgliche Untersuchung beauftragt werden.

[1532] Das Gericht muss den Kläger auf konkret fehlende Sachvorträge, die es als entscheidungserheblich ansieht, unmissverständlich hinweisen. Sobald das Gericht nicht dazu in der Lage ist, ist es gehalten, einen Sachverständigen von Amts wegen hinzuzuziehen. Vgl. BGH, Urteil vom 24.02.2005 – Az. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177. Laut *OLG Düsseldorf* „[…] *darf ein Privatgutachten* […] *eine eigene Beweisaufnahme des Gerichts entbehrlich machen, wenn die Beweisfrage allein schon aufgrund dieses substantiierten Parteivortrags zuverlässig beantwortet werden kann* […]. *Voraussetzung ist allerdings, dass das Gericht die Gegenpartei auf die beabsichtigte Verwertung des Gutachtens als alleinige Grundlage der Entscheidungsfindung hinweist* […]“. OLG Düsseldorf, Urteil vom 24.03.2015 – Az. I-21 U 137/14, BeckRS 2016: 16047.

[1533] Siehe *Kapitel 4.4.1* und *Kapitel 4.5*.

[1534] Siehe *Kapitel 4.4.1*.

8.2 Durchführung der Soll-zu-Ist-Modifikation

8.2.1 Übersicht

Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation findet ein bauzeitbezogener Soll-Ist-Vergleich statt. Abweichungen lassen sich feststellen, indem beim Soll- und Ist-Bauablaufmodell ein *vergleichbarer Referenzzustand*[1535] gefunden wird. Beide Zustände sind gegenüberzustellen.[1536] Im nächsten Schritt werden die restlichen Bauzeiten beider Bauabläufe miteinander verglichen. Die gemessenen Zeitabweichungen belegen objektiv die ermittelten Bauablaufstörungen.[1537] In der Anwendung ist die Soll-zu-Ist-Modifikation dem *Bauablauf-Differenzverfahren* nach *Heilfort* sehr ähnlich.[1538] Wesentliche Unterschiede bestehen in der computergestützten Darstellungs-, Datenverwaltungs- und Berechnungsmethodik.

Zur Ausarbeitung der *konkreten bauablaufbezogenen Darstellung* ist im ersten Schritt eine baubetriebliche Ablauflogik herauszuarbeiten,[1539] so dass im zweiten Schritt eine zeitliche Abweichung zwischen Soll- und Ist-Bauablauf ermittelt werden kann. Ob und inwieweit sich daraus bestimmte materielle Ansprüche[1540] ableiten lassen, sind bereits baurechtliche Fragestellungen, die juristisch geklärt werden sollten, damit die baubetrieblichen Analyseergebnisse *nicht* von den wesentlichen baurechtlichen Sachverhalten abweichen.

Die Anwendung des Nachweisverfahrens wird nachstehend aus der Sicht des Auftragnehmers für *Privatgutachten*[1541] beschrieben, wobei von einem Zeitpunkt *nach* der Bauausführung – also nicht baubegleitend – ausgegangen wird. Die Durchführung des Nachweisverfahrens gliedert sich grob in die nachstehend aufgezählten Arbeitsschritte, in denen teilweise Bezeichnungen enthalten sind, die im darauf folgenden Text erläutert werden:

1. ***Vorbereitung***
   a) Vorbereitung bevorstehender Modellierungsaufgaben, z. B. Einarbeitung in das Projekt, Benennung der Untersuchungsziele oder Wahl des Detaillierungsgrads
   b) Simulation des Soll(0)-Bauablaufmodells auf Grundlage des Vertrags und Bestimmung der Ist-Anhaltspunkte
   c) Prüfung des Soll(0)-Bauablaufmodells durch Einarbeiten der Fristen mit ihren Terminen und zeitgleiche Durchführung der *Plausibilisierungs-* und *Machbarkeitsstudien*
   d) Gruppierung der Teilabläufe durch die Definition von *Gruppenintervallen* und Einarbeiten von *Markern* in das Soll-Bauablaufmodell

Eine weitere Nachweisführung ist nur dann möglich, wenn ein *plausibilisiertes* und *machbares* Bauablaufmodell vorliegt. Die Plausibilität ist durch die Beobachtung des Anwenders zu validieren. Die Machbarkeit ist angesichts des *Benchmarkings* zu prüfen.

[1535] Vgl. Heilfort, BauR 2003: 1647. *Heilfort* unterscheidet den Referenzzustand des *Soll-Bauablaufs* und den Beobachtungszustand des *Ist-Bauablaufs* – siehe Analogien in *Kapitel 4.6*.
[1536] Siehe *Kapitel 4.4.4*.
[1537] Siehe *Kapitel 3.4.2*.
[1538] Vgl. Heilfort, BauR 2010.
[1539] Siehe *Kapitel 4.4.3* i. V. m. *Kapitel 4.5*.
[1540] Siehe *Kapitel 4.3*.
[1541] Siehe *Kapitel 8.1.2*.

2. ***Nachweisführung der Bauzeitverlängerung (iterative Vorgehensweise)***
   a) Definition von *Zeitvektoren* anhand der Untersuchungsziele
   b) Chronologisches Einarbeiten konkreter Störungssachverhalte, wie Leistungsmodifikationen und/oder Unterbrechungen
   c) Wahl notwendiger Fertigungsprozesse und Produktionsfaktoren
   d) Verifizierung[1542] der *Marker* im Rahmen einer *Stützstellenverifizierung*. Modifikationen sind am gegenständlichen Bauablaufmodell durchzuführen (das Soll-Bauablaufmodell wird anteilig zum Ist-Bauablaufmodell modifiziert).
   e) Validierung des Ist-Anteils vom Bauablaufmodell (Durchführung des *Benchmarkings*)
   f) Modellierung von Ausweichmöglichkeiten des modifizierten Soll-Anteils vom Bauablaufmodell (z. B. Umstellung der Arbeiten; Modifikationen können am verbleibenden Soll-Anteil vorgenommen werden)
   g) Validierung der Ausweichmöglichkeiten (Durchführung des *Benchmarkings*)
   h) Messung der zeitlichen Abweichung und Fortschreibung bauzeitlicher Abweichungen mithilfe der *Zeitvektoren*

Da sich der Soll-Bauablauf während der Bauausführung weiterentwickeln kann, ist eine Überschneidung zwischen den oben genannten Punkten zur *Vorbereitung* und *Nachweisführung* möglich. Um einzelfallbezogene Lösungen zu finden, darf zweckmäßigerweise von der vorgeschlagenen Arbeitsweise abgewichen werden.

Im weiteren Text wird die Soll-zu-Ist-Modifikation hinsichtlich der oben genannten Punkte näher erläutert. Dazu erfolgt eine abstrakte Vorstellung des Nachweisverfahrens. Auf die Punkte *1.a)*[1543] und *1.b)*[1544] wird nicht näher eingegangen, da diese bereits erläutert wurden. Aus diesem Grund findet eine nähere Vorstellung des Punkts *1.c)* statt, bei dem der vertragsgemäße Soll(0)-Bauablauf zu rekonstruieren ist.[1545] Danach wird auf den Punkt *1.d)* eingegangen. In den *Kapiteln 8.2.4 ff.* ist die Vorgehensweise der Punkte *2.a-h)* nachzulesen.

8.2.2 Rekonstruktion und Prüfung des Soll(0)-Bauablaufs

Für eine *konkrete bauablaufbezogene Darstellung* ist zu prüfen, ob die Bauleistung mit den in der *Urkalkulation* angenommenen Zeitansätzen überhaupt innerhalb des vertraglich vereinbarten Zeitrahmens hätte ausgeführt werden können.[1546] Dazu ist ein ungestörtes, *produktionsorientiertes* ***Soll(0)-Bauablaufmodell*** auszuarbeiten,[1547] mit dem sich die Inhalte der Vertragsunterlagen zum Zeitpunkt der Auftragserteilung verständlich in einer Zeit-

[1542] Diese Verifizierung bezieht sich auf die Begutachtung der Simulationsergebnisse. Sie ist von der Verifizierung des Simulationsmodells zu unterscheiden.
[1543] Die Aufgaben entsprechen im Wesentlichen einer Systemanalyse. Systemtheoretische Überlegungen sind in *Kapitel 2.1* enthalten. Siehe Gliederung in *Aufbau-* und *Ablaufstrukturen* gem. *Kapitel 2.1.3*. Dieses Thema wird konkreter in *Kapitel 6* im Zusammenhang mit dem entwickelten Simulationsansatz gem. *Kapitel 7* vorgestellt.
[1544] Das Prinzip zur Erstellung von *Anhaltspunkten* ist in *Kapitel 4.5* nachzulesen.
[1545] Siehe *Kapitel 8.2.2*.
[1546] Siehe *Kapitel 4.4*.
[1547] Siehe *Kapitel 4.4.3*.

darstellung wiedergeben lassen. Die modellbasierte Rekonstruktion des Soll(0)-Bauablaufs erfolgt i. A. a. *Kapitel 7.1*.

Bei der Rekonstruktion ist die *Aufbau-* und *Ablaufstruktur* des Modells unter Berücksichtigung vereinbarter oder ermittelbarer Ausführungsfristen zu validieren. Mit dieser Maßnahme sollen fehlende oder fehlerhafte Annahmen des Vertrags, aus denen der Auftragnehmer *keine* Ansprüche ableiten kann, baubetrieblich identifiziert werden. Dazu muss das simulierte Soll(0)-Bauablaufmodell sachlogische Prozessabfolgen auf einer Zeitachse abbilden.[1548] Im Rahmen einer Machbarkeitsprüfung muss das Soll(0)-Bauablaufmodell aufzeigen, ob die damit abgebildeten Bauleistungen innerhalb der Vertragsfristen liegen.[1549] Ferner schafft die Aufstellung des Soll(0)-Bauablaufmodells einen Ausgangspunkt der darauf folgenden Bauzeitanalysen. In der *Abbildung 8-1* werden diese Aufgaben im Sinne des *Kapitels 5.2.8* qualitativ veranschaulicht.

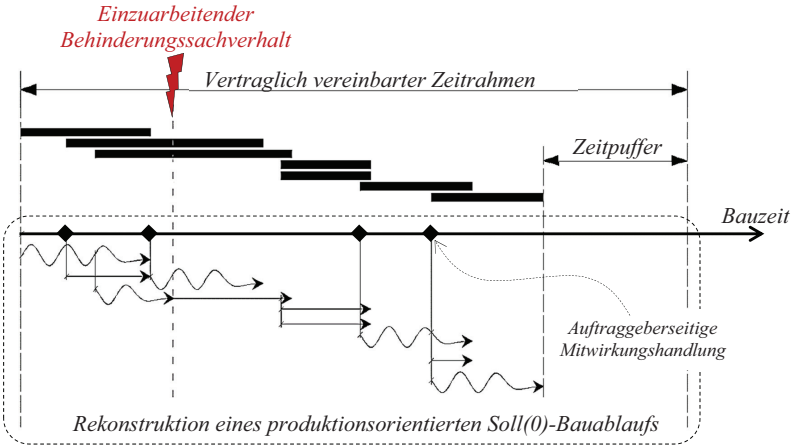


Abbildung 8-1: Qualitative Darstellung der Rekonstruktion eines Soll(0)-Bauablaufs[1550]

Bei der Rekonstruktion eines produktionsorientierten Soll(0)-Bauablaufmodells sind die erforderlichen Ausführungsprozesse unter Berücksichtigung der vertragsgemäßen Restriktoren zu simulieren. Sie unterliegen einer dynamisch veränderlichen Baustellengeometrie des Gebäudemodells.[1551] Die Modellierung des Soll(0)-Bauablaufs setzt eine Berücksichtigung der Mengenvordersätze aus der Leistungsbeschreibung sowie die kalkulierten Zeitbedarfswerte oder den geplanten Ressourceneinsatz aus der Preisbildung voraus. Dabei sind die vereinbarten Mitwirkungshandlungen seitens des Auftraggebers, wie

[1548] Siehe *Kapitel 4.5*.
[1549] Siehe *Kapitel 3.3.2*.
[1550] Eigene Darstellung i. A. a. *Abbildung 5-31*. Als Vereinfachung wurde ein Gesamtpuffer dargestellt. Die Aufgabe erstreckt sich über den kritischen Weg, der unter Berücksichtigung der Vertragsfristen zu ermitteln ist (siehe *Kapitel 3.3.2*). Ebenso bleibt in dieser qualitativen Darstellung die im *Kapitel 5.1.3* genannte „Salamitaktik“ unberücksichtigt, die durch den Simulator stattfinden würde.
[1551] Siehe *Kapitel 7.2.6*.

z. B. Planübergaben, Bemusterungstermine, als *meilensteinähnliche Anhaltspunkte*[1552] zu modellieren.

Außerdem ist darauf zu achten, dass die Produktionsprozesse in einer geeigneten Reihenfolge sachlogisch ineinandergreifen. Dafür ist vom Anwender ein sinnvoller Detaillierungsgrad maßgeblicher (Teil-)Prozesse auszuarbeiten,[1553] der auf die modellierten Störungssachverhalte abgestimmt werden sollte. Der Anwender hat sich an verfügbaren Soll- sowie Ist-Informationen zu orientieren und darf bei der Bestimmung der Arbeitsproduktivitäten nicht unangemessen von den Leistungsansätzen aus der Preisbildung abweichen, so dass keine Widersprüche hinsichtlich eines auskömmlichen Bauzeitenplans entstehen.[1554]

Ferner ist eine Berücksichtigung der *kapazitiven Abhängigkeiten*[1555] erforderlich, die ggf. auf die vereinbarten Fertigungsrichtungen abzustimmen und sinngemäß zu modellieren sind. Es ist zu beachten, dass die Fertigungsrichtungen ggf. durch *technologische Abhängigkeiten*[1556] bedingt werden, die innerhalb der Arbeitsbereiche bestehen können.[1557]

Aufbauend auf diesen Informationen muss der Soll(0)-Bauablauf des Bauprojekts so *realitätsnah* wie möglich simuliert werden. Falls jedoch Angaben zum Ressourceneinsatz usw. fehlen, sind diese über den vereinbarten Gesamtpreis und unter Berücksichtigung aller Kostenbestandteile angemessen zu rekonstruieren. Diese Thematik würde den Umfang der vorliegenden Forschungsarbeit überschreiten und wird daher nicht weiter vertieft. Es ist davon auszugehen, dass ein derartiges Soll(0)-Bauablaufmodell mit der in *Kapitel 7* beschriebenen Simulationsmethodik erstellt werden kann.

8.2.3 Ausgangssituation zur Bauzeitanalyse

Wenn das Soll(0)-Bauablaufmodell mit vielen *Vorgangsintervallen*[1558] in mehreren Spuren sowie Intervallebenen vorliegt, kann eine Bauzeitanalyse mit ihren Zeitmessungen zur Bestimmung der Bauzeitverlängerungen umfangreich und unübersichtlich werden. Daher basiert die Soll-zu-Ist-Modifikation auf *einem einzelnen Vorgangsintervall*, das beliebige Teilprojekte des gesamten Bauablaufmodells in *einer* Spur zusammenfasst. Nach dem entwickelten Darstellungskonzept können darin mehrere ineinander verschachtelte Vorgangsintervalle mit ihren jeweiligen Spuren enthalten sein. Dafür muss der Anwender ein geeignetes *Gruppenintervall*[1559] ausarbeiten. Darin lassen sich bestimmte Leistungspositionen zusammenfassen und im Zuge der Bauzeitanalyse getrennt voneinander betrachten.[1560] *Abbildung 8-2* zeigt, dass prinzipiell mehrere Gruppenintervalle im Gesamtprojekt verteilt sein können.

[1552] Siehe *Kapitel 5.1.3*.
[1553] Siehe *Kapitel 4.5.2*.
[1554] Siehe *Kapitel 3.3.1* i. V. m. *Kapitel 4.4.4*.
[1555] Siehe *Kapitel 3.2.1*.
[1556] Siehe *Kapitel 6.2.5*.
[1557] Siehe *Kapitel 5.2.4*.
[1558] Siehe *Kapitel 5.1.3*.
[1559] Siehe *Kapitel 5.1.4*.
[1560] Siehe *Kapitel 6.2.4*.

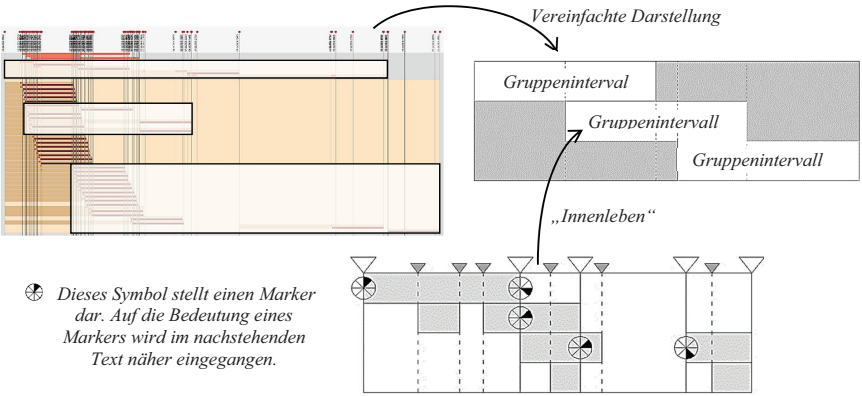


Abbildung 8-2: Qualitativ zusammengefasste Untersuchungsfälle in Gruppenintervallen[1561]

Alle nebenläufigen Gruppenintervalle müssen während der Bauzeitanalyse *gleichsam* berücksichtigt werden, da sie sich aufgrund der Simulation gegenseitig bedingen können.[1562] Zur besseren Übersicht wird im weiteren Text die Soll-zu-Ist-Modifikation lediglich an *einem* Gruppenintervall beschrieben.

Für die angestrebten Zeitmessungen muss es möglich sein, über ein Gruppenintervall auf alle internen Vorgangsintervalle – auch in den gem. *Kapitel 5.1.4* ausgeblendeten Intervallebenen – zurückgreifen zu können. Zur Durchführung der Soll-zu-Ist-Modifikation ist sogleich ein Zugriff auf *Soll-Anhaltspunkte*[1563] erforderlich. Wegen der Übersichtlichkeit beschränkt sich dieser Zugriff nur auf bestimmte Soll-Anhaltspunkte der internen Vorgangsintervalle, und zwar auf diejenigen, die für die Zeitmessungen *qualifiziert* sind. Dazu gehören der Beginn sowie das Ende des Soll-Bauablaufmodells und alle Soll-Anhaltspunkte, die *belegbare Leistungsstände des Ist-Bauablaufs*[1564] nachbilden – Lösungsansätze der Simulation sind in *Kapitel 6.3.4* enthalten. Auch markante Soll-Anhaltspunkte mit vertragsrechtlicher Bedeutung lassen sich als ***qualifizierte Anhaltspunkte*** erheben. Alle anderen Soll-Anhaltspunkte spielen in den reinen Zeitmessungen eine eher geringfügige Rolle und sind dementsprechend *nicht qualifiziert*.

[1561] Eigene Darstellung.
[1562] Siehe *Kapitel 6.3.7*.
[1563] Siehe *Kapitel 4.5*.
[1564] Siehe *Kapitel 4.5*.

Tabelle 8-1: Gegenüberstellung eines Soll-Bauablaufs in unterschiedlichen Intervallebenen[1565]

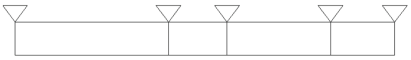
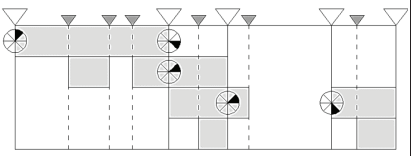
(a) Prinzip der qualifizierten Soll-Anhaltspunkte ohne Marker, dargestellt als Gruppenintervall	(b) Prinzip aller Soll-Anhaltspunkte mit Marker, dargestellt in zwei Hierarchiestufen
	

Tabelle 8-1 enthält ein beispielhaftes Soll-Bauablaufmodell in zwei Darstellungsvarianten. In der linken Spalte (a) der Tabelle ist ein einspuriges Gruppenintervall als Soll-Bauablaufmodell abgebildet. Es besitzt einen weißen Hintergrund und wird durch vier aufeinander folgende Segmente unterteilt. Die Unterteilung ergibt sich durch fünf qualifizierte Soll-Anhaltspunkte, die in der der Darstellung (a) als etwas *größere weiße Dreiecke* eingezeichnet sind. In der rechten Spalte (b) der *Tabelle 8-1* ist *dasselbe* Gruppenintervall in einer „geöffneten" Darstellungsvariante zu sehen. Anders als in der Spalte (a) sind in der Spalte (b) die internen Vorgangsintervalle bis zur zweiten Intervallebene eingeblendet.[1566] In der eingezeichneten Abbildung der Spalte (b) werden sie durch *graue Segmente* dargestellt. Zudem lassen sich in der rechten Darstellungsvariante alle *qualifizierten Soll-Anhaltspunkte* sowie alle *nicht qualifizierten Soll-Anhaltspunkte* erkennen. Die *nicht qualifizierten Soll-Anhaltspunkte* werden hingegen als etwas *kleinere graue Dreiecke* abgebildet. Darüber hinaus sind in der Spalte (b) der *Tabelle 8-1* sog. ***Marker*** zu sehen (symbolisiert durch vergleichbare Zeichen: ⌖).

Marker dienen zur Fortschreibung des Soll-Bauablaufmodells. Mit ihnen wird die notwendige Orientierung am Ist-Bauablauf erreicht. Für diesen Zweck sind vorerst terminfixierte Ist-Anhaltspunkte im Sinne des *Kapitels 4.5* auszuarbeiten. Diese Ist-Anhaltspunkte enthalten Dokumente, die im Verlauf der Projektdurchführung terminlich festgehalten oder als Vertragsbestandteile vereinbart wurden. Das Zuordnungsprinzip wird in *Abbildung 8-3* skizziert. Hier werden *termingemäße* Textzeilen aus einem Papierdokument und einem Foto entnommen und als *charakteristische Ist-Informationen* einem *Ist-Anhaltspunkt* (schwarzes Dreieck) zugewiesen.

Zur Fortschreibung des Soll-Bauablaufmodells müssen die Marker charakteristische Ist-Informationen eines *vergleichbaren Referenzzustands*[1567] abbilden können. *Erst* wenn

- eine *charakteristische Ist-Information* eines Dokuments *inhaltlich*
- mit einem *Leistungsstand* des Soll-Bauablaufmodells *adäquat übereinstimmt*,

wird der Marker an entsprechender Stelle *in* das Soll-Bauablaufmodell manuell *platziert*. Diese Platzierung erzeugt einen neuen *qualifizierten Soll-Anhaltspunkt*, falls dieser nicht mit

[1565] Eigene Darstellung.
[1566] Da in der rechten Abbildung der *Tabelle 8-1* die internen Vorgangsintervalle unterbrochen sind, ist davon auszugehen, dass diese die kleinsten Vorgangsintervalle sind. Generell ist die Einteilung in zwei Intervallebenen *keine* zwingende Voraussetzung für die Durchführung der Soll-zu-Ist-Modifikation. Theoretisch sind im Soll-Bauablaufmodell mehrere Intervallebenen vorhanden.
[1567] Siehe *Kapitel 8.2.1*.

einem anderen, bereits existierenden Anhaltspunkt *zeitlich zusammenliegt*[1568]. Obwohl die Einarbeitung der Marker in das Soll-Bauablaufmodell vorgenommen wird, gilt es zu beachten, dass die oben genannten Ist-Informationen *nicht* in qualifizierten Soll-Anhaltspunkten, sondern in termindiskreten Ist-Anhaltspunkten hinterlegt sind.

Der Anwender darf mehrere Marker für einen Ist-Anhaltspunkt erstellen, sobald die dort abgelegten Dokumente mehrere potentielle Leistungsstände als charakteristische Ist-Informationen beschreiben. Theoretisch besteht daher eine unbegrenzte Anzahl möglicher Marker *für einen* Ist-Anhaltspunkt. Ebenso uneingeschränkt kann die Anzahl der terminabhängigen Ist-Anhaltspunkte sein.

Neben der Vielzahl möglicher Kombinationen können die im Soll-Bauablaufmodell platzierten Marker terminlich von ihren Ist-Anhaltspunkten abweichen. Zur besseren Übersicht werden die *Assoziationen* zwischen den Markern und den Ist-Anhaltspunkten unverwechselbar gekennzeichnet. Dies erfolgt über die *chronologische Anordnung* der Ist-Anhaltspunkte. Alle zusammengehörigen Ist-Anhaltspunkte und Marker erhalten einen identischen Kreissektor {◔}.[1569] Der Kreissektor lässt sich in eine Position drehen, die auf den konkreten Termin eines bestimmten Ist-Anhaltspunkts hindeutet. Die Drehrichtung erfolgt im Uhrzeigersinn und wird schrittweise in Anlehnung an die aufeinander folgenden Ist-Anhaltspunkte fortgesetzt, z. B.: {(*1. Termin*, ◔) → (*2. Termin*, ◔) → (*3. Termin*, ◔) → (*4. Termin*, ◔)}. Die Einteilung durch die Kreissektoren ist von der Anzahl der vorhandenen Ist-Anhaltspunkte abhängig.

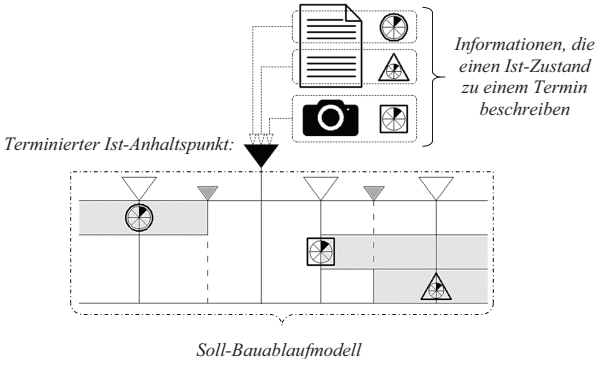


Abbildung 8-3: Prinzip der referenzierenden Marker[1570]

Gelegentlich können Marker *nicht* platziert werden, da die referenzierten Ist-Informationen als Zustandsbeschreibungen im Soll-Bauablaufmodell (noch) fehlen. In solchen Fällen sollten die Marker trotzdem in den Ist-Anhaltspunkten hinterlegt werden, da sich der *vergleichbare*

[1568] Siehe *Kapitel 5.1.3*.
[1569] Diese Maßnahme ist bei einer *manuellen* Herangehensweise zu empfehlen. Bei einer Softwareanwendung kann sie durchaus „eleganter gelöst" werden, z. B. durch verlinkende Schaltflächen. Grundsätzlich ist jede andere eindeutige Kennzeichnungsvariante zulässig.
[1570] Eigene Darstellung.

Referenzzustand durch die Fortschreibung des Soll-Bauablaufmodells für eine geeignete Platzierung einstellen kann.

Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation wird infolge einer Störungsmodifizierung das Soll-Bauablaufmodell fortgeschrieben und sukzessive zu einem Ist-Bauablaufmodell „umgewandelt".[1571] Dazu müssen die Marker, die bei einer bauzeitlichen Abweichung terminlich auseinanderliegen, zeitlich mit den Terminen der assoziierten Ist-Anhaltspunkte zusammengebracht werden. Da die Marker durch die Platzierung nur an den internen Vorgangsintervallen des Soll-Bauablaufmodells „angeheftet"[1572] sind, lassen sie sich mit den simulierten Produktionsprozessen *zeitlich verschieben*.

Um dies zu erreichen, erfolgt die Störungsmodifizierung im Rahmen von Simulationsexperimenten, in denen neue Parametereinstellungen oder anderweitige Modellerweiterungen bzw. -reduzierungen vorzunehmen sind. Das Prinzip entspricht dem in *Kapitel 2.1.4* erläuterten Würfelbeispiel zur Schaffung einer *gewollten Ordnung*. Im Gegensatz zum Würfelbeispiel kann die Modifizierung eines Bauablaufmodells über die in *Kapitel 5.2.6* und *Kapitel 5.2.7* definierten *faktoriellen Gewichtungsvariablen* deutlich umfangreicher ausfallen.[1573] Entsprechend verändern sich die zeitlichen Lagen oder Dauern der betroffenen Vorgangsintervalle mit ihren angehefteten Markern.

Der *simulierte Leistungsstand* eines Gruppenintervalls ist dann *verifiziert*, wenn alle Marker *zeitlich annähernd genau*[1574] mit ihren referenzierten Ist-Anhaltspunkten zusammenliegen. Dieses Verfahren wird als ***Stützstellenverifizierung***[1575] bezeichnet.

Aufbauend auf *Abbildung 4-8* wird in *Abbildung 8-4* das Prinzip einer Stützstellenverifizierung veranschaulicht. Dargestellt ist das simulierte Bauablaufmodell *vor* und *nach* der Stützstellenverifizierung in Form eines geöffneten Gruppenintervalls. Rote Pfeile zeigen die Verschiebungsrichtungen der im Soll-Bauablaufmodell platzierten Marker an. Da die *qualifizierten Anhaltspunkte* (weiße Dreiecke) durch die Marker zustande kommen, bewegen sie sich entsprechend mit.

[1571] Siehe Prinzip nach *Drittler* in *Kapitel 4.4.9*.

[1572] Auf Simulator-Ebene ist dies mit einer *GermCell* gem. *Kapitel 6.3.9* für eine *einfache leistungsdiskrete Modifikation* gem. *Kapitel 5.2.8* zu realisieren.

[1573] Siehe Testläufe in *Kapitel 7*.

[1574] „Zeitlich annähernd genau" meint das zeitdiskrete bzw. terminliche Korrelieren simulierter Soll- und Ist-Modellzustände (siehe neben *Abbildung 8-4* auch *Kapitel 2.1.6*, *Kapitel 4.5* und *Kapitel 4.6*). Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation werden beide Modellzustände durch Soll- und Ist-Anhaltspunkte abgebildet. Wobei „annähernd genau" auf die Genauigkeit des Vergleichs abzielt, der niemals absolut exakt erfolgen kann (siehe *Kapitel 2.2.5* und besonders *Kapitel 4.5*). Dies ist aber ein grundsätzliches Problem retroperspektivischer Analysen über komplexe Systeme mithilfe von Soll-Ist-Vergleichen; ganz gleich, ob die Systemanalyse per Soll-zu-Ist-Modifikation oder per Gegenüberstellung von Vorgangsbalken stattfindet. Somit ist immer das Erkennen einer „objektiven Ordnung" notwendig, die auf das Vorliegen einer „idealen Ordnung" gem. *Kapitel 2.1.4* hindeutet. Hierfür bedarf es der Definition einer quantitativen Größe, die eine zulässige Abweichung (= Toleranz) festlegt. Alle Werte innerhalb dieser Toleranz sind „annähernd genau". Zum Beispiel basieren auch die Auslegungsregeln gem. §§ 187, 188 BGB auf solchen Überlegungen (siehe *Kapitel 3.3.2*). Diese Regeln zielen aber auf eine bestimmte Bewertungsaufgabe ab – nämlich die (juristische) Subsumierung. Aus baubetrieblicher Sicht wäre es jedoch sinnvoll, wenn die zeitlichen Toleranzen enger gefasst sind, da kleine Änderungen große Auswirkungen verursachen können (siehe *Kapitel 5.1.3* und *Kapitel 7.1.8*). *Kapitel 8.3* befasst sich ebenso mit diesem Thema, wobei der Fokus auf die Wahl geeigneter Gewichtungsfaktoren gerichtet ist.

[1575] Die Bezeichnung wurde i. A. a. *Ailland* gewählt. Vgl. Ailland, 2013: Dissertation (siehe *Kapitel 2.4.7*).

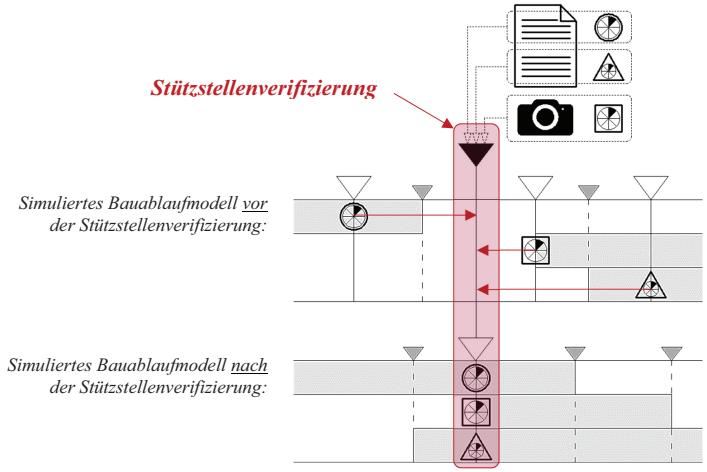


Abbildung 8-4: Prinzip einer einzelnen Stützstellenverifizierung[1576]

8.2.4 Fortschreibungsprinzip

Nachdem im vorausgegangenen Unterkapitel die Stützstellenverifizierung schematisch erläutert wurde, folgt im weiteren Text eine beispielhafte Darstellung, wie dieses Prinzip zur Fortschreibung des Soll-Bauablaufmodells genutzt werden kann. Entsprechend enthält der weitere Text Beispiele der in *Kapitel 8.2.1* genannten Punkte *2.a-h)*, bei denen das Fortschreibungsprinzip der Soll-zu-Ist-Modifikation im Vordergrund steht. Die Erläuterung findet dazu über die Darstellung eines Gruppenintervalls statt.

Zur Fortschreibung sind Modellierungsaufgaben vorzunehmen, um sachverhaltsbezogene Zeitabweichungen nachzubilden. Unter Zuhilfenahme des Simulators muss jeder dieser Eingriffe am Simulationsmodell anhand der Simulationsergebnisse hinreichend analysiert werden. Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation finden diese Aufgaben in sukzessiven ***Einzelfallbetrachtungen*** statt, die jeweils *mindestens* eine vorausgegangene Stützstellenverifizierung erfordern. Der Anwender *kann* für jede Modifikation eine ***Modellversion*** anlegen und hierüber getätigte *Konfigurationen* des Simulationsmodells sicherstellen. Während der Nachweisführung werden mit diesen Modellversionen Bauablaufmodelle simuliert und als Gruppenintervalle[1577] dargestellt.

Die Fortschreibung geschieht durch aufeinander aufbauende Modellversionen. Jeder Entwicklungsschritt ist als eigenständige Modellversion zu speichern. Diese kann *danach* kopiert und als neue Modellversion für darauf aufbauende Weiterentwicklungen zugrunde gelegt werden.[1578] Eine derartige Vorgehensweise erspart eine andauernde Modellierung für ein gesamtes und von Grund auf neu zu erstellendes Simulationsmodell.

[1576] Eigene Darstellung.
[1577] Siehe *Kapitel 5.1.4*.
[1578] Petri-Netze gestatten, aufgrund ihrer persistenten Eigenschaften, das Speichern und Kopieren ganzer Simulationsmodelle – einschließlich ihrer Konfigurationen (siehe *Kapitel 2.3.4* und *Kapitel 6.1*).

Beispiel des Fortschreibungsprinzips:

Zunächst sind *stichpunktartige* Ist-Anhaltspunkte des Ist-Bauablaufs auszuarbeiten. Dazu muss bekannt sein, wann ein bestimmter Sachverhalt stattfand. Beispielsweise können gem. § 6 Abs. 1 VOB/B der Beginn einer Behinderung und deren Wegfall nach § 6 Abs. 3 VOB/B als „Stichpunkte" definiert werden. Laut *Abbildung 8-5* sind entsprechende Angaben im *zweiten* und *dritten* Ist-Anhaltspunkt hinterlegt. Um die Behinderungsdauer zu verdeutlichen, wird sie innerhalb der Abbildung als Pfeil dargestellt, der sich zwischen den beiden Ist-Anhaltspunkten befindet und in die Bauzeitrichtung zeigt. Das in der Abbildung enthaltene Soll(0)-Bauablaufmodell unterliegt der Annahme, dass es sich um ein Simulationsergebnis der *1. Modellversion* handelt, das vertragsgemäße Bauleistungen zeitlich einhält.[1579] Es wird als (geöffnetes) Gruppenintervall dargestellt.

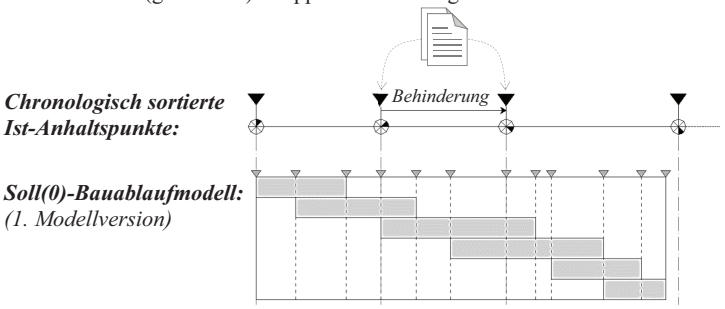


Abbildung 8-5: Gegenüberstellung der Ist-Anhaltspunkte mit dem Soll(0)-Bauablaufmodell[1580]

Die mit Ist-Anhaltspunkten assoziierten Marker werden anschließend in das simulierte Soll(0)-Bauablaufmodell platziert, woraufhin das Gruppenintervall *qualifizierte Soll-Anhaltspunkte* ausprägt (siehe Abbildung *8-6*).[1581] Dadurch sind die Voraussetzungen zur Fortschreibung des Soll(0)-Bauablaufmodells gegeben.

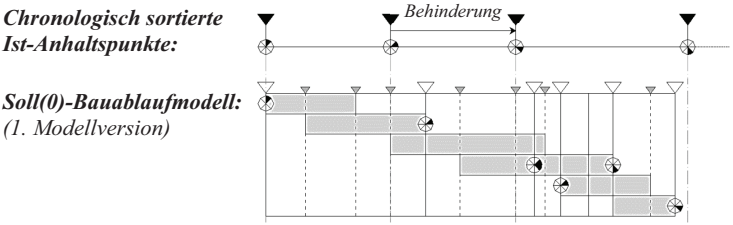


Abbildung 8-6: Einarbeitung der Marker in das Soll(0)-Bauablaufmodell[1582]

Sobald die Einarbeitung der Marker abgeschlossen ist, kann mit der ersten *Einzelfallbetrachtung* begonnen werden. Sie startet mit einer *Stützstellenverifizierung*[1583] am frühesten Ist-Anhaltspunkt. Erst nach einer erschöpfenden Bauzeitanalyse hat die nächste Einzelfallbetrachtung am darauf folgenden Ist-Anhaltspunkt stattzufinden. Mit dieser

[1579] Siehe *Kapitel 8.2.2*. Der Übersicht halber bleiben im Beispiel mögliche Vertragstermine außen vor.
[1580] Eigene Darstellung.
[1581] Siehe *Kapitel 8.2.3*.
[1582] Eigene Darstellung.
[1583] Siehe *Kapitel 8.2.2*.

Vorgehensweise lässt sich die in *Kapitel 4.5* definierte *Approximation* zwischen den Anhaltspunkten erreichen. Entsprechend ihrer chronologischen Terminreihenfolge sind an allen verbleibenden Ist-Anhaltspunkten weitere Untersuchungen durchzuführen.

Während dieser Maßnahmen erfolgt eine sukzessive *Rekonstruktion* für den linksseitigen ***Ist-Anteil*** des simulierten Bauablaufmodells, der sich dadurch inhaltlich dem Ist-Bauablauf annähert (siehe *Abbildung 8-7*). Dieser Ist-Anteil weitet sich pro Einzelfallbetrachtung immer weiter bis zum letzten Ist-Anhaltspunkt aus. Während dieser Fortschreibung verbleibt rechtsseitig fortwährend ein ***Soll-Anteil***, der vom linksseitigen Ist-Anteil infolge der weiterentwickelten Modellversionen allmählich „aufgezehrt" wird. Der vorausgehende Ist-Anteil wirkt auf den verbleibenden Soll-Anteil ein und kann auf diese Weise die zeitliche Gesamtdarstellung des Gruppenintervalls verändern. Schon nach der ersten Stützstellenverifizierung bilden die Simulationsergebnisse ein *störungsmodifiziertes* Soll-Bauablaufmodell. Darum werden bei der Soll-zu-Ist-Modifikation die entsprechenden Gruppenintervalle als ***Modifizierte-Bauablaufmodelle*** bezeichnet (siehe *Abbildung 8-7*).

Durch die Kopplung der modellierten Bauablaufanteile sind in den Einzelfallbetrachtungen terminweise Momentaufnahmen möglich, die in Abhängigkeit zu den verifizierten Ist-Anhaltspunkten stehen. Diese Momentaufnahmen lassen sich mit dem realen Bauen vergleichen. So ist zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Teil der Bauleistung erledigt, während der andere Teil noch bevorsteht. Es ist anzunehmen, dass für die Darstellung eines voranschreitenden Bauablaufs erst dann der Lebenssachverhalt konkretisiert wird, wenn eine derartige Kopplung zwischen Soll- und Ist-Bauablaufanteilen gelungen ist. Eine Aufhebung dieser Kopplung, wie sie etwa durch die Gegenüberstellung zweier unabhängiger oder punktuell verknüpfter Bauzeitstränge zustande kommt, widerspricht einer system-theoretischen Wirklichkeitsbetrachtung im erheblichem Maße. Um aber zeitparallele und aufeinander folgende Störungssachverhalte baubetrieblich bewerten zu können, sollten zeitliche Teilstücke modelliert werden, bei denen die Soll- und Ist-Anteile so weit wie möglich voneinander getrennt sind.

Das Fortschreibungsprinzip hat hinsichtlich der Einzelfallbetrachtungen den Vorteil, dass durch die sukzessive Orientierung an den Ist-Anhaltspunkten ein Zugriff auf die dort hinterlegten Dokumente stattfinden kann. Dieser Ansatz erlaubt ständige Korrektheits-prüfungen der einzelnen Modellversionen und begünstigt Analysen vertragsrechtlicher Ausgangslagen. Somit lässt sich terminbezogen nachvollziehen, wann was bekannt war und von welchen Annahmen die beiden Vertragsparteien jeweils ausgehen konnten.

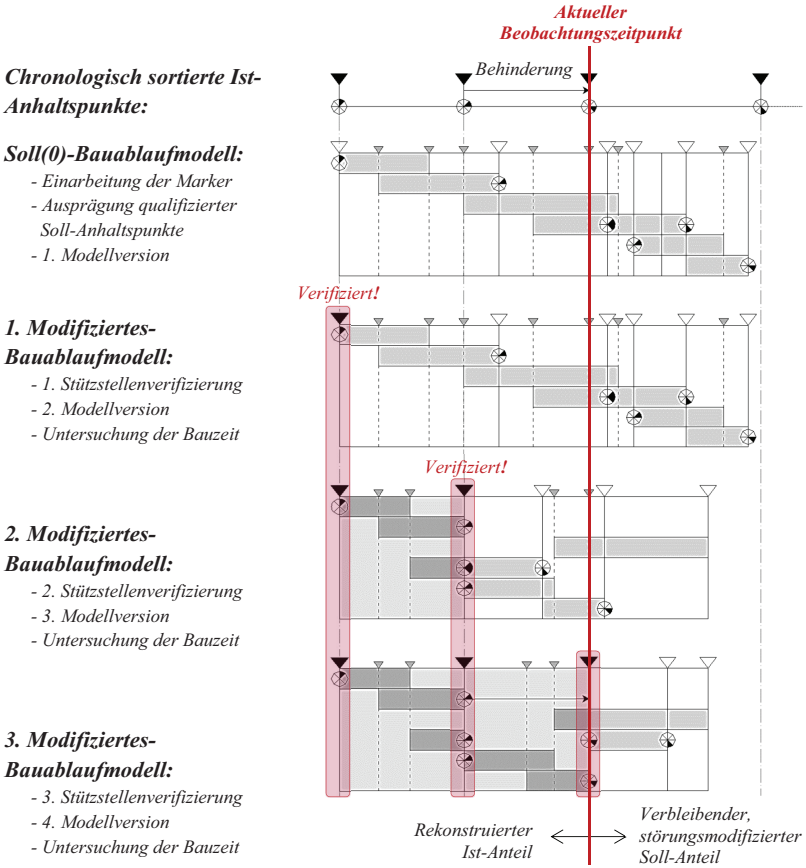


Abbildung 8-7: Prinzip der Soll-zu-Ist-Modifikation anhand der Stützstellenverifizierungen[1584]

In der Grafik der *Abbildung 8-7* wird eine „aktuelle" Stützstellenverifizierung am *3. Ist-Anhaltspunkt* gezeigt, die im Rahmen einer *momentanen Beobachtung* während einer Einzelfallbetrachtung stattfindet. Um überhaupt am *3. Ist-Anhaltspunkt* eine Stützstellenverifizierung durchführen zu können, muss der gesamte vorausgegangene Ist-Anteil in einer möglichst realisierbaren Form vorliegen. Beim verbleibenden störungsmodifizierten Soll-Anteil ist hingegen zu erwägen, inwieweit die Modifizierungen den kritischen Endtermin des Gruppenintervalls beeinflussen.

Bei diesen Erwägungen sind zu allen Einzelfallbetrachtungen die Möglichkeiten der Wiederaufnahme- und Weiterführungspflicht i. S. v. § 6 Abs. 3 VOB/B oder die zu gewährenden Vorlaufzeiten gem. § 6 Abs. 4 VOB/B für das jeweilige *Modifizierte-*

[1584] Eigene Darstellung.

Bauablaufmodell zu berücksichtigen.[1585] Gegebenenfalls ist der verbleibende Soll-Anteil an die aktuelle Vertragssituation anzupassen und auf diese Weise fortzuschreiben.

Da sich durch die bloße zeitliche Verschiebung der Marker keine Aussage über die *Plausibilität* und *Machbarkeit* der modellierten Produktionsprozesse gewinnen lässt, kann infolge einer alleinigen Stützstellenverifizierung noch nicht davon ausgegangen werden, dass am Ende ein Gesamtbauablauf inhaltlich angemessen rekonstruiert wurde.[1586] Daher muss der Anwender in den Einzelfallbetrachtungen neben einer Stützstellenverifizierung außerdem noch eine objektive ***Stützstellenvalidierung*** für den rekonstruierten Ist-Anteil *und* den darauf folgenden Soll-Anteil vornehmen.

Die Stützstellenvalidierung umfasst – neben der Prüfung der zeitlichen Darstellung vom Bauablaufmodell – die Analyse getätigter Modifizierungen der Modellversionen. Dafür müssen neben dem *strukturellen Modellaufbau* auch die in den Modellversionen getätigten *Parametereinstellungen*[1587] *inhaltlich geprüft* werden.[1588]

Während der experimentellen Eingriffe soll der Anwender insbesondere zum Überprüfen und Überdenken seiner Handlungsweisen angeregt werden.[1589] Je nach Erkenntnis kann er seine Konfigurationen als neue Modellversion festlegen oder überarbeiten. Falls jedoch überhaupt kein passables Ergebnis zustande kommt, kann er Aussagen über die *Nichtplausibilität* und/oder *Nichtmachbarkeit* treffen (siehe *These 2* und *These 3* des *Kapitels 4.5*). Für die gutachterliche Tätigkeit ist die Stützstellenvalidierung hilfreich, um eindeutiger zwischen Verursacheranteilen differenzieren und argumentieren zu können.[1590] Solche Validitäts-prüfungen betreffen das Benchmarking, das in *Kapitel 8.3* erläutert wird.

In den Einzelfallbetrachtungen können sich die zeitlichen Lagen der in den Gruppenintervallen enthaltenen Vorgangsintervalle ändern. Dadurch ist eine zeitliche Verschiebung der *kritischen Endtermine* möglich. Zur Messung der gesamtzeitlichen Abweichung werden die schrittweise simulierten Gruppenintervalle untereinander angeordnet und gegenübergestellt. *Abbildung 8-8* enthält die Gegenüberstellung zwischen dem *3. Modifizierten-Bauablaufmodell* und dem *4. Modifizierten-Bauablaufmodell*.

[1585] Siehe *Kapitel 4.2.5*.
[1586] Siehe *Kapitel 2.2.5* i. V. m. *Kapitel 4.5*.
[1587] Die Parametereingaben finden über die *faktoriellen Gewichtungsvariablen* gem. *Kapitel 5.2.6* und *Kapitel 5.2.7* statt.
[1588] Näheres folgt in *Kapitel 8.3*.
[1589] Siehe *Kapitel 4.5.1* (u. a. auch *Kapitel 7.3.3*).
[1590] Siehe *Kapitel 4.4.6*.

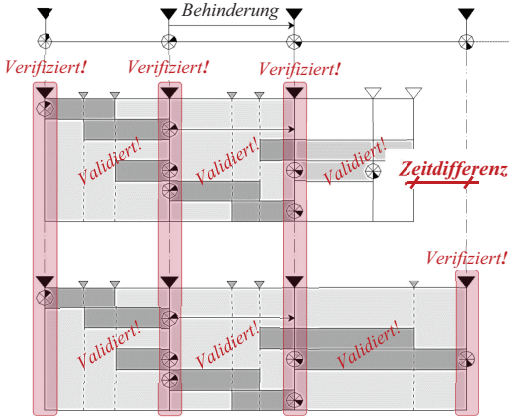


Abbildung 8-8: Gegenüberstellung zweier Modellversionen zur Messung der Zeitwirkung[1591]

Da bei komplexen Bauabläufen die strikte Trennung zwischen aufeinander folgenden Bauablaufstörungen kaum möglich ist,[1592] wird bei der Soll-zu-Ist-Modifikation vorausgesetzt, dass die Bauzeitanalyse erst nach der Rekonstruktion der letzten Modellversion – also bis zum spätesten Ist-Anhaltspunkt – abschließend verifiziert und validiert wurde. Mit dieser Vorgehensweise können die ineinander übergehenden Zeitwirkungen hinreichend voneinander abgegrenzt werden.[1593]

[1591] Eigene Darstellung.
[1592] Siehe *Kapitel 4.5.2*.
[1593] Siehe *Kapitel 8.2.6 ff.*

8.2.5 Inhalt einer momentanen Einzelfallbetrachtung

Zu einer momentanen Einzelfallbetrachtung muss besonders das Ineinandergreifen der *Produktionsfaktoren und -bedingungen*[1594] im Rahmen eines Simulationsexperiments berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen am Bauablaufmodell darzustellen, sind Modifizierungen am Simulationsmodell vorzunehmen. Die damit verbundenen Herausforderungen werden nachfolgend anhand der *Abbildung 8-9* konzeptionell beschrieben. Sie ist dafür in *zwei untereinander angeordnete Bereiche* gegliedert.

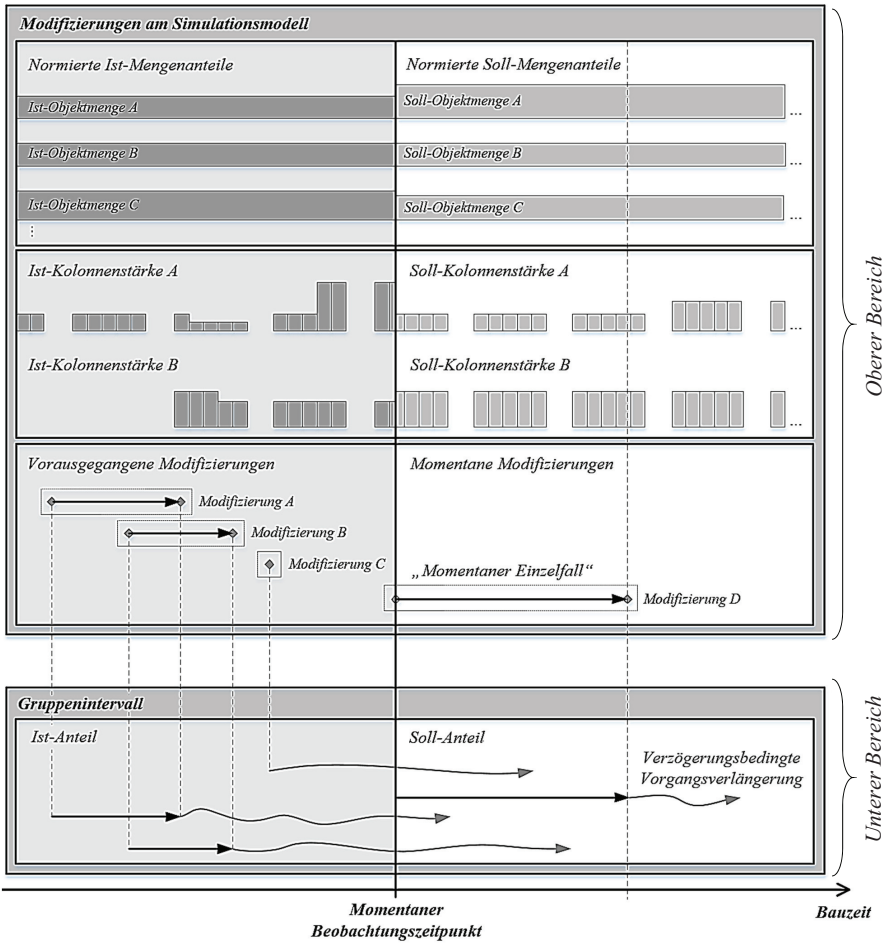


Abbildung 8-9: Konzeptionelle Darstellung einer Einzelfallbetrachtung[1595]

Im *oberen* Bereich werden die *Modifizierungen am Simulationsmodell* schematisch abgebildet. Darin sind zuerst die ***normierten Mengenanteile*** über die simulierte Bauzeit zu

[1594] In Anlehnung an *Kapitel 3.2.1.*
[1595] Eigene Darstellung.

sehen. Ebenso wird in dem Bereich ein Feld für den Kapazitätseinsatz der geplanten und der tatsächlich vorhandenen ***Kolonnenstärken*** über die Bauzeit illustriert. Ein weiteres Feld im oberen Bereich der Abbildung enthält ***spezielle Modifizierungen***, dargestellt durch Pfeile und Rauten.[1596] Sie versinnbildlichen anderweitige baubetriebliche Modifizierungen für zusätzliche Modellerweiterungen bzw. -reduzierungen und/oder modifizierende Parametereingaben, z. B. blockierte Flächen, veränderte Starttermine, neue Ausführungsprozesse oder gezielte Abänderungen der Produktivitäten.

Im *unteren* Bereich der Abbildung ist das simulierte Bauablaufmodell als Gruppenintervall enthalten, das die Simulationsergebnisse über die simulierte Bauzeit darstellt. Die Einzelfallbetrachtung findet ab dem momentanen Beobachtungszeitpunkt statt. Davor ist der bisher rekonstruierte Ist-Anteil des Gruppenintervalls abgebildet. An diesen schließt der verbleibende Soll-Anteil an, der durch die vorausgegangenen Modifizierungen bedingt wird. Um die Störungsmodifizierung innerhalb der Modellversion hervorzuheben, sind im gesamten Gruppenintervall die verzögerungsbedingten Vorgangsverlängerungen in Anlehnung an *Abbildung 4-15*[1597] zu sehen. Sie stellen sich als geschwungene Pfeile dar, die unterschiedlich intensiv in den Soll-Anteil einwirken.

Im Folgenden wird auf die drei einzelnen Felder des *oberen* Bereichs der *Abbildung 8-9* näher eingegangen.

Normierte Mengenanteile:

Die in *Abbildung 8-9* skizzierten *normierten Soll- und Ist-Mengenanteile*[1598] stammen aus dem Bauwerksmodell und zeichnen sich durch objektbezogene Mengenanteile aus. Grundsätzlich sind sie *konstante* Größen, die je nach Situation in den Simulationsberechnungen berücksichtigt werden. Aus systemtheoretischer Sicht besitzen sie selbst kein dynamisches Verhalten. Dennoch bedingen sie die Produktivitäten und die Dauern der simulierten Ausführungsprozesse über die Höhe ihrer Betragswerte. Während der Bauzeit stellen sie sich als konstante Funktion dar.

Sobald die Betragswerte der normierten Soll- und Ist-Mengenanteile voneinander abweichen, kann ein Funktionssprung in Abhängigkeit von der gewählten *Fortschreibungsvariante* an der Stelle des momentanen Beobachtungszeitpunkts auftreten (siehe *Abbildung 8-9*). Für eine *sukzessive Fortschreibungsvariante*[1599] der normierten Mengenanteile lässt sich der „sprunghafte" Wechsel durch das Schalten einer *Modifizier-Transition* gem. *Kapitel 6.3.5 automatisieren*.

Ein entsprechender Automatismus kann dazu beitragen, dass während der Einzelfallbetrachtungen keine *manuellen* Korrekturen der maßgeblichen Mengenanteile stattfinden. Von den Mengenzuweisungen sind alle *Teilprozesse* betroffen, die bedingt durch die experimentellen Eingriffe am Simulationsmodell ihre zeitliche Lage zwischen den Ist- und Soll-Anteilen wechseln oder den momentanen Beobachtungszeitpunkt überlappen. Hierfür

[1596] In Anlehnung an *Kapitel 5.2.8.*
[1597] Siehe *Kapitel 4.5.2.*
[1598] Siehe *Kapitel 5.2.3.*
[1599] Für die Zeitmessung von Mengenänderungen ist zu unterschieden zwischen einer *sukzessiven* und einer *gesamtbauzeitlichen Fortschreibungsvariante.*

können mehrere umfangreiche Prüfungen und Anpassungen notwendig sein, damit ein Teilvorgang die „richtige“ Soll- oder Ist-Menge zur Vorgangsberechnung erhält.

Diese Aufgabe lässt sich über das Petri-Netz automatisieren, indem eine *DateTransition*[1600] den Termin des momentanen Beobachtungszeitpunkts erhält und mit einer spezialisierten *Schalter-Transition*[1601] gekoppelt wird. Zum Zeitpunkt des Schaltens müssen die Transitionen dafür sorgen, dass nicht mehr die Betragswerte der normierten Ist-Mengen, sondern die Betragswerte der normierten Soll-Mengen zur Berechnung der jeweiligen Ausführungsdauer maßgeblich sind. In einer Softwareanwendung kann der Termin zum Schalten durch eine *Timeline*[1602] infolge einer benutzergesteuerten Eingabe vorgegeben werden. Der Anwender setzt diese beliebig auf der Zeitachse ab und legt somit den Termin des momentanen Beobachtungszeitpunkts fest. Dieser dient der Erstellung der *DateTransition*.

Damit ein derartiger Automatismus greift, müssen die normierten Objektmengen *vor* der Ausführung der Simulationsläufe in den Bauteilmodellen vorhanden sein.

Kolonnenstärken:

Der oben beschriebene Automatismus lässt sich analog auf den sprunghaften Wechsel zwischen Ist- und Soll-Kapazitäten übertragen. Denn auch hinsichtlich der geplanten und der tatsächlich eingesetzten Kapazitäten ist ein Funktionssprung zum momentanen Beobachtungszeitpunkt möglich. Anders als die normierten Mengenanteile werden die Kapazitäten in *Abbildung 8-9* blockartig pro Werktag dargestellt. Aufgrund arbeitsfreier Tage sind die Werktage nicht ausschließlich aneinandergereiht und weisen daher Lücken auf. Die Höhe eines Blocks symbolisiert die Arbeitskraftanzahl je Werktag.

Genau wie bei den *normierten Mengenanteilen* hat der Anwender vorab Angaben für den geplanten und den tatsächlichen Kapazitätseinsatz einzugeben. Eine *DateTransition* und *Schalter-Transition* kann ebenfalls den sprunghaften Wechsel zwischen Ist- und Soll-Kapazitäten erzielen. Dazu müssen die Arbeitskräfte gem. *Kapitel 6.3.5* auf *einsatzbereit* oder *nicht einsatzbereit* geschaltet werden.

Vorausgegangene Modifizierungen:

Gemäß dem Beispiel in *Kapitel 8.2.4* werden die Dauern der Behinderungssachverhalte durch einen Pfeil dargestellt.[1603] Laut *Abbildung 8-9* überschneidet sich die *Modifizierung A* mit der *Modifizierung B*, so dass beide Sachverhalte teilweise zeitparallel stattfinden. Um die beiden Sachverhalte im Rahmen der sukzessiven Einzelfallbetrachtungen in den Zeitmessungen voneinander abzugrenzen, muss die Reihenfolge der Modifizierungen priorisiert werden. Dies ergibt sich aus dem Startzeitpunkt der beiden Untersuchungsfälle. Erst wenn eine vollständige Einzelfallbetrachtung zur *Modifizierung A* erfolgt ist, findet die weitere Bauzeitanalyse der *Modifizierung B* statt.[1604] Beim Zusammenwirken im Sinne einer *Mehrfachkausalität* sind

[1600] Siehe *Kapitel 6.3.4*.
[1601] Siehe *Kapitel 6.3.5*.
[1602] Siehe *Kapitel 5.1.2*.
[1603] *Kapitel 5.2.8* bietet *vier Modifikationsarten* an, die entweder eine *konstante Dauer* oder eine *dynamische Dauer* besitzen.
[1604] Siehe *Kapitel 8.2.7*.

beide Untersuchungsfälle gleichsam zu modellieren und ggf. durch eine *Quotelung* auseinanderzuhalten.[1605]

Die in der *Abbildung 8-9* gezeigte *Modifizierung C* stellt exemplarisch einen zeitdiskreten Eingriff in das Simulationsmodell dar.[1606] In einem konkreten Anwendungsfall könnte es sich bei einer derartigen Modifizierung um die Inkrementierung oder Dekrementierung eines Zeitaufwandswerts handeln.[1607] Auch eine zeitabhängige Umstellung der Fertigungsrichtung käme hierfür in Frage. Solche Eingriffe sind für das Erreichen einer Stützstellenverifizierung notwendig. In anderen Fällen könnte z. B. die *Modifizierung C* eine zeitdiskrete Erweiterung oder Reduzierung des Soll-Bauablaufmodells darstellen. Hierfür müsste ebenfalls eine *DateTransition* mit einer *Schalter-Transition* spezialisiert werden, die beim Schalten die Struktur des Petri-Netzes anhand bestimmter Kriterien sprunghaft erweitert oder reduziert. Ebenfalls bietet sich die Modellerweiterung durch den Einsatz einer *GermCell*[1608] an.

Mit *speziellen Modifizierungen* sollen projektbezogene und unregelmäßige Sachverhalte modelliert werden. Dies sind bspw. Ursachen für Bauablaufstörungen, die ursprünglich *kein* Bestandteil der Bauablaufplanung waren. Derartige Einzelsachverhalte können unterschiedliche Abhängigkeiten besitzen, die manuell in das Simulationsmodell integriert werden müssen. Ein modellbasierter Automatismus ist höchstwahrscheinlich nur bedingt realisierbar, zumal die baubetrieblichen Untersuchungen mit vertragsrechtlichen Fragestellungen in Einklang zu bringen sind.[1609] Unter diesen Voraussetzungen ist die individuelle Komplexität der Bauabläufe anhand der teilweise unpräzisen und oftmals vielseitigen Dokumentationsweisen zu simulieren und zu analysieren.

Es ist daher anzunehmen, dass selbst computergestützte Bauzeitanalysen *vermutlich*[1610] nur durch menschliche Eingaben und Auswertungen zielführend bewältigt werden können. Hingegen ließen sich „globale“ Ereignisse – die auf Baustellen kontinuierlich vorzufinden sind, wie Licht- oder Wetterbedingungen – mit dem oben beschriebenen Automatismus durch ein sprunghaftes Schalten zwischen Ist- und Soll-Anteilen unterstützen.[1611]

8.2.6 Zeitmessungen durch Zeitvektoren

Zur Unterscheidung der Verursacheranteile sind ***Zeitvektoren*** vom Anwender auszuarbeiten (siehe *Tabelle 8-2* und *Tabelle 8-3*). Ein einzelner Zeitvektor wird als *Pfeil* dargestellt, der sich entweder innerhalb oder außerhalb eines Gruppenintervalls befindet und überwiegend parallel zur Bauzeit ausgerichtet ist. Während der Einzelfallbetrachtungen kann mit einem Zeitvektor die ***Zeitabweichung*** zwischen zwei untereinanderliegenden Bauablaufmodellen

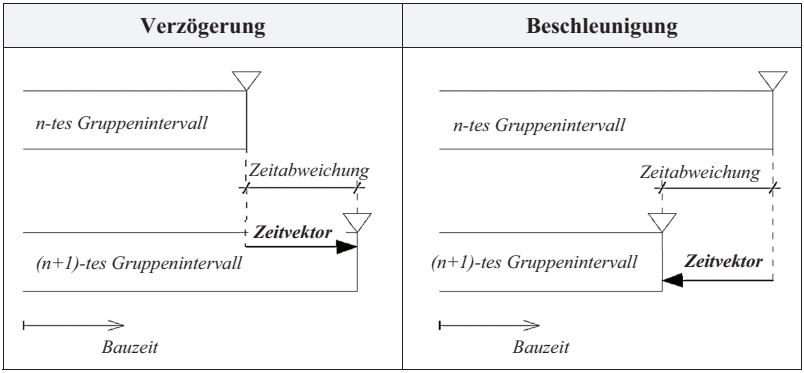
- festgehalten,
- aufgezeigt,
- fortgeschrieben und
- verwaltet werden.

[1605] Siehe *Kapitel 4.4.6*.
[1606] Gemäß *Kapitel 5.2.8* ist dies eine *einfache termindiskrete Modifikation* oder *eine einfache leistungsdiskrete Modifikation*.
[1607] Siehe *Kapitel 7.2.1*.
[1608] Siehe *Kapitel 6.3.9*.
[1609] Siehe *Kapitel 4.6*.
[1610] Im Hinblick auf Algorithmen mit künstlicher Intelligenz wird an dieser Stelle von einer Mutmaßung ausgegangen.
[1611] Siehe *Kapitel 2.4.9*.

Zeitvektoren lassen sich im Sinne einer mathematischen Vektorrechnung für bauzeitliche Änderungen verstehen. Für die Bauzeitanalyse sind die *Zeitbeträge* (bzw. die Vektorlängen) und die *Vektorrichtungen* relevant.

Die Länge eines Zeitvektors gibt den *Zeitbetrag* einer gemessenen Zeitdifferenz wieder. Die Zeitabweichung ist über die *kritischen Endtermine* zweier gegenübergestellter Bauablaufmodelle zu entnehmen. Der Startpunkt des Zeitvektors knüpft immer am kritischen Endtermin des vorausgegangenen Gruppenintervalls an und richtet sich am kritischen Endtermin des darauf folgenden Gruppenintervalls aus (siehe Abbildungen in der *Tabelle 8-2*). Die Visualisierung des Zeitbetrags erfolgt im Darstellungskonzept über die Pfeillänge des Zeitvektors, die proportional zur Bauzeit abgebildet wird.

Tabelle 8-2: Zeitvektorielle Darstellung einer Verzögerung und Beschleunigung[1612]

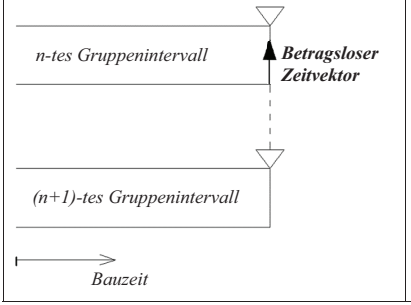
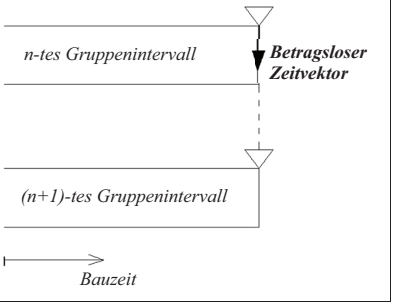


Anhand der Vektorrichtung kann unterschieden werden, ob die gemessene Zeitabweichung eine Verzögerung oder eine Beschleunigung darstellt. Dazu gibt ein Zeitvektor, der in die Bauzeitrichtung zeigt, eine *Verzögerung* wieder. Dagegen beschreibt ein Zeitvektor, der entgegen der Bauzeit gerichtet ist, eine *Beschleunigung*. Als dritte Möglichkeit kann ein Zeitvektor in einer senkrechten Ausrichtung zur Bauzeit angezeigt werden; dies trifft zu, sobald sein Zeitbetrag *in Bauzeitrichtung* gleich *null* ist.

Die zuletzt genannte Vektordarstellung ist zweckmäßig, weil sich ggf. trotz Bauablaufstörung keine Zeitabweichung nachweisen lässt. Sollte sie zeitlich nicht messbar sein, kann zumindest die Durchführung ihrer Überprüfung vermerkt werden. Es ist unbedeutend, ob ein solcher Zeitvektor nach oben oder nach unten zeigt (siehe *Tabelle 8-3*).

[1612] Eigene Darstellungen.

Tabelle 8-3: Darstellung von betragslosen Zeitvektoren[1613]

Betragsloser Zeitvektor – Alternative A	Betragsloser Zeitvektor – Alternative B
	

Im Vergleich zu einem *Zeit-/Pufferkonto*[1614] erlauben die Zeitvektoren einen alternativen Umgang mit Pufferzeiten. Durch die vektorielle Darstellung können die ermittelten Zeitbeträge miteinander verrechnet und im Darstellungskonzept der Soll-zu-Ist-Modifikation visualisiert werden.

Während der Einzelfallbetrachtungen dürfen Gruppenintervalle beliebig viele Zeitvektoren erhalten, da ihre Anzahl unbegrenzt ist. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Zeitvektoren miteinander zu *kombinieren* oder zu *separieren* bzw. voneinander zu trennen. Dies erlaubt Unterscheidungen der Verursacheranteile durch die ***Kategorisierung*** gemessener Zeitabweichungen. Auf diese Weise sind Kategorisierungen von *auftragnehmerseitigen Behinderungen* oder *Eigenverzögerungen* durchführbar. Zur besseren Übersicht lassen sich die Zeitvektoren ineinander verschachteln. Jeder Zeitvektor kann selbst aus mehreren internen Zeitvektoren bestehen. In Bauzeitrichtung summiert ein ***resultierender Zeitvektor*** die internen Zeitwirkungen (siehe *Abbildung 8-10*).

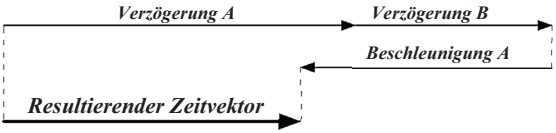


Abbildung 8-10: Beispielhafte Darstellung eines resultierenden Zeitvektors[1615]

Mit diesem Ansatz lässt sich z. B. die Kategorie „Behinderung“ definieren. Aufgrund der ineinander verschachtelten Zeitvektoren kann diese Kategorie in weitere Anteile gegliedert werden. Die Kategorie „Behinderungssachverhalte“ lässt sich bspw. durch zwei weitere interne Zeitvektoren für „Neutrale-Anteile“ und für „Auftraggeber-Anteile“ voneinander trennen (siehe *Abbildung 8-11*). Diese können abermals gegliedert werden, indem sie die Zeitwirkungen konkreterer Behinderungssachverhalte als eigenständige Kategorien abgreifen. Hiermit ließen sich die zeitlichen Abweichungen von Streik, höherer Gewalt oder

[1613] Eigene Darstellungen.
[1614] Siehe *Kapitel 4.4.5*.
[1615] Eigene Darstellung.

anderweitigen Behinderungsfolgen, die aus der Risikosphäre des Auftraggebers stammen, tiefergehend kategorisieren.[1616] Weitere Abgrenzungen sind über die *materiellen Ansprüche* möglich.

In *Abbildung 8-11* ist eine solche Gliederung grafisch dargestellt. Im Gruppenintervall, das den vollständig rekonstruierten Ist-Bauablauf wiedergibt, befinden sich die beiden Kategorien „Behinderungssachverhalte“ und „Auftragnehmer-Anteile“. An dieser groben Zweiteilung wird im weiteren Text festgehalten, da hiermit das zeitliche Ausmaß für Fristverlängerungsansprüche aufgeschlüsselt werden kann.

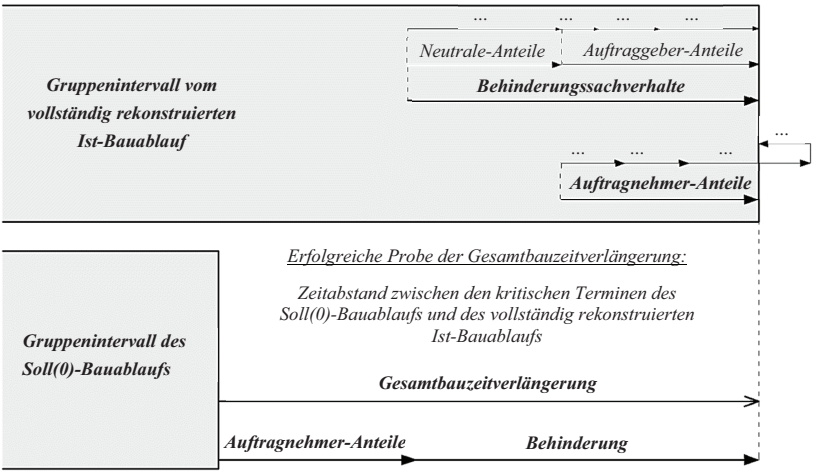


Abbildung 8-11: Probe der Gesamtbauzeitverlängerung mithilfe von Zeitvektoren[1617]

Zur Bestimmung eines Vektorbetrags muss während einer Einzelfallbetrachtung

- eine *Stützstellenverifizierung* und
- danach eine *Stützstellenvalidierung*

vorausgegangen sein. Erst *danach* ist das *Abgreifen* der Zeitabweichungen zur Bestimmung der Vektorbeträge vorzunehmen. Dazu sollten alle durchgeführten Modifizierungen der Einzelfallbetrachtung zurückgesetzt werden, damit der rekonstruierte Ist-Anteil wieder zu einem Soll-Anteil wird. Daraufhin sind alle zurückgesetzten Modifizierungen mithilfe der unten aufgezählten Punkte nach und nach wieder einzuarbeiten. In den Einzelschritten lassen sich nun Kategorien für die Zeitmessungen bilden.

[1616] Siehe *Kapitel 4.2.3*.
[1617] Eigene Darstellung – i. A. a. *Abbildung 8-8*.

In der Darstellung der *Abbildung 8-13* werden zur Zeitmessung folgende Bearbeitungsschritte pro Einzelfallbetrachtung für eine sukzessive Fortschreibungsvariante vorgeschlagen:

1. ***durch Umstellung neutraler Behinderungssachverhalte***;[1618]
2. ***durch Umstellung von Soll- auf Ist-Mengen***;[1619]
3. ***durch Umstellung von Soll- auf Ist-Kapazitäten;***[1620]
4. ***von auftraggeberseitigen Behinderungsanteilen;***
5. ***von auftragnehmerseitigen Beschleunigungs- oder Verzögerungsanteilen***.[1621]

Die obere Reihenfolge soll dazu beitragen, dass zuerst eine Zeitmessung von der Störungsursache vorgenommen wird, die sich ggf. verstärkend oder abschwächend auf die Zeitwirkungen der danach genannten Störungsursachen auswirkt. Von dieser Reihenfolge darf der Anwender im eigenen Ermessen abweichen. Beispielsweise ist eine *gesamtbauzeitliche Fortschreibungsvariante*[1622] möglich, bei der Mengenabweichungen von Beginn an – also zum frühestmöglichen Ist-Anhaltspunkt – über die gesamtzeitliche Ausdehnung des Bauablaufmodells gemessen werden. Anschließende Untersuchungen sind im Sinne der in *Kapitel 8.2.5* genannten *sukzessiven Fortschreibungsvariante* weiterzuführen.

Da die Fortschreibung des Bauablaufmodells über die Ist-Anhaltspunkte erfolgt, kann aus den ineinander verschachtelten Zeitvektoren eine ***Bauzeitchronologie*** für jedes Gruppenintervall gebildet werden.[1623] Sie stellt mit den aneinandergereihten Zeitvektoren eine grafische Übersicht verschiedener Zeitmessungen dar. Diese sind auf Grundlage der nacheinander durchgeführten Einzelfallbetrachtungen sortiert und daher nach den terminbezogenen Ist-Anhaltspunkten gegliedert.

Des Weiteren werden in der Bauzeitchronologie die gemessenen Zeitanteile durch die Zeitvektoren im Verhältnis zueinander abgebildet. Darum lässt sich grafisch nachvollziehen, inwieweit Pufferzeiten infolge einzelfallbezogener Simulationsexperimente verbraucht oder erarbeitet werden. Außerdem kann durch die Kategorisierung eine klare Trennung der gemessenen Zeitanteile stattfinden.

Mit der Bauzeitchronologie ist eine ***Probe der Gesamtbauzeitverlängerung*** durchführbar (siehe *Abbildung 8-11*). Sie erfolgt durch die Gegenüberstellung zwischen dem *ursprünglich* simulierten Soll(0)-Bauablaufmodell und dem *vollständig* rekonstruierten Ist-Bauablauf. Dieser liegt erst *nach* der letzten Einzelfallbetrachtung als ein Ist-Bauablaufmodell vor.

[1618] Zum Beispiel Witterungseinflüsse oder anderweitige globale Sachverhalte.

[1619] Die Zuweisung der gemessenen Zeitdifferenzen kann frei gewählt werden. Da es unterschiedliche Ansichten darüber gibt, ob Mengenmehrungen unterhalb der *10-%-Toleranz* als Behinderungen oder auftragnehmerseitiges Risiko zu bewerten sind, sollte die Kategorisierung der Zeitabweichung im Ermessen des Anwenders liegen. So muss der Anwender entsprechende Zeitvektoren vorhalten und die Wertzuweisung für die Zeitbeträge manuell ausarbeiten.

[1620] Diese sind dem Risikobereich des Auftragnehmers zuzuordnen, solange eine Änderung nicht auf eine angeordnete Beschleunigung zurückzuführen ist. Im letzteren Fall wären das auftraggeberseitige Zeitanteile.

[1621] Hier steht die Erreichung der abschließenden Stützstellenverifizierung und -validierung im Fokus der Betrachtungen.

[1622] Siehe *Kapitel 8.2.5*.

[1623] Ähnlich: Tiesler, 2018: S. 326 (Abbildung 6-25).

Während der Probe sind alle Zeitvektoren vom vollständigen Ist-Bauablaufmodell aufzusummieren, so dass sich die resultierende Gesamtbauzeitverlängerung ausrechnen lässt und durch einen *resultierenden Zeitvektor* abgebildet werden kann. Ist die Probe erfolgreich, muss der Wert seines *Zeitbetrags* mit der *Zeitdifferenz*, die zwischen beiden Gruppenintervallen besteht, übereinstimmen. Die grafische Darstellung erfolgt über den *resultierenden Zeitvektor*, der die Zeitdifferenz zwischen den beiden kritischen Endterminen des Soll(0)-Bauablaufmodells und des Ist-Bauablaufmodells überbrückt.

8.2.7 Prüfung von Fristverlängerungsansprüchen

Nachfolgend wird ein Augenmerk auf überschrittene Vertragstermine zur Ermittlung von *Fristverlängerungsansprüchen* i. S. v. § 6 Abs. 2-4 VOB/B gerichtet.[1624] Im Hinblick auf die *Abbildung 8-12* erfolgt die Beschreibung anhand des gezeigten Beispiels.

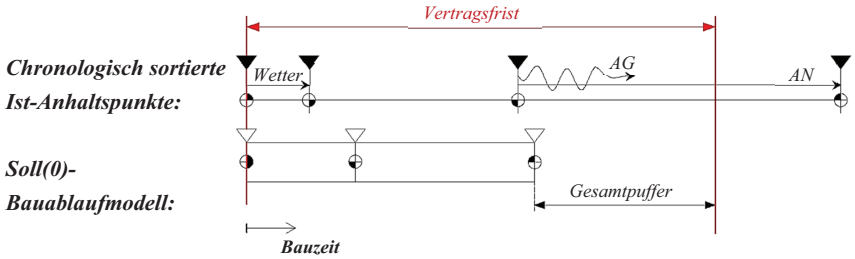


Abbildung 8-12: Beispiel – Ausgangssituation zur Messung von Fristverlängerungsansprüchen[1625]

Es wird davon ausgegangen, dass mit dem in der Abbildung dargestellten Gruppenintervall ein vertragsgemäßes Soll(0)-Bauablaufmodell vorliegt. Darüber hinaus umfasst das Beispiel vier Ist-Anhaltspunkte, die jeweils einen bestimmten Marker besitzen. Hier sind *drei konkrete Störungssachverhalte* zu berücksichtigen.

1. Störungssachverhalt: Aus den Dokumenten geht hervor, dass sich die Bauleistung wegen eines *ungewöhnlichen witterungsbedingten Umstands* verspätete. Die Dauer von diesem neutralen Behinderungssachverhalt wird in der *Abbildung 8-12* als Pfeil dargestellt, der sich zwischen dem *1.* und *2. Ist-Anhaltspunkt* befindet. Dieser trägt die Bezeichnung „**Wetter**".

2. Störungssachverhalt: Aufgrund einer anderen Sachverhaltsschilderung ist eine potentielle Ursache für eine *auftragnehmerseitige Verzögerung* bekannt. Hierbei handelt es sich um Nachbesserungsarbeiten, die zu einer Bauzeitverlängerung geführt haben sollen. Die Dauer dieser Verzögerung ist in der *Abbildung 8-12* ebenso als Pfeil dargestellt, der sich vom *3.* bis zum *4. Ist-Anhaltspunkt* erstreckt. Er trägt die Bezeichnung „**AN**".

3. Störungssachverhalt: Als dritter dokumentierter Störungssachverhalt liegt eine *auftraggeberseitige Behinderung* vor, die inhaltlich einer Leistungsänderung entspricht. Es wird angenommen, dass für diesen hindernden Umstand kein expliziter Fertigstellungstermin ausgehandelt wurde. Stattdessen hat sich der Auftragnehmer Ansprüche wegen einer längeren

[1624] Siehe *Kapitel 3.3.2* und *Kapitel 4.2.5* i. V. m. *Kapitel 4.4*.
[1625] Eigene Darstellung.

Bauzeit vorbehalten. Da für die *auftraggeberseitige Behinderung* kein Endtermin bekannt ist, muss im Rahmen der Bauzeitanalyse eine realisierbare Ausführungsdauer *rekonstruiert*[1626] werden. In der Abbildung wird diese Behinderung zur Unterscheidung nicht als durchgängiger, sondern als geschwungener Pfeil[1627] dargestellt, der zum Termin des *3. Ist-Anhaltspunkts* beginnt. Dieser trägt die Bezeichnung „**AG**".

Zur Bewertung der Fristverlängerungsansprüche muss nun die *Vertragsfrist* der Bauleistung berücksichtigt werden. Sie ergibt sich aus dem vereinbarten vertraglichen *Anfangs-* und *Endtermin* der Bauleistung. In der Abbildung werden diese durch zwei senkrechte Striche wiedergegeben, mit denen die Dauer der eingezeichneten *Vertragsfrist* begrenzt wird.[1628] Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation gehören alle Vertragstermine grundsätzlich *nicht* zu den Gruppenintervallen, da sie keine Bestandteile der reinen baubetrieblichen Ausführungsprozesse sind. Solche Termine begründen eher vertragsrechtliche Rahmenbedingungen. Mit ihnen wird die Fälligkeit[1629] der fertigzustellenden Bauleistungen vorgegeben. Sie zeigen daher den maßgeblichen Beweggrund zur Bewertung einer möglichen Fristüberschreitung auf. Außerdem dienen sie zur Vermessung der *Auskömmlichkeit*[1630]. Dafür kommt es auf den *kritischen Endtermin* des Gruppenintervalls an. Liegt dieser *vor* dem Fälligkeitstermin, ist ein *Gesamtpuffer* vorhanden (siehe z. B. *Abbildung 8-12*). Falls sich jedoch der *kritische Endtermin* zeitlich *hinter* dem Fälligkeitstermin befindet, ist der mit dem Gruppenintervall nachgebildete Soll(0)-Bauablauf *nicht auskömmlich*. Ein nicht auskömmlicher Soll(0)-Bauablauf zeichnet sich durch seine *Nichtmachbarkeit* aus. Das heißt, dass die Vertragsfrist *nur* noch mit „zu schnellen" Ausführungsgeschwindigkeiten hätte eingehalten werden können. In solchen Fällen sollte der Anwender eine juristische Beratung hinzuziehen, da ggf. baurechtliche Überlegungen zur Vertragsauslegung für eine neue Fristbestimmung stattfinden müssen.

Aufbauend auf *Abbildung 8-12* enthält *Abbildung 8-13* eine Darstellung der gesamten Nachweisführung des zuvor beschriebenen Untersuchungsfalls. Zur Vereinfachung werden die *Bauablaufmodelle von (0) bis (5)* durchnummeriert.

[1626] Siehe *Kapitel 4.4.4*.
[1627] In Anlehnung an *Kapitel 5.2.8* für *dynamische Dauern*.
[1628] Siehe Fristendarstellung in *Kapitel 3.3.2*.
[1629] Siehe *Kapitel 4.1.3*.
[1630] Siehe *Kapitel 4.4.4*.

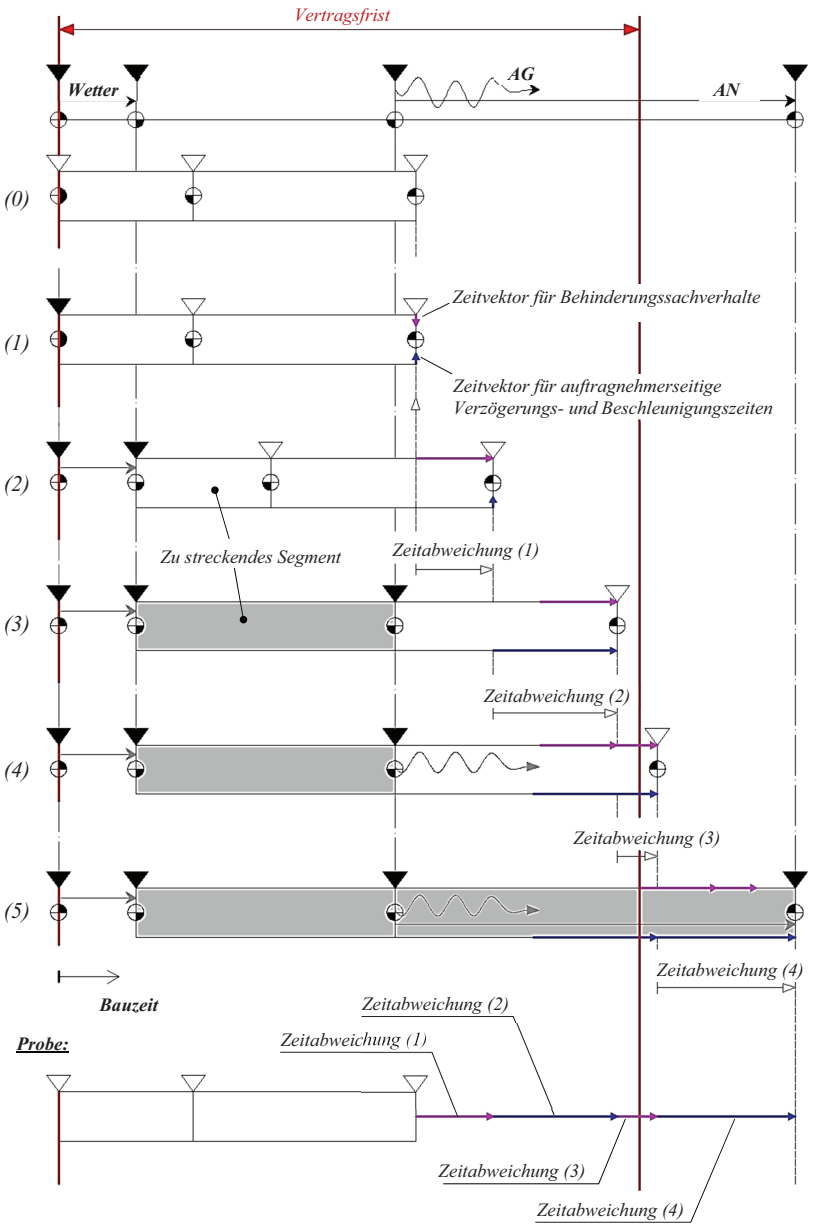


Abbildung 8-13: Bewertung von Fristverlängerungsansprüchen mit der Soll-zu-Ist-Modifikation[1631]

[1631] Eigene Darstellung.

Zur besseren Übersicht sind die Zeitvektoren in der *Abbildung 8-13* einzeln abgebildet. Sie werden durch zwei Zeitvektoren dargestellt, deren *Zeitbeträge = 0* sind. Der eine Zeitvektor ist ausschließlich für die Zeitmessung von Behinderungssachverhalten vorgesehen. Er befindet sich oberhalb vom Gruppenintervall. Der andere Zeitvektor ist unterhalb vom Gruppenintervall eingezeichnet. Mit ihm sollen auftragnehmerseitige Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten abgegriffen werden.

Durch den Vergleich zwischen dem *Bauablaufmodell (1)* und dem *Bauablaufmodell (2)* ist ersichtlich, dass aufgrund des witterungsbedingten Umstands eine Anfangsverschiebung vorliegt. Die sich daraus ergebende *Zeitabweichung (1)* wird am *Bauablaufmodell (2)* mit dem oberen Zeitvektor für Behinderungssachverhalte abgegriffen.

Der Vergleich zwischen dem *Bauablaufmodell (2)* und dem *Bauablaufmodell (3)* zeigt, dass das erste Segment des Gruppenintervalls vom *Bauablaufmodell (3)* gestreckt werden muss, damit die Stützstellenverifizierung zum *3. Ist-Anhaltspunkt* gelingt. Diese Streckung lässt sich durch Modifizierungsmaßnahmen am Simulationsmodell erzielen. Da sich die messbare *Zeitabweichung (2)* nicht konkret über belegbare Dokumente nachweisen lässt, liegt diese im Risikobereich des Auftragnehmers.[1632] Entsprechend wird die vorhandene *Zeitabweichung (2)* durch den Zeitvektor für auftragnehmerseitige Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten abgegriffen.

Beim nächsten Vergleich liegt zwischen dem *Bauablaufmodell (3)* und dem *Bauablaufmodell (4)* ein Sonderfall vor. Hier muss der Behinderungssachverhalt „AG“ plausibel und machbar rekonstruiert werden, weil das zeitliche Ende unbekannt ist. Diese Prüfung ist allerdings nicht alleine durch den Vergleich zwischen den zuvor genannten Bauablaufmodellen abgeschlossen. Berücksichtigt werden muss auch der Störungssachverhalt von der auftragnehmerseitigen Verzögerung „AN“, da dieser zeitparallel stattfindet. Aus diesem Grund wird das *Bauablaufmodell (4)* – zwar erstellt – aber vorerst übergangen.

Die eigentliche Bauzeitanalyse der beiden Störungssachverhalte „AG“ und „AN“ erfolgt zunächst am *Bauablaufmodell (5)*. Hier ist die Einzelfallbetrachtung erst abgeschlossen, wenn mit der Modellversion eine Stützstellenverifizierung und -validierung angesichts des *4. Ist-Anhaltspunkts* überprüft wird. Dazu müssen die modellierten Produktionsprozesse unter Berücksichtigung der beiden Störungssachverhalte plausible und machbare Ergebnisse liefern.[1633]

Ist dies der Fall, kann die Zeitmessung zwischen dem *Bauablaufmodell (3)* und dem *Bauablaufmodell (4)* erfolgen. Dafür werden die Erkenntnisse aus der Bauzeitanalyse vom *Bauablaufmodell (5)* soweit wie möglich auf das *Bauablaufmodell (4)* übertragen. Daraufhin wird die *Zeitabweichung (3)* mit dem oberen Zeitvektor für Behinderungssachverhalte am *Bauablaufmodell (4)* abgegriffen.

Sodann kann die Messung der *Zeitabweichung (4)* zwischen dem *Bauablaufmodell (4)* und dem *Bauablaufmodell (5)* erfolgen. Diese *Zeitabweichung (4)* wird mit dem Zeitvektor für auftragnehmerseitige Verzögerungs- und Beschleunigungsanteile im *Bauablaufmodell (5)* abgegriffen.

[1632] Nichtbelegbare Ursachen liegen hauptsächlich im Risikobereich des Auftragnehmers.
[1633] Siehe *Kapitel 4.5.*

In *Abbildung 8-13* ist unterhalb der gezeigten Fortschreibung die *Probe* der Gesamtbauzeitverlängerung skizziert. Demnach kann die Gesamtbauzeitverlängerung mit allen Zeitvektoren überbrückt werden. In solchen Fällen wäre die Probe erfolgreich. Aus der *Abbildung 8-13* lässt sich weiter erkennen, dass bei der Soll-zu-Ist-Modifikation nicht nur die Bauablaufmodelle, sondern auch die Zeitvektoren in Form eines resultierenden Zeitvektors fortgeschrieben werden. Während der Fortschreibung sind sie stets am kritischen Endtermin des jeweiligen Gruppenintervalls angeheftet und werden dort zeitlich mitgeführt. Dieses Mitführen erfolgt so lange, bis der *resultierende Zeitvektor für Behinderungssachverhalte* vollständig hinter dem Fälligkeitstermin liegt. In solchen Situationen wird seine Orientierung am kritischen Endtermin aufgehoben; er ist also nicht mehr am Ende des Gruppenintervalls angeheftet und verbleibt am Fälligkeitstermin. Eine derartige Situation ist in der Darstellung der *Abbildung 8-13* am *Bauablaufmodell (5)* zu sehen. Diese Regel trifft jedoch *nicht* auf die Zeitvektoren auftragnehmerseitiger Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten zu. Vielmehr sind diese Zeitvektoren weiterhin an den kritischen Endtermin des Gruppenintervalls gebunden. Die Gründe werden im folgenden Text erläutert.

Für ein besseres Verständnis sind im *Anhang* der vorliegenden Arbeit verschiedene Fallbeispiele der Fachliteratur zu entnehmen, bei denen die Soll-zu-Ist-Modifikation angewandt wurde.

8.2.8 Konstellationen zur Differenzierung der Zeitanteile inkl. der Ansprüche

Wird bei der Fortschreibung der Fälligkeitstermin überschritten, können dem Auftragnehmer Fristverlängerungsansprüche und/oder dem Auftraggeber Schadensersatzansprüche wegen eines Schuldnerverzugs zugänglich sein. Zur Bewertung der Anspruchshöhen muss überprüft werden, ob der Auftragnehmer gem. *Kapitel 4.4.5* eine etwaige Pufferzeit für seine Ausführungsarbeiten hätte nutzen können. Zusätzlich besteht eine weitere Aufgabe darin, dass die gemessene Zeitabweichung entweder dem auftraggeberseitigen oder dem auftragnehmerseitigen Risikobereich zugewiesen wird. Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation lassen sich diese Herausforderungen mit der grafischen Anordnung der Zeitvektoren lösen. Deren Zeitanteile sind, je nach Situation, in einer bestimmten ***Konstellation*** aufeinander abzustimmen.

Es folgen *vier Abbildungen*, in denen die situationsbedingten Konstellationen visualisiert werden. Bei allen Abbildungen wird vorausgesetzt, dass die darin gezeigten Bauablaufmodelle sachlogisch aufgebaut sind. Im Einzelnen findet zu jeder Abbildung eine grafische Gegenüberstellung zwischen den Gruppenintervallen vom Soll(0)-Bauablaufmodell und vom Ist-Bauablaufmodell statt. In den Abbildungen ist immer oberhalb das Soll(0)-Bauablaufmodell mit der Probe der Gesamtbauzeitverzögerung gem. *Kapitel 8.2.6* zu sehen. Zum Vergleich befindet sich stets darunter das Ist-Bauablaufmodell mit der entsprechenden Konstellation. Darüber hinaus wird jede Konstellation mit den vorliegenden Verzugs- oder Fristverlängerungsansprüchen etc. kommentiert.

Im Sinne des *Kapitels 4.5.2* erfolgt die Bewertung einer Fristverlängerung auf Basis vorhandener Behinderungszeiten. Da dieser Verlängerungszeitraum dem Auftragnehmer eine zusätzliche Erfüllungszeit gewährt, muss sie, falls vorhanden, an die „alte Erfüllungszeit“ anschließen. Dieser Grundsatz führt dazu, dass die Behinderungszeiten für Fristverlängerungsansprüche immer erst *nach* dem jeweiligen Fälligkeitstermin zu überprüfen sind. Deshalb findet die Messung aller Behinderungszeiten immer *ab* dem Fälligkeitstermin

statt, es sei denn, der Auftragnehmer hat die verfügbare Gesamtpufferzeit nicht ausreichend nutzen können.[1634]

Über diesen Grundsatz lässt sich die erste Konstellation herleiten. Bei ihr stellen alle Verzögerungszeiten, die hinter dem Fälligkeitstermin liegen und nicht von der gemessenen Behinderungsdauer abgedeckt werden, einen auftragnehmerseitigen Verzug gem. §§ 280, 286 BGB dar.[1635] Hinsichtlich der Dispositionsfreiheit wird der vorausgegangene auftragnehmerseitige Verzögerungsanteil dem Verbrauch der Gesamtpufferzeit angerechnet. Zwischen den beiden Verzögerungsanteilen erstreckt sich der Zeitvektor mit den Behinderungssachverhalten. Ausgehend vom Fälligkeitstermin umfasst er die gesamte Behinderungsdauer, die zum Fristverlängerungsanspruch gem. § 6 Abs. 2-4 VOB/B führt. Die Zusammenhänge lassen sich in der folgenden *Abbildung 8-14* betrachten.

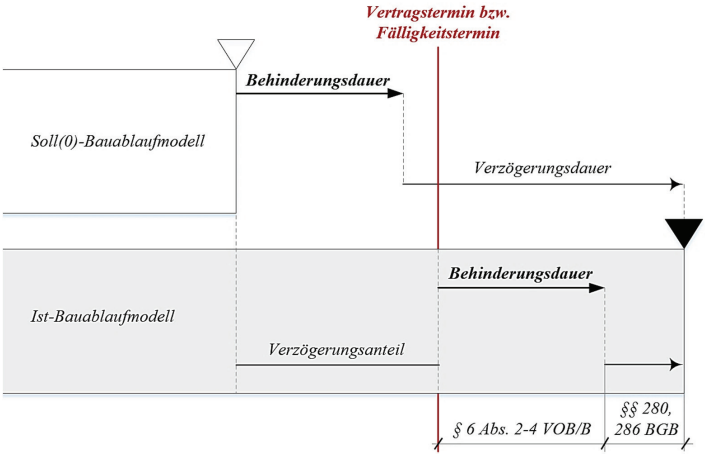


Abbildung 8-14: Konstellation 1 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins[1636]

[1634] Siehe *Kapitel 3.2.2* i. V. m. *Kapitel 4.4.5*.
[1635] Siehe *Kapitel 4.1.5*.
[1636] Eigene Darstellung.

Angenommen, die auftragnehmerseitigen Verzögerungen verbrauchen nicht die Gesamtpufferzeit, so kommt diese dem Auftraggeber zugute. Hierzu ist in der *Abbildung 8-15* zu sehen, dass demnach der Zeitvektor für Behinderungssachverhalte *vor* dem Fälligkeitstermin beginnen kann. Ein Teil des Zeitvektors deckt somit einen Teil der Gesamtpufferzeit ab, die vom Auftragnehmer nicht genutzt werden konnte.

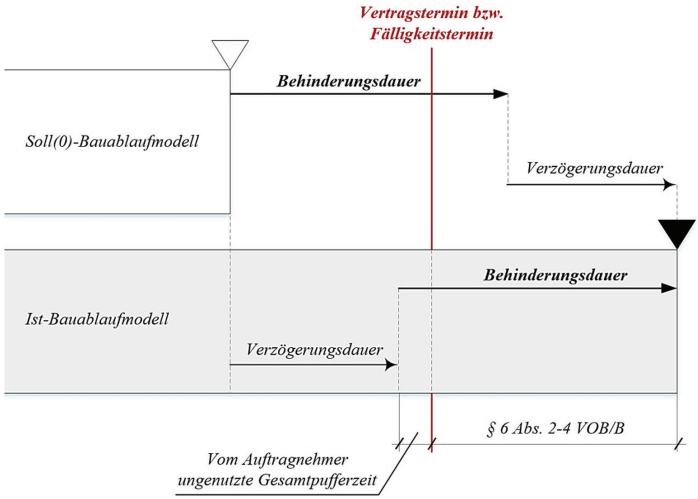


Abbildung 8-15: Konstellation 2 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins[1637]

Darüber hinaus können die erarbeiteten Pufferzeiten dem Auftragnehmer im Sinne eines *Zeit-/Pufferkontos* erhalten bleiben.[1638] Es wird vorausgesetzt, dass er die Pufferzeiten aufgrund möglicher Behinderungssachverhalte nicht nutzen konnte. Eine derartige Situation ist in einem stark geprägten Ausmaß in der *Abbildung 8-16* zu sehen. Der darin abgebildete Zeitvektor stellt für die erarbeiteten Pufferzeiten eine resultierende Größe dar, die sich aus verschiedenen Zeitanteilen zusammensetzen kann. Möglicherweise könnten darin Verzögerungsanteile enthalten sein.

Aus diesem Grund ist in der *Abbildung 8-16* davon auszugehen, dass alle möglichen Verzögerungsanteile vom Auftragnehmer aufgeholt werden konnten. In einer derartigen Darstellung nutzte der Auftragnehmer keine Zeitanteile der Gesamtpufferzeit, da er ohnehin schneller mit seinen Ausführungsarbeiten vorangekommen ist. Deshalb steht die Gesamtpufferzeit dem Auftraggeber zu. Ob und inwieweit die vom Auftragnehmer geschaffenen sowie nicht genutzten Pufferzeiten auf eine nachstehende Bauleistung übertragen werden können, ist juristisch zu klären. Ein alternativer Fristverlängerungsanspruch, der über den kritischen Endtermin vom Ist-Bauablaufmodell hinausgehen würde, ist jedoch auszuschließen. Dies wird damit begründet, dass eine derartige Fristverlängerung nur auf hypothetischen Anhaltspunkten beruhen würde, da kein Bezug zum realitätsnahen

[1637] Eigene Darstellung.
[1638] Siehe *Kapitel 4.4.5*.

Sachverhalt vorliegt. Die Höhe der Fristverlängerung erstreckt sich somit über einen deutlich kürzeren Zeitraum.

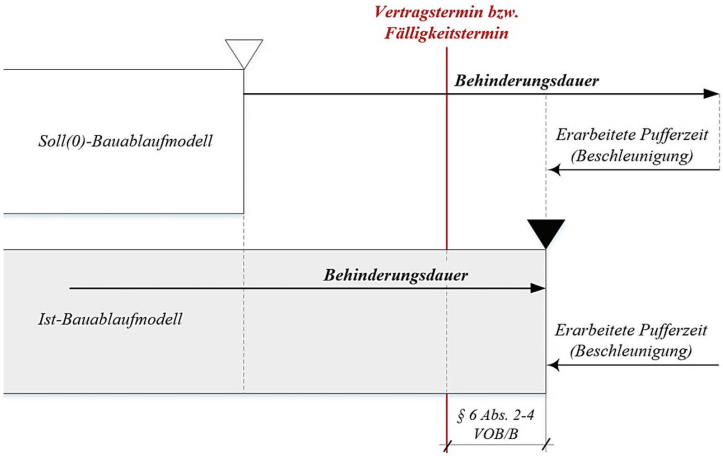


Abbildung 8-16: Konstellation 3 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins[1639]

In der letzten Konstellation werden die vom Auftraggeber angeordneten Beschleunigungsmaßnahmen berücksichtigt.[1640] Diese Zeitanteile stehen dem Auftragnehmer nicht mehr zur Verfügung. Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation orientieren sich auch solche – vom Auftraggeber „gekauften Zeitreserven" – am Fälligkeitstermin. Hingegen verkürzen sie den Erfüllungszeitraum für eine bestimmte Bauleistung. Sollte der überwiegende Teil der Gesamtbauzeitverlängerung vom Auftragnehmer ausgegangen sein, sind die gekauften Zeitreserven i. S. v. *Abbildung 8-17* dem Verzugszeitraum hinzuzurechnen.

Eine derartige Messung sollte nur dann erfolgen, wenn die angeordnete Beschleunigungsmaßnahme auf eine eindeutige Bauleistung angewandt wird. Bei der Nachweisführung ist daher darauf zu achten, dass keine Vermischung unterschiedlicher Bauleistungen zustande kommt. Sicherheitshalber sollte in solchen Fällen eine juristische Prüfung erfolgen.

[1639] Eigene Darstellung.
[1640] Gemäß *Kapitel 4.2.6* ist umstritten, ob ein derartiges Anordnungsrecht i. S. v. § 1 Abs. 3, 4 VOB/B überhaupt besteht.

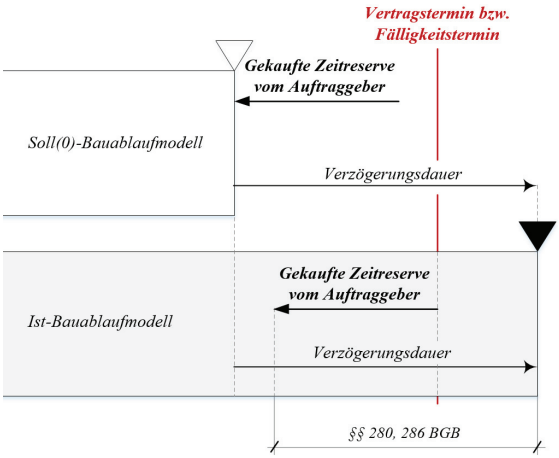


Abbildung 8-17: Konstellation 4 – Bewertung der Überschreitung eines Vertragstermins[1641]

Bei den gezeigten Konstellationen findet zum Teil eine Vermischung der ermittelten Zeitvektoren statt, indem sie aufgeteilt und/oder in eine andere zeitliche Lage verschoben werden. Eine derartige Herangehensweise verletzt nicht die Anforderungen eines *zweistufigen Kausalitätsnachweises*[1642] im Hinblick auf Verzugs- oder Fristverlängerungsansprüche. Denn nach Abschluss der Fortschreibung ist davon auszugehen, dass die Zeitwirkungen aller Störungsursachen in der Summe eine objektiv geprüfte Gesamtbauzeitverlängerung bilden. Im Ergebnis sind die einzelnen Störungsursachen entweder belegbar oder nicht.

Diese Unterscheidung lässt sich mit den Dokumenten *klären*, die *in* den Ist-Anhaltspunkten *hinterlegt* sind. Die darüber abgeleiteten Zeitabweichungen wurden im Rahmen der Fortschreibung unter Berücksichtigung der *Stützstellenverifizierung* und *-validierung* baubetrieblich ermittelt. Hieraus lässt sich der kausale Zusammenhang zwischen einer belegbaren Information – für die konkrete Verletzungshandlung – und der daraus resultierenden Zeitabweichung – als Rechtsgutverletzung – nachweisen.[1643] Dieser Zusammenhang betrifft die *adäquate haftungsbegründende Kausalität* i. S. v. § 286 ZPO. Die darauf aufbauende *adäquate haftungsausfüllende Kausalität* gem. § 287 ZPO erfordert keine Wirklichkeitsbetrachtung in diesem Maße.[1644] Bei der Ermittlung der Anspruchshöhe kommt es nämlich *nicht* auf eine systemtheoretische Nachweisführung an, zu der alle infinitesimal kleinen Störungsanteile in einem Störungspotential kontinuierlich akkumuliert werden müssten.[1645] Es reicht aus, wenn eine Verteilung der objektiv gemessenen Zeitabweichungen mithilfe der oben vorgestellten Konstellationen stattfindet.

[1641] Eigene Darstellung.
[1642] Siehe *Kapitel 4.4.2 ff.*
[1643] Für eine vollständige Darlegung müssten noch die in den Anhaltspunkten hinterlegten Dokumente ausgewertet werden. Auf welche Informationen es dabei im Einzelnen ankommt, wird innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht vertieft.
[1644] Siehe *Kapitel 4.4.2*.
[1645] Siehe *Kapitel 2.1.8*, *Kapitel 3.4.2* und *Kapitel 4.2.3*.

In dem vorausgegangenen Text wurde nicht explizit auf *Zwischenfristen*[1646] eingegangen. Jedoch können diese analog zu der vorgestellten Herangehensweise überprüft werden. Unter Umständen sind dafür vereinzelte Gruppenintervalle auszuarbeiten. In Anlehnung an *Abbildung 8-2* können diese zeitlich hintereinander oder nebeneinander angeordnet werden.[1647] Allerdings kann die Fortschreibung mehrerer Gruppenintervalle eine anspruchsvolle Aufgabe für den Anwender sein. Während der sukzessiven Einzelfallbetrachtungen ist darauf zu achten, ob die experimentellen Eingriffe in das Simulationsmodell Zeitabweichungen auslösen, die bis in die benachbarten Bauzeitanalysen hineinwirken. Zur Messung solcher Zeitwirkungen sollten daher entsprechende Zeitvektoren in den benachbarten Gruppenintervallen präventiv ausgearbeitet werden. Derartige Herausforderungen lassen sich jedoch vermeiden, wenn für die gesamte Bauzeitanalyse möglichst nur ein einziges Gruppenintervall ausgearbeitet wird, das gut strukturierte Zeitvektoren enthält. Prinzipiell ließe sich ein Gruppenintervall, ggf. nach der Prüfung einer Zwischenfrist, größer ausbauen, woraufhin es für weitere Fortschreibungen genutzt werden kann.

8.3 Verifizierung und Validierung der Bauablaufmodelle

8.3.1 Ausgangssituation

Die Entwicklung der Soll-zu-Ist-Modifikation beruht u. a. auf der Überlegung, dass sich verschiedene Entwicklungspfade aus unterschiedlich parametrierten Simulationsläufen einstellen können.[1648] Mit der *Stützstellenverifizierung*[1649] erfolgt eine systematische Abbildung der Simulationsergebnisse auf zustandsbeschreibende Indikatoren. Dadurch können die verschiedenen Entwicklungspfade inhaltlich verglichen und bewertet werden.[1650] Letzteres findet im Rahmen der *Stützstellenvalidierung*[1651] statt. Mit dieser soll die Rekonstruktion eines möglichst realisierbaren Bauablaufs gelingen. Der Sachverständige hat hierzu einschätzende (nicht schätzende![1652]) Bewertungen über die *erforderlichen Produktivitäten* der Ausführungsprozesse herauszuarbeiten. Zuverlässige Simulationsergebnisse liegen erst vor, wenn sie in sich stimmig verifiziert und validiert sind.[1653] Grundsätzlich kann ein Simulationsmodell zwar verifiziert, aber gleichzeitig *nicht* validiert sein.[1654]

Bauabläufe sind einmalige Systeme mit unterschiedlichen Ausführungsprozessen, die schwankende Produktivitäten besitzen. Solche Produktivitäten werden i. d. R. durch die Iteration von Zufallszahlen validiert, um so ein durchschnittliches Maß eines geeigneten Arbeitsaufwands zu schätzen.[1655] Die absolute Festlegung von Produktivitäten durch eine bestimmte Zahl ist hypothetischer Natur. Allenfalls kann die *Produktivität* durch eine

[1646] Siehe *Kapitel 3.3.2*.
[1647] Siehe *Kapitel 8.2.3*.
[1648] Siehe *Kapitel 2.1.4*, *Kapitel 5.2.4*, *Kapitel 7* und *Kapitel 8.2*.
[1649] Siehe *Kapitel 8.4.2*
[1650] Siehe *Kapitel 4.5*, Kapitel *4.6* und *Kapitel 8.2.1*
[1651] Siehe *Kapitel 8.4.2*
[1652] Der Unterschied zwischen „Schätzen“ und „Einschätzen“ besteht darin, dass beim *Schätzen* ein noch nicht existenter Zustand vorausgedacht wird. *Einschätzen* zielt hingegen auf das nachträgliche Bewerten eines bereits erzielten und darum vorhandenen Zustands ab.
[1653] Vgl. Robinson, 1997: S. 53.
[1654] Siehe *Kapitel 2.2.5*.
[1655] Vgl. Choi, 2011: S. 761.

geschätzte Verhältniszahl[1656] wiedergegeben werden und lässt sich daher nur als solche rechtfertigen.

Aus baubetrieblicher Sicht ist daher die Analyse *machbarer Produktivitäten* unter Anwendung eines *Benchmarkings* zweckmäßig. Hier gilt es zu klären, ob die geschätzten Zahlen gegenüber einer geeigneten Vergleichsgröße zu hoch, zu niedrig oder passend gewählt wurden. Neben der Machbarkeitsprüfung kann das *Schwanken der Produktivitäten* ebenso durch eine *nicht plausible Ablaufstruktur* zustande kommen.[1657] Dies ist der Fall, wenn die Produktionsprozesse trotz erfolgreicher Verifikation und machbarer Produktivitätskennzahlen in unschlüssigen oder ungeeigneten Prozessreihenfolgen ineinandergreifen (siehe Testlauf der *Abbildung 7-19* in *Kapitel 7.1.7*).

Aus diesem Grund wurde mit der *These 1* des *Kapitels 4.5* die Grundlage der (konkreten) Stützstellenverifizierung geschaffen. Die *These 2* legt die Stützstellenvalidierung der *Plausibilität* und *Machbarkeit* bzw. der *Nichtplausibilität* und *Nichtmachbarkeit* zugrunde. Bei der Durchführung der Soll-zu-Ist-Modifikation ist zu unterschieden zwischen:

- ***Verifizierung der Bauablaufmodelle:***
  - durch den Abgleich mit konkreten Anhaltspunkten
- ***Validierung der Bauablaufmodelle:***
  - durch den Nachweis der Plausibilität oder Nichtplausibilität und
  - durch den Nachweis der Machbarkeit oder Nichtmachbarkeit (zu prüfen mithilfe das Benchmarkings)

Insgesamt bilden Verifizierung und Validierung die Ausgangslage zur Nachweisführung eines auskömmlichen Bauablaufs. Eine Auskömmlichkeit ist gegeben, wenn ein verifiziertes und validiertes Bauablaufmodell die vertragsgemäßen Fristen nicht überschreitet.

8.3.2 Plausibilität und Nichtplausibilität

Die Validierung umfasst baubetriebliche Prüfungen zur *Plausibilität* und *Nichtplausibilität* sachlogischer Reihenfolgen für die Aufbau- und Ablaufstruktur der simulierten Arbeitsaufgaben. Die modellierten Prozesse müssen dafür in einer *baubetrieblich angemessenen* Reihenfolge ineinandergreifen. Gleichzeitig ist die Weiterführungs- und Wiederaufnahmepflicht gem. § 6 Abs. 3 VOB/B zu berücksichtigen.[1658] Die Plausibilitätsbewertung der rekonstruierten Bauabläufe erfordert eine durchgängige Kontrolle der zugrunde gelegten Darstellungstiefe. Dies erfolgt durch die Bildung von Systemgrenzen nach *Kapitel 2.1.3*.

Bei der Validierung der Plausibilität und Nichtplausibilität werden die modellierten *kapazitiven* und *technologischen Abhängigkeitsbeziehungen* untersucht. Hierbei ist abzuwägen, ob eine andere, geeignetere Fertigungsrichtung gewählt werden sollte. Die Prüfung einer objektiven Plausibilität ist vom (subjektiven) baubetrieblichen Auffassungsvermögen des Gutachters abhängig.

[1656] Siehe *Kapitel 2.1.7*.
[1657] Siehe *Kapitel 3.4.2*.
[1658] Siehe *Kapitel 8.2.4*.

8.3.3 Machbarkeit und Nichtmachbarkeit

Durch die objektive Bewertung der *Machbarkeit* und *Nichtmachbarkeit* wird eine baubetriebliche Validierung der Arbeitsproduktivität über die simulierten Arbeitsaufgaben vorgenommen. Eine Machbarkeit liegt vor, wenn der simulierte zeitliche *Aufwand* für die Arbeitsaufgabe *baubetrieblich angemessen* ist. Demzufolge kommt es in den Machbarkeitsstudien auf die Wahl der in der Simulation verwendeten *Zeitaufwands*- und *Leistungswerte* als ***Verhältniszahl*** an.

Zur Schätzung ist ein Abgleich der Produktivitätskennwerte mit *geeigneten Vergleichswerten* als ***Vergleichsgröße*** erforderlich. Entsprechend ist zu prüfen, inwieweit die eingegebenen Parameterwerte über die Simulationsergebnisse die Produktivität einzelner Ausführungsprozesse abbilden können. Eine Machbarkeit lässt sich nur bei vorausgegangener Plausibilität nachweisen. Dies ist im Rahmen des *Benchmarkings* zu prüfen, um Aussagen zu *Sekundär*- und/oder *Tertiärverzögerungen* zu erfassen und in den Analysen zu berücksichtigen.[1659]

8.3.4 Konzeptioneller Entwurf zur Durchführung des Benchmarkings

Die Durchführung des Benchmarkings beruht darauf, dass die alleinige Bewertung simulierter Produktivitäten anhand einer visuellen Darstellung für die Validierung *nicht* ausreicht. *Samkari* weist darauf hin, dass die „[…] *Visualisierung der Ergebnisse einer Simulationsstudie* […] *in der Regel als Balkendiagramme oder Computeranimationen* [erfolgt]. *Das Ziel dieser Darstellungsweisen besteht jedoch nicht darin, Fehler in den Simulationsergebnissen erkennen zu können, die durch Fehler in den Eingangsdaten der Simulation verursacht werden*."[1660] Daraus lässt sich die Notwendigkeit der Machbarkeitsstudien gem. *Kapitel 8.3.2* untermauern.

Die Ermittlung der *Verhältniszahlen* der Arbeitsproduktivitäten erfolgt durch iterative Simulationsläufe. Hier spielen die *faktoriellen Gewichtungsvariablen* gem. *Kapitel 5.2.6* eine besondere Rolle. Sie dienen zur Ermittlung erforderlicher Produktivitäten, indem über ihre aufeinander abgestimmten Werte eine *Vergleichsgröße* qualitativ nachgebildet wird. Diese Vorgehensweise entspricht einer *Parameterstudie*[1661], wie sie in *Kapitel 2.1.4* mit dem „Würfelbeispiel" beschrieben wird (in *Abbildung 2-6* ist die *Vergleichsgröße* durch das Wort „Ziel" gekennzeichnet).

Um überlagerte Zeitwirkungen zu testen, können in den Simulationsexperimenten, wie bei den Testläufen des *Kapitels 7*, mehrere faktorielle Gewichtungen miteinander kombiniert und aufeinander abgestimmt werden. Beim entwickelten Simulationsansatz geben die *gewichteten Zeitaufwandswerte* die simulierten Produktivitäten wieder. Sie sind in den Machbarkeits-

---

[1659] Siehe *Kapitel 3.4.2* i. V. m. *Kapitel 4.5.2*.

[1660] Samkari, 2014: S. 59.

[1661] Abgrenzung zur *Sensitivitätsanalyse*: Bei einer *Sensitivitätsanalyse* werden für einen bestimmten Untersuchungszweck gezielte Parametereingaben bzw. -änderungen vorgenommen. Dabei ist darauf zu achten, dass bestimmte Modellbedingungen unverändert bleiben und mehrere Werteingaben für einen Parameter stattfinden. In dieser Vorgehensweise ist pro Simulationslauf *nur ein* Parameterwert einzugeben, damit sich die Auswirkungen mehrerer Ursachen nicht überlagern. Das wesentliche Ziel dieser Technik besteht darin, ein „Kippen" des Modellverhaltens zu finden. Beispielsweise wurde dies beim Testlauf zur *Abbildung 7-22* mit den Verschiebungen der Anfangstermine der Teilaufgaben vorgenommen. Bei der hier vorgestellten Analyse kommt es jedoch *nicht* auf ein „Kippen" an, sondern allein auf die Ermittlung *einer geeigneten* Ablaufvariante. Entsprechend ist der Begriff ***Parameterstudie*** besser geeignet.

studien als Verhältniszahlen mit geeigneten Vergleichsgrößen gegenüberzustellen. *AbouRizk und Halpin* zählen bewährte Validierungs-Techniken auf, bei denen Vergleichsgrößen aus

- anderen geeigneten theoretischen Modellen,
- anderen Analysetechniken sowie
- bereits bekannten oder veröffentlichten Daten

für Gegenüberstellungen und Bewertungen genutzt werden.[1662]

Für die Soll-zu-Ist-Modifikation wird ein ***Toleranzbereich*** als Vergleichsgröße vorgeschlagen. Dieser kann aus empirisch ermittelten Vorgangsdauern zusammengesetzt und durch den Gutachter infolge einer objektiven Vorauswahl begrenzt werden. Damit ein Vergleich zwischen den

- *gewichteten Zeitaufwandswerten* gem. *Kapitel 5.2.6*, als simulierte *Verhältniszahl*, und den
- *empirischen Vorgangsdauern*, zur Bildung des *Toleranzbereichs* als *Vergleichsgröße*,

möglich ist, sind die Leistungseinheiten aufeinander abzustimmen. Darum müssen die Zeitaufwandswerte aus den empirischen Vorgangsdauern mithilfe des zeitlichen Ressourceneinsatzes der Simulation und den Mengenanteilen des BIM-Gebäudemodells extrahiert werden. Der daraus resultierende Toleranzbereich umfasst Zeitaufwandswerte, die einen Vergleich zwischen gewollten und objektiv ermittelten Produktivitäten zulässt.

Sobald ein gewichteter Zeitaufwandswert diesen Toleranzbereich *unterschreitet*, liegt eine *Nichtmachbarkeit* vor. Erst wenn die Ergebnisse verschiedener Parametereinstellungen *innerhalb* oder *über* dem zuvor festgelegten Toleranzbereich liegen, kann ausgesagt werden, dass der Auftragnehmer mit einer machbaren Geschwindigkeit seine Ausführungsprozesse im Rahmen seiner Dispositionsfreiheit ausführen konnte. Sollten die erzielten Simulationsergebnisse *innerhalb* dieser Toleranz „schwanken", ist der Nachweis einer *Machbarkeit* erfüllt.

Liegt die simulierte Produktivität *über* dem Toleranzbereich, ist davon auszugehen, dass der Auftragnehmer *zu langsam* arbeitete. In diesem Fall ist die weitere Entwicklung des Bauablaufmodells zu prüfen. Sollten die Simulationsergebnisse grundsätzlich vom vorgegebenen Toleranzbereich über eine längere Bauzeit abweichen, besteht die Annahme, dass die Ausführungsarbeiten des Auftragnehmers *zu langsam* waren. In solchen Fällen sind die Analyseergebnisse für gerichtliche Auseinandersetzungen ungeeignet, da die Nachweisführung *nicht* vollständig erfüllt wird.

Infolge verschiedener Gewichtungs-Kombinationen lassen sich aus einer Arbeitsaufgabe mehrere *Teilproduktivitäten*[1663] mithilfe der gewichteten Zeitaufwandswerte ableiten. Dadurch sind differenzierte Analysen im Rahmen der Machbarkeitsstudie möglich. Zusammen mit „passenden" Vergleichsgrößen können diese im Sinne eines „Blutbilds" gegenübergestellt werden. Die dort aufgelisteten und gewichteten Zeitaufwandswerte liefern Indizien, welchem Risikobereich eine Bauzeitverlängerung zuzuordnen ist. Die Beweggründe

[1662] Vgl. AbouRizk/Halpin, 1990: S. 591.
[1663] Siehe *Kapitel 2.1.7*.

für eine gewählte Modifizierung lassen sich bei Bedarf kommentieren und den maßgeblichen Soll- oder Ist-Anhaltspunkten zuweisen.

Zusammenfassend bleibt das Erfahrungswissen des Anwenders zur Durchführung des Benchmarkings ausschlaggebend. Er muss aus den zusammengestellten Zeitbedarfswerten eine objektive Aussage der simulierten Arbeitsaufgaben treffen können.

8.3.5 Diskussion – Herausforderungen des Benchmarkings

Oftmals liegen keine „exakten" Zeitaufwandswerte zur Rekonstruktion eines Bauablaufs vor. Zum Beispiel beschreiben *Kugler* sowie *Berner et al*., dass die Verfügbarkeit geeigneter Produktivitätskennwerte in Form von Zeitaufwandswerten ein häufiges Problem bei der Durchführung von Simulationsexperimenten mit Bauablaufmodellen darstellt. In der Regel sind die Zeitaufwandswerte für Bauablaufsimulationen nicht detailliert genug, da sie nur in ungeeigneter Tiefe während der Dokumentation erfasst werden.[1664] In ihren Ausführungen geben *Berner et al*. an, dass bei der Modellierung einige Idealisierungen notwendig sind, wie z. B. immer verfügbares Material, die ebenfalls zu Abweichungen von den erwarteten Ergebnissen geführt haben könnten.[1665] Erst durch eine zusätzliche Befragung der am Bauprojekt beteiligten Personen ließen sich aber brauchbare Zeitaufwandswerte zur Simulation ermitteln.[1666]

Aus diesem Grund bietet der Lösungsansatz gem. *Kapitel 8.3.3* durch die Verwendung gewichteter Zeitaufwandswerte den Vorteil, dass eine *experimentelle Annäherung* an die Vergleichsgrößen stattfinden könnte. Die ursprünglichen Zeitaufwandswerte dürfen daher in ihrer „Rohform" unscharf sein. Zudem sind sie und ihre Wertbeträge von den Gewichtungsvariablen entkoppelt und bleiben unverändert erhalten.

In einer gerichtlichen Auseinandersetzung könnte die Frage im Raum stehen, ob die gewählten Vergleichsgrößen in der gegenwärtigen Substantiierung repräsentativ sind. Mit einer derartigen Kritik ist besonders dann zu rechnen, wenn ein Vorgang in detailliertere Teilvorgänge zerlegt wird. Letztendlich müsste die Eignung der gewählten Produktivitätskennzahlen durch den Sachverständigen vertreten und ggf. im Zuge der Substantiierungen nachgewiesen werden.

Bei der Erhebung objektiver Vorgangsdauern als Vergleichsgrößen erscheint es sinnvoll, wenn eine Evaluierung geeigneter Produktivitätskennzahlen durch neutrale Expertenbefragungen ausführender Unternehmen erfolgt.[1667] Andernfalls wären auch Zeitmessungen in kontrollierten Feldstudien möglich. Aus diesen Daten kann die Vergleichsgröße gebildet werden. Die Wahl einer solchen Vorgehensweise ist darin begründet, dass bereits einige Forscher darauf hingewiesen haben, dass die geschätzten Produktivitäten häufig durch die Projektbeteiligten zu optimistisch geschätzt werden.[1668] Neben einigen Forschungsarbeiten des *Kapitels 2.4* gehen auch *Khanzadia et al*. darauf ein, dass entweder Experteninterviews

[1664] Vgl. Kugler, 2012: S. 180; Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 95.
[1665] Vgl. Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 96.
[1666] Vgl. Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: S. 95.
[1667] Vgl. Khanzadia/Kavehb/Alipoura/Mohammadia, 2017: S. 2687-2689.
[1668] Vgl. Damriantant/Wakefield, 2000: S. 218, 224; Han/Love/Peña-Mora, 2013: S. 2051, 2052; Choi, 2011: S. 262.

oder die Auswertung realer Projekte geeignet sind, um objektive Vergleichsgrößen zur Validierung eines glaubwürdigen Simulationsmodells zu erhalten.

Demgegenüber wird bei der Bestimmung einer geeigneten Vergleichsgröße zur Überprüfung der Machbarkeit von einem Zugriff auf Kennwerte aus der Arbeitskalkulation[1669] sowie der Durchführung der *Measured-Mile-Methode*[1670] abgesehen. Denn bei beiden Vorgehensweisen können die bereits streitgegenständlichen Baustellensituationen aus dem Projekt wieder in die baubetrieblichen Untersuchungen zurückgeführt werden. Im ungünstigsten Fall leidet darunter die Objektivität der Nachweisführung. Zwar werden die projektspezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigt, dennoch könnten gerade die entnommenen Messwerte ursächlich dafür sein, dass der Bauablauf zu einer späteren Bauzeit erst Planungs- und Beobachtungsunsicherheiten entstehen ließ und daher von seinem geplanten Kurs abgewichen ist. Darüber hinaus begünstigen die „natürlichen Schwankungen" des Bauablaufs ungenaue Annahmen für spätere Bewertungen. Zum Beispiel kritisiert *Drittler*: „*Ohne eine Überprüfung der auftragskalkulatorischen Ansätze auf ihre Realitätsnähe wird die bloße Anwendung der Ansätze aus der Auftragskalkulation regelmäßig zu einer vom Gesetz nicht getragenen Über- bzw. Unterbewertung bei der Schadensabschätzung führen*." [1671]

Während die Verifizierung und Validierung eines Ist-Bauablaufmodells durch den Abgleich mit erhobenen Ist-Daten und plausiblen sowie machbaren Produktivitäten gute Vergleichsmöglichkeiten bietet, gestaltet sich die Validierung eines Soll(0)-Bauablaufmodells schwieriger. Es wird vorgeschlagen, dass der Fokus auf die aus der Urkalkulation entnommenen und modifizierten Leistungs- und Aufwandswerte gerichtet wird. Bei der Simulation des Soll(0)-Bauablaufmodells muss mit diesen Werten eine Gesamtdauer mit geeigneten Produktivitätskennwerten erreicht werden. Sobald feingliedrigere Vorgangsdauern erforderlich werden, besteht die Aufgabe darin, eine geeignete Verteilung zu finden, bei der die ursprünglich ermittelte Vorgangsdauer nicht verändert wird (vergleichbar mit der geometrischen Aufwandsverteilung, siehe *Kapitel 5.2.7*).[1672] Dabei ist darauf zu achten, dass während der Zerlegung die simulierten Produktionsprozesse weiterhin plausibel und machbar bleiben.

Zur Begrenzung der Vorgangsdauern werden die vereinbarten Soll-Termine als Soll-Stützstellen angesehen, die in die Simulationsexperimente einzubinden sind. Sollten sich diese unter verschiedenen Modellierungen nicht einhalten lassen, ist eine Rücksprache mit Juristen vorzunehmen, um evtl. eine Lösung infolge möglicher Vertragsauslegungen zu finden. Falls dies ebenfalls zu keinem Ergebnis führt, ist die Nachweisführung bereits an der Erstellung eines geeigneten Soll(0)-Bauablaufmodells gescheitert. Unter Umständen ist dann – soweit dies Juristen als möglich einschätzen – ein von Grund auf neues Soll(0)-Bauablaufmodell auszuarbeiten.

[1669] Zum Beispiel: Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Rdn. 1573 ff.

[1670] Vgl. Drittler, 2017: Rdn. 4:221. Bei der *Measured-Mile-Methode* werden Produktivitätskennwerte einer „hypothetisch ungestörten Vergleichsstrecke" des Ist-Bauablaufs entnommen und zum Vergleich herangezogen. Hiermit sollen Rückschlüsse auf die erbrachte Produktivität erlangt werden. Vgl. Eden/Williams/Ackermann, 2005: S. 135-139.

[1671] Drittler, 2017: Rdn 4:220.

[1672] *Gnerlich et al*. stellen eine geeignete Vorgehensweise vor. Vgl. Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 455.

Zusammenfassend soll der Anwender durch sein Expertenwissen die Fragestellungen der Machbarkeit und Plausibilisierung beantworten. Genau wie bei der Anwendung der Netzplantechnik muss der Anwender eigenständig entscheiden, wie er sein Arbeitsziel erreichen möchte. Entsprechend sollte er seine Vorgehensweise begründen können. Daher wird nicht auf die konkrete Vorgehensweise zur Bewertung eines machbaren und plausiblen Bauablaufs eingegangen, sondern auf die Arbeitsmittel, die dem Anwender zur Verfügung stehen.

Mit dem Benchmarking wird eine Technik aus der Durchführung von Simulationsstudien vorgeschlagen, deren Eignung für baubetriebliche Gutachten bisher nicht getestet wurde und daher eher als theoretischer Lösungsvorschlag anzusehen ist. Bei diesem Ansatz ist davon auszugehen, dass die möglichen Kombinationen zur Erstellung eines „Blutbilds" sehr hoch sein können. Beispielsweise ließen sich die Arbeitsproduktivität und die Berücksichtigung verschiedener gewichteter Zeitaufwandswerte für alle simulierten Agenten vornehmen. Zudem zeigt der Testlauf mit dem Gerüstaufbau, dass die Agenten unterschiedliche Teilaufgaben erledigen können (siehe *Abbildung 7-18* in *Kapitel 7.1.4*). Die berechenbaren Produktivitäten führen ggf. zu Überlagerungen und zu unscharfen Ergebnissen.

Das Benchmarking stellt ein umfangreiches Forschungsthema dar und wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter vertieft.

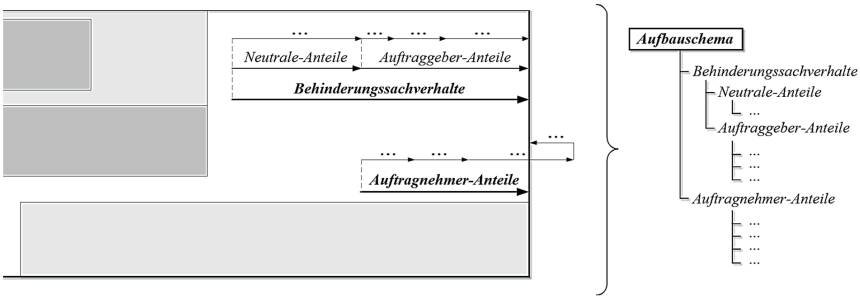
8.4 Konzeptioneller Entwurf zur Zeitmessung monetärer Ansprüche

Zur Untersuchung *monetärer Ansprüche*[1673] muss der *zeitliche Mehraufwand* nachgewiesen werden, der nicht mit den Zeitabweichungen überschrittener Vertragstermine zusammenzuliegen braucht.[1674] Vielmehr ist die Untersuchung der maßgeblichen Zeitänderungen eines realisierbaren Bauablaufmodells notwendig. Auf ermittelbare Mehrkosten wird jedoch *nicht* eingegangen.[1675] Stattdessen folgt eine konzeptionelle Vorgehensweise, mit der sich der zeitliche Mehraufwand während der simulationsbasierten Fortschreibung hinreichend ermitteln lässt.

Der abstrakte Entwurf geht von einer Softwarelösung aus. Ziel ist die Unterscheidung einzelner Zeitanteile auf Basis der jeweiligen Anspruchsgrundlagen. Den Ausgangspunkt bilden die nach *Kategorien* gegliederten *Zeitvektoren*, die der Anwender im Verlauf der Fortschreibung den Gruppenintervallen hinzufügt.[1676] Aus dieser Gliederung lässt sich ein abstraktes ***Aufbauschema*** ableiten, das *keine* Zeitvektoren besitzt, sondern lediglich ihre Struktur. *Alle* internen Vorgangsintervalle erhalten dieses Aufbauschema. In der folgenden *Abbildung 8-18* wird dieses Prinzip schematisch in *zwei Schritten* veranschaulicht.

[1673] Siehe *Kapitel 4.3*.
[1674] Siehe *Kapitel 4.4.8*.
[1675] *Zanner et al*. erläutern übersichtlich, welche verzögerungsbedingten Mehrkosten für die Anspruchsberechnung entstehen können. Vgl. Zanner/Saalbach/Viering, 2014: S. 104-113. Siehe auch *Tabelle 3-2* in *Kapitel 3.4.2*.
[1676] Siehe *Kapitel 8.2.6*.

Schritt 1 – Herleitung des Aufbauschemas anhand der Zeitvektoren:



Schritt 2 – Verteilung des Aufbauschemas auf die internen Vorgangsintervalle:

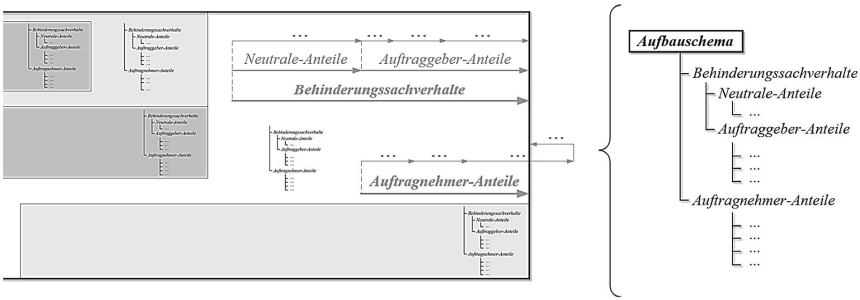


Abbildung 8-18: Herleitung des Aufbauschemas aus den Zeitvektoren des Gruppenintervalls[1677]

Das Aufbauschema muss sich *automatisch* dem *Gruppenintervall* anpassen, sobald in der momentanen Einzelfallbetrachtung Zeitvektoren erstellt oder entfernt werden. Ergänzend kann den internen Vorgangsintervallen mitgeteilt werden, mit welchem Zeitvektor – bzw. mit welcher *Kategorie* – der Anwender eine simulierte Zeitabweichung abgreift. Beim Abgreifen zeichnen *alle* internen Vorgangsintervalle ihre *momentanen Zustandsinformationen* auf und hinterlegen sie in die betreffende Kategorie ihres Aufbauschemas. Sie sind dadurch nach den einzelnen Kategorien *sortiert* und über die internen Vorgangsintervalle voneinander *getrennt*.

Mit dem in *Kapitel 6* beschriebenen Simulationskonzept lassen sich alle simulierten Informationen über die Segmente und Vorgangsintervalle abfragen. Dies kann in allen Intervallebenen oder durch beliebig definierte Gruppenintervalle erfolgen. Hierdurch sind umfassende Zeitmessungen mit einem Zugriff auf alle Produktionsfaktoren und -bedingungen je Arbeitsaufgabe möglich, wie

- messbare Vorhaltezeiten,
- vorgangsbezogene Leistungsdauern,
- einzelne Arbeitszeiten der eingesetzten Kapazitäten,
- ausgeführte Arbeiten der Agenten,
- zeitlicher Verbrauch von Materialien.

[1677] Eigene Darstellung.

Mit speziellen Filterfunktionen könnten nichtproduktive Vorgangsdauern, wie Aushärte- und Trocknungszeiten, gezielt ausgewählt oder vernachlässigt werden.

Es besteht zudem die Möglichkeit, für jede Kategorie ein eigenes ***Veränderungsprotokoll*** i. S. v. *Abbildung 8-19* zu erstellen. Darin ließen sich angehängte Informationen über das jeweilige interne Vorgangsintervall festhalten, die im Rahmen einer momentanen Einzelfallbetrachtung simuliert wurden. Ein solcher Ansatz würde es ermöglichen, dass die simulierten Zeitabweichungen in verschiedenen Detaillierungsgraden aufgezeichnet werden, wobei der Anwender die Zeitmessung am Gruppenintervall vornimmt.

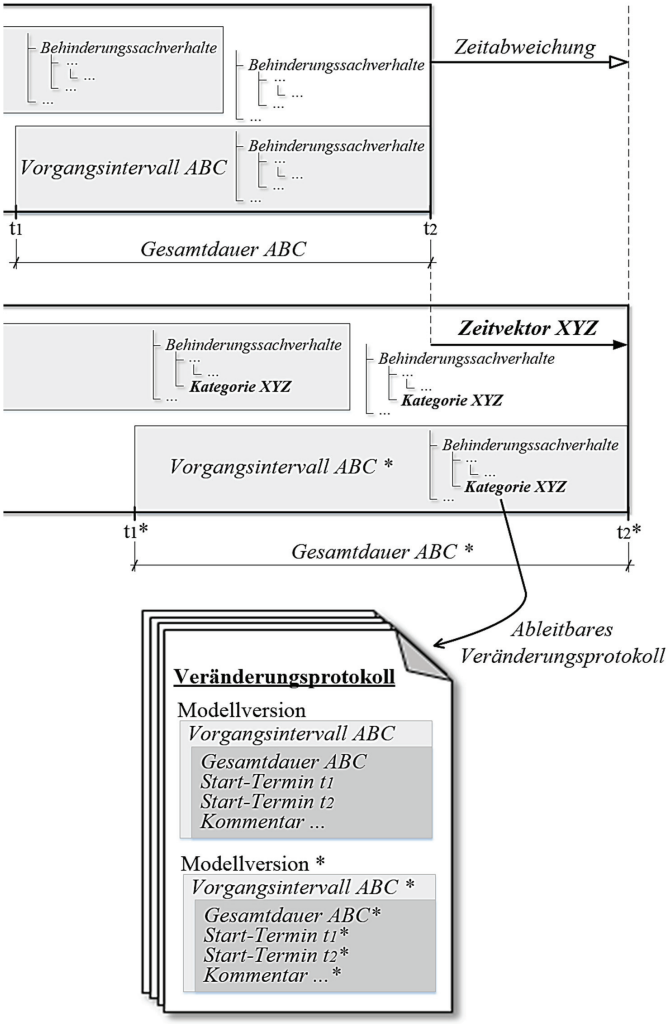


Abbildung 8-19: Skizze des Veränderungsprotokolls[1678]

[1678] Eigene Darstellung.

Die in *Abbildung 8-19* gezeigten Inhalte des Veränderungsprotokolls sind nur beispielhafte Informationen, die sich je nach Implementierung durchaus umfangreicher gestalten. Darin könnten Informationen aus den simulierten Prozessen oder weiterführende Berechnungen enthalten sein. Darüber hinaus lassen sich die *Zeitvektoren* mit *Ist-Anhaltspunkten* verknüpfen. Dadurch besteht ein umfassender Zugriff zwischen den konkreten Informationen und den gemessenen Zeitwirkungen. Weiterhin ist neben dem Zugriff auf die Dokumente der Ist-Anhaltspunkte ebenso ein umfassender Abruf der im Bauablaufmodell platzierten Marker möglich. Diese sind an die internen Vorgangsintervalle gekoppelt und erlauben Abfragen simulierter Ausführungsprozesse. Letztere stehen wiederum mit den Bauteilmodellen des BIM-Gebäudemodells in Verbindung.

Im Rahmen der prototypischen Implementierung gem. *Kapitel 6* wurden lediglich die Voraussetzungen zur Erstellung von Veränderungsprotokollen getestet. Das Thema wird nicht weiter vertieft, da es den Umfang der vorliegenden Arbeit überschreiten würde.

Die *haftungsbegründende Kausalität* monetärer Ansprüche wird analog zu den fristverlängernden Ansprüchen ausgearbeitet.[1679] Sie erfolgt über die *Stützstellenverifizierung* und *-validierung*. Im Gegensatz dazu kann die *haftungsausfüllende Kausalität* über die im Veränderungsprotokoll erfassten Abweichungen hergeleitet werden. Für eine Darlegung lassen sich die darin enthaltenen Inhalte auf die offenen Sachfragen „zuspitzen". Dafür kann der Anwender die relevanten Informationen dem Gesamtmodell entnehmen.

Zusammenfassend ist der entwickelte BIM-basierte Simulationsansatz in der Lage, sehr große und stark vernetzte Datenmengen bereitzustellen. Es könnte daher der Eindruck entstehen, diese Daten seien zu umfangreich und würden die Anforderungen des Anwendungszwecks überschreiten. Allerdings besteht ein Vorteil darin, dass gegenüber einzelnen, „losen" Aktenordnern alle verfügbaren Informationen ganzheitlich strukturiert vorliegen. Hieraus lässt sich gezielt eine *konkrete bauablaufbezogene Darstellung* ordnen. Ein Anwender kann selbst entscheiden, welche Informationen er benötigt, um seine Darstellung zu konkretisieren.

8.5 Vorläufige Untersuchungsergebnisse

In einer an der Universität Kassel eingereichten Masterarbeit wurde die Soll-zu-Ist-Modifikation zur Nachweisführung von Fristverlängerungsansprüchen eines Ausbauprojekts *manuell* berechnet.[1680] Um die Eignung zu prüfen, fand eine Gegenüberstellung mit zwei anderen baubetrieblichen Nachweisverfahren[1681] aus der Praxis statt. Alle drei Nachweisverfahren konnten *bestehende* Fristverlängerungsansprüche darstellen. Unter anderem ließ sich für Malerarbeiten einheitlich eine Anspruchshöhe von *zehn* Arbeitstagen ermitteln.[1682]

Im Vergleich zu den anderen Nachweisverfahren mit ihren „starren" Vorgangsbalken als vordefinierte Zeiträume bietet die Soll-zu-Ist-Modifikation aufgrund interner Vorgangsintervalle variable Zerlegungsoptionen für feingliedrigere Untersuchungen. Dadurch sind ihre Bauablaufmodelle flexibel, um Umstellungen der Ablaufreihenfolgen zu testen und Ausweichmöglichkeiten zu identifizieren. So konnte infolge getesteter Ablaufumstellungen

[1679] Siehe *Kapitel 8.2.8* i. V. m. *Kapitel 8.3*.
[1680] Vgl. Weigel, 2017: S. 99 ff.
[1681] *Adaptionsverfahren* nach *Mechnig et al*. und das von *Heilfort* entwickelte *Bauablauf-Differenzverfahren*. Vgl. Mechnig/Völker/Mack/Zielke, 2014; Heilfort, BauR 2003: 1647.
[1682] Vgl. Weigel, 2017: S. 125.

die ursprüngliche Anspruchshöhe um vier Arbeitstage reduziert werden, ohne parallel arbeitende Gewerke in ihren Ausführungen zu beeinträchtigen.[1683] Demnach eignet sich die Soll-zu-Ist-Modifikation zur Ermittlung versteckter Zeitreserven oder eingeleiteter Beschleunigungsmaßnahmen.[1684] Damit kann sie die auftragnehmerseitigen Anforderungen der Rechtsprechung zur schlüssigen Darlegung von Behinderungstatbeständen in einem komplexen Gefüge unter Berücksichtigung von Ausweichmöglichkeiten oder Gegenmaßnahmen besonders gut erfüllen.[1685] Zudem lässt sich ein Soll-Bauablaufmodell aufgrund der topologisch verteilten Zeitaufwandswerte plausibler darstellen.[1686]

In einigen Fällen war es schwierig, die Soll-zu-Ist-Modifikation anzuwenden, da der Vergleich zwischen den tatsächlichen Ist-Anhaltspunkten und dem Soll-Bauablaufmodell nicht sofort nachvollziehbar war.[1687] Dies wird jedoch *nicht* als Problem angesehen, weil es sich um einen Hinweis auf bestehende Komplexität handelt, die es zu bewältigen gilt.[1688] Ein Soll-Ist-Vergleich mit zwei Vorgangsbalken aus zwei Balkenplänen könnte dagegen die Komplexität faktisch logischer Prozessabläufe ignorieren und damit hypothetisch sein.

Die Soll-zu-Ist-Modifikation stößt bei Handrechnungen schnell an ihre Grenzen. Zum Beispiel besteht ein hoher Aufwand zur Ermittlung der objektorientiert-verteilten Zeitaufwandswerte.[1689] Dieser ließe sich durch eine Computeranwendung erheblich unterstützen und reduzieren. Abhilfe kann die entwickelte BIM-basierte Bauablaufsimulation liefern.[1690] Eine funktionstüchtige Schnittstelle sollte daher in weiterführenden Untersuchungen herausgearbeitet werden.

Einschätzungen durch Experten zum digitalen Nachweisverfahren folgen in *Kapitel 9.2* und sind teilweise mit den Erkenntnissen des *Kapitels 7.3.2* in Zusammenhang zu bringen.

Im Folgenden wird die simulationsbasierte Soll-zu-Ist-Modifikation mit den von *Tiesler* gebildeten Kriterien der einschlägigen Rechtsprechung diskutiert.[1691]

[1683] Vgl. Weigel, 2017: S. 125-127.
[1684] Vgl. Weigel, 2017: S. 160.
[1685] Vgl. Weigel, 2017: S. 141.
[1686] *Ashby* schreibt, dass die Wissenschaft immer nach Verallgemeinerungen, Aussagen, die für eine Reihe von Experimenten gelten sollen, sucht. Dies ist aber in den meisten Fällen nicht durch die Realität gegeben. Vgl. Ashby, 1957: S. 121. Vgl. Weigel, 2017: S. 137.
[1687] Vgl. Weigel, 2017: S. 161.
[1688] Vgl. Weigel, 2017: S. 161.
[1689] Vgl. Weigel, 2017: S. 161; Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: S. 455 ff.
[1690] So auch Weigel, 2017: S. 161.
[1691] I. A. a. Tiesler, 2018: S. 79-86 (Tabelle 3-4).

Tabelle 8-4: Kommentierung der Soll-zu-Ist-Modifikation i. A. a. Kriterien von Tiesler[1692]

Kriterien nach *Tiesler*	**Statement**
1. Nachweis der Störungsursache	Der Nachweis der Störungsursachen kann in weiten Teilen erfüllt werden. Im Wesentlichen kommt es darauf an, welche Informationen in den *Ist-Anhaltspunkten* hinterlegt sind.
1.1 Nachweis des hindernden Umstands	Der Nachweis des hindernden Umstands ist in weiten Teilen erfüllbar, wenn Sachverhalte für die Simulation *modelliert* oder durch *belegbare Dokumente* bekräftigt werden. Vorausgesetzt wird das Vorliegen einer aussagekräftigen Dokumentation.
a) Nachweis der zufälligen Mengenänderung	Die Anforderung einer zufälligen Mengenabweichung von mindestens *10 %* findet Berücksichtigung unter der Anwendung des *Leistungsmengen-Normierungskonzepts* (ergänzend: *Kapitel 5.2.5*).
b) Nachweis der (angeordneten) Nachtragsleistung	Das Vertrags-Soll aus § 2 Abs. 5, 6 VOB/B ist nur durch die *Modellierung der Sachverhalte* zu erzielen, damit diese überhaupt simuliert werden können. Aus diesem Grund kann die Soll-zu-Ist-Modifikation durchgängig den Nachweis einer (angeordneten) Nachtragsleistung in Abhängigkeit vom *Nutzerverhalten* erfüllen.
c) Nachweis der Pflichtverletzung	Der Nachweis der Pflichtverletzung wird durch die *Stützstellenverifizierung* abgebildet. Der Umfang der Pflichtverletzung entsteht aus den Darstellungen der in den *Anhaltspunkten* hinterlegten Dokumente. Hierfür bietet die Soll-zu-Ist-Modifikation *keine* Lösungsvorschläge. Allerdings verfügt sie über eine Unterstützungshilfe durch die Platzierung von *Markern*. Der substantiierte Vortrag des Auftragnehmers kann sehr umfangreich in Abhängigkeit von der Simulationsmodellierung erfolgen. Für die Substantiierung des auftraggeberseitigen Verzugs schneidet und verknüpft der Simulator die Vorgangsintervalle in kleine Segmente. Ein sachlogischer Zusammenhang ist über ein Raum-Zeit-Gefüge zu erzielen, der für einen substantiierten Vortrag hilfreich sein kann. Zudem kann der Sachverhalt durch die *ein-* und *ausblendbaren Vorgangsintervalle* substantiiert bestritten werden.
d) Nachweis der Obliegenheitsverletzung	Die Testläufe mit dem Simulator zeigten, dass sich zeitlich auseinanderliegende Anfangstermine unterschiedlich auf den Fertigstellungstermin auswirken können. Mitwirkungshandlungen, definiert durch *zwei untereinander gekoppelte Termine* (*DisruptionMS*), haben das Potential, Verschiebungen auszulösen. Der Nachweis des Annahmeverzugs ist durch die alleinige Anwendung der Soll-zu-Ist-Modifikation *nicht* gewährleistet. Der Anwender muss entsprechende *Ist-Anhaltspunkte* definieren, aus denen das Verhalten des Auftraggebers abzuleiten ist.
e) Nachweis von unabwendbaren Umständen	Beispielsweise ist der Nachweis „anomaler" Witterungseinflüsse durch eine *faktorielle Gewichtung der Umwelt* zu testen. Inwieweit mit diesen hätte gerechnet werden können, ist eine Fragestellung, die durch das simulationsbasierte Nachweisverfahren *nicht* beantwortet werden kann.
1.2 Nachweis der Anspruchsvoraussetzungen	Durch die *Stützstellenverifizierung* können *belegbare Dokumente* oder in *Textform verfasste Behauptungen* mit den Sachverhalten in Verbindung gebracht werden. Ob sich die Offenkundigkeit eines hindernden Umstands gem. § 6 Abs. 1 VOB/B ableiten lässt, ist *nicht* durch die alleinige Anwendung des simulierten Nachweisverfahrens bestimmbar. Dies trifft ebenso für Mehrkostenanzeigen, Nichtannahmen, ungeklärte Nachtragsangebote oder Vorbehalte von zeitabhängigen Ansprüchen wegen Bauzeitverlängerungen zu.

[1692] Eigene Darstellungen.

a) Nachweis der Anspruchsvoraussetzung nach § 6 Abs. 1 VOB/B (zu 1.1 c-e)	Der *konkrete* Vortrag und Nachweis ist bei der Soll-zu-Ist-Modifikation ausschließlich anhand der *Ist-Anhaltspunkte* zu führen. Die Prüfung einer unentbehrlichen Anzeige ist eher eine Herausforderung, die durch eine Vertragsauslegung zu klären ist. Die Simulation kann nur zeigen, ob ein Zustand von einem Bauablaufmodell unter verschiedenen Voraussetzungen erreichbar oder nicht erreichbar ist. Daher ist sie allenfalls zur Entscheidungsunterstützung von Vertragsauslegungen geeignet.
b) Nachweis zum Vorbehalt (zu 1.1 b)	Ob ein Nachtragsangebot unter Vorbehalt vorliegt, kann *nicht* durch die alleinige Anwendung der simulationsbasierten Soll-zu-Ist-Modifikation nachgewiesen werden. Eine Entscheidungshilfe zur Beurteilung des Vorhandenseins solcher Tatsachenbehauptungen lässt sich durch eine geeignete Gestaltung der Dokumente in den Ist-Anhaltspunkten untermauern. Eine konkrete Ausarbeitung der Darlegung war kein Gegenstand der vorliegenden Arbeit.
c) Nachweis der Mehrkostenanzeige (zu 1.1 b)	Die Darlegung von Mehrkostenanzeigen i. S. v. § 2 Abs. 6 VOB/B erfolgt wie oben über eine geeignete Gestaltung der Dokumente in den Ist-Anhaltspunkten.
d) Nachweis des Annahmeverzugs (zu 1.1 d)	Der Nachweis findet über eine bestehende Leistungsbereitschaft statt. Sie *ist zu simulieren*, indem Arbeitskräfte als Agenten definiert werden. Sollten diese aufgrund eines *modellierten Störungssachverhalts* ihre vorgegebenen Arbeitsaufgaben nicht erledigen, sind sie trotz „Anwesenheit“ zum Leisten nicht imstande.
1.3 Dokumentation der Störungsursache	Die Erstellung von Dokumentationen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit *nicht* betrachtet. Allerdings hat der Anwender die Möglichkeit, entsprechende *Anhaltspunkte* auszuarbeiten, um so eine „ausreichende“ Dokumentation in das Nachweisverfahren einzubinden.
2. Nachweis der einzelvorgangsbezogenen Störungsfolge (unmittelbare Zeitfolge)	Der konkrete Nachweis der haftungsbegründenden Kausalität i. S. v. § 286 ZPO wird durch *Ist-Anhaltspunkte* unterstützt. Entstehungsgründe von Behinderungen sind mithilfe der *Stützstellenvalidierung* baubetrieblich zu ermitteln und zu bewerten.
2.1 Nachweis des Soll-Bauablaufs (Zeit)	Die Soll-zu-Ist-Modifikation setzt grundsätzlich einen hypothetisch ungestörten Bauablauf als Ausgangssituation voraus.
a) Darstellung der Soll-Kapazitätsplanung	Die Darlegung des Soll-Bauablaufs und der darin geplante Arbeitskräfteeinsatz entstehen zwangsläufig aus der *Simulationsmodellierung*, da über die Agenten die Produktionsabläufe in Abhängigkeit von den Aufgabendefinitionen stattfinden.
b) Soll-Bauablauf gemäß Vertragsterminplan	Die Vereinbarung eines verbindlichen Bauzeitenplans würde die Nutzung der Soll-zu-Ist-Modifikation nicht beeinträchtigen, da davon ausgegangen wird, dass ein Bauzeitenplan auch nachträglich noch rekonstruiert werden kann (siehe *Kapitel 4.4.7*). In der Soll-zu-Ist-Modifikation werden Störungen grundsätzlich auf Basis des vertraglichen Soll-Bauablaufplans fortgeschrieben. Durch die *Verifizierung* und *Validierung* der Soll- und Ist-Bauablaufmodelle wird *durchgängig* zwischen der kalkulierten Bauablaufplanung und etwaigen Verzögerungsdauern unterschieden.
c) Bezug der Bauablaufplanung zur Urkalkulation	Ob die ursprüngliche Bauablaufplanung der Urkalkulation entspricht, ist ein schwieriges Ziel, das wie bei der Netzplantechnik *nicht* allein durch die Anwendung der simulationsbasierten Soll-zu-Ist-Modifikation erreicht werden kann. In der Praxis stimmt die Terminplanung in einigen Fällen nicht mit der Urkalkulation überein. Teilweise ist darüber hinaus eine nachträgliche Zerlegung der ursprünglichen Bauablaufplanung notwendig. Dies hängt von den Fähigkeiten des Anwenders ab. Konkrete Lösungsvorschläge wurden daher *nicht* erarbeitet.

d)Auskömmlichkeit der Soll-Zeit bei Soll-Kapazitäten der Preiskalkulation	Der Nachweis zur Überschreitung der Preiskalkulation der Soll(0)-Bauzeit besitzt einen hypothetischen Charakter. So kann eine maßgebliche Gesamtbauzeit aus der Preiskalkulation abgeleitet und in detailliertere Vorgänge zerlegt werden. Dadurch lassen sich Störungen einarbeiten. Dies ist eine grundsätzliche Herausforderung, die bei der Netzplantechnik und bei der Simulation besteht. Zur Ermittlung auskömmlicher Zeiten wurden in *Kapitel 8.3* Plausibilitäts- und Machbarkeitsstudien vorgeschlagen. Weitere Lösungsansätze liefern *Gnerlich et al*. (2018).
e) Störungsmodifizierter Soll-Bauablauf als Vergleichsbasis	Die Soll-zu-Ist-Modifikation beruht auf dem Prinzip, dass ein vertragliches Soll-Bauablaufmodell um die behindernden Störfälle *modifiziert* und somit *fortgeschrieben* wird. Ob der Auftragnehmer das Bauvorhaben mit seinen vorkalkulatorischen Ansätzen hätte einhalten können, wird bei der Soll-zu-Ist-Modifikation durch die Definition zeitdiskreter Vertragstermine überprüft, die für die Zeitmessungen der Bauzeitverlängerungen vorausgesetzt werden.
2.2 Erläuterung der Kausalität: Störungsursache/direkte Zeitfolge	Der Zusammenhang zwischen Störungsursache und direkter Verzögerungsfolge bilden definierbare *Zeitvektoren* ab. Zudem können aus der *Chronologie* detailliertere Angaben abgeleitet werden, aus denen hervorgeht, welcher hindernde Umstand ursächlich für eine nicht ausführbare Arbeitsaufgabe war. Darüber ist die Darstellung der Auswirkungen auf die Baustelle möglich.
2.3 Beschreibung der Art	Eine konkret nachvollziehbare Beschreibung der Behinderungsfolge ist über die *Simulationsmodellierung* und Gestaltung von *Ist-Anhaltspunkten* zu erreichen.
2.4 Beschreibung des Umfangs *2.5 Nachweis der Verzögerungsdauer*	Die *Bauzeitchronologie* dient der konkret nachvollziehbaren Darstellung beliebiger Behinderungsfolgen. Daraus wird die Dauer einer nach § 286 ZPO begründeten Behinderung abgeleitet.
2.5.1 Berücksichtigung von Umständen, die gegen eine Behinderung sprechen	Jene Auswirkungen, die gegen die Wirkungen eines Behinderungsereignisses sprechen, werden bei der Soll-zu-Ist-Modifikation i. A. a. eine Simulationsstudie durch die *Verifizierung* und *Validierung* geprüft. Auf die tatsächliche Wirkung einer Verzögerung wird in *Kapitel 4.5* eingegangen. Die *direkte* Gegenüberstellung eines Soll- und Ist-Bauablaufmodells findet bei der Soll-zu-Ist-Modifikation *nicht* statt. Vielmehr werden mögliche Entwicklungsabläufe eines realisierbaren Bauablaufs ermittelt und darüber die Auswirkungen sukzessiv festgestellt. Weitere baubetriebliche Aspekte erfolgen mit der Verifizierung und Validierung, um konkrete Tatsachenbehauptungen und die damit verbundenen Produktivitäten zu berücksichtigen.
a) Umstellungen des Bauablaufs	Möglichkeiten, Bauabschnitte vorzuziehen, regeln die Agenten eigenständig in Abhängigkeit von der vorgegebenen Fertigungsrichtung (= „Selbstorganisation“).
b) Verkürzung von Vorlaufzeiten	Diese Prüfung basiert *nicht* auf der alleinigen Anwendung der simulationsbasierten Soll-zu-Ist-Modifikation. Diese Aufgabe ist durch den Anwender zu *modellieren*.
c) Zeitreserven	Untersuchungen zeigten, dass freie Pufferzeiten bei der Anwendung der Soll-zu-Ist-Modifikation übergangen werden könnten, *solange* diese nicht explizit durch die Gruppenintervalle berücksichtigt werden. Gesamtpufferzeiten sind hingegen sehr aussagekräftig in den baubetrieblichen Nachweisführungen erfassbar. Ebenfalls lassen sich versteckte Pufferzeiten in den Produktionsabläufen gut aufdecken.

d) Weitere Beschleunigungs-maßnahmen	Ein generelles Problem besteht darin, dass die Bauzeit nicht unter Vernachlässigung durchgeführter Beschleunigungsmaßnahmen festgestellt werden darf. Die dadurch ggf. ableitbaren Behinderungsfolgen, wie etwa „Leerarbeit“ oder „Leerkosten“, sind möglichst mit der Dokumentation zu erfassen. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass solche Aufzeichnungen in einer vollständigen Form dokumentiert werden können. Dies hat Auswirkungen auf jede Bauzeitanalyse. So ist bei jeder rekonstruierten Bauzeit immer ein gewisser Grad von Unkenntnis gegeben. Untersuchungsmöglichkeiten bietet die simulationsbasierte Soll-zu-Ist-Modifikation über das Agentenverhalten im BIM-Gebäudemodell und über die Verifizierung und Validierung.
2.5.2 Bezug zum Ist-Bauablauf (zeitlich)	Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation findet regelmäßig ein Abgleich des geplanten und modifizierten Soll-Bauablaufmodells über die Anhaltspunkte statt. Eine abstrakte Ermittlung der Verzögerungswirkung ist aus baubetrieblicher Sicht *unvermeidbar* (siehe *Kapitel 4.5*). Jedoch kann dies *objektiv* erfolgen, wenn *plausible* und *machbare Produktivitäten* ermittelt und in den Analysen berücksichtigt werden. Bei der Soll-zu-Ist-Modifikation wird der tatsächliche Bauablauf nicht nur als Vergleichsgröße zur Begrenzung eines abstrakt ermittelten Anspruchs auf Bauzeitverlängerung herangezogen, sondern auch durch die Validierung und Verifizierung erbracht.
2.5.3 Nachweis der Leistungsbereitschaft	Wenn der Simulationsanwender in seinen Prozessbeschreibungen Arbeitskräfte *als Voraussetzungen* definiert, ist ihm die Darlegung von tatsächlich ausreichenden Arbeitskräften möglich. Mithilfe der Verifizierung und Validierung könnten Umstände ausgeschlossen werden, die zu einer Störung seitens des Auftragnehmers geführt haben. Für diese Logik-Prüfungen besteht jedoch ein weiterer Forschungsbedarf.
2.6 Bauablaufbezogene Darstellung	Das *entwickelte Darstellungskonzept* dient der *bauablaufbezogenen Darstellung* von Störungssachverhalten und zeitlichen Behinderungsfolgen. Durch die Simulation lassen sich die Bauabläufe innerhalb des digitalen Bauwerkmodells realitätsnah nachbilden und sorgen für ein besseres Verständnis. Das Darstellungskonzept ist zudem für den Einsatz digitaler Methoden ausgerichtet. Darüber hinaus sind dynamische Abbildungen möglicher Produktivitäten durch *geschwindigkeitsabhängige und/oder eingefärbte Animationen* visualisierbar. Zudem lassen sich Balkenpläne oder Leistungskurven usw. daraus ableiten. Die trennscharfe Darstellung von Ursache und Wirkung wird durch die diskrete *Modifizierung* der Bauablaufmodelle begünstigt. Die Beschreibung der Ursachen erfolgt durch *definierbare Ist-Anhaltspunkte*. Eine Beurteilung, ob die Baustelle tatsächlich mit ausreichenden Arbeitskräften besetzt war, ist hauptsächlich eine Frage der Dokumentation und somit *kein* Bestandteil des Nachweisverfahrens. Innerhalb der Simulation können unstreitige und streitige Umstände abgebildet werden. Ihre Zeitmessungen, gegliedert in der *Bauzeitchronologie*, ermöglichen Abgrenzungen verschiedener Wirkungsanteile. Die Soll-zu-Ist-Modifikation wurde für eine bauablaufbezogene Darstellung entwickelt.
2.7 Aussagekräftige Dokumentation der Behinderungsfolge	Die Dokumentation ist *kein* Bestandteil der Soll-zu-Ist-Modifikation. Orientierung und Mitwirkung des Auftraggebers können mit den *Ist-Anhaltspunkten* beachtet werden.
3. Nachweis der Gesamtbauzeit-verlängerung	Auf die subjektiv schätzende Bewertung des Richters ist eine Einflussnahme durch baubetriebliche Gutachten möglich, wenn ihm objektive Sachverhaltsschilderungen präsentiert werden. Die Simulation von objektiven Sachverhalten ist ein Hauptanliegen bei der Durchführung von Simulationsstudien.
3.1 Nachweis des gesamten Soll-Bauablaufs	Siehe 2.1.

3.2 Erläuterung der Kausalität: direkte Zeitfolge/ Gesamtbauzeit-verlängerung	Da die Soll-zu-Ist-Modifikation die Simulation als Input nutzt, lässt sich *dynamisch* und *komplex* darstellen, inwieweit eine konkrete Behinderung mit einer bestimmten Dauer zu einer Verlängerung der Gesamtbauzeit geführt hat. Die Fülle der Details ist durch die Anwendung einer BIM-basierten Bauablaufsimulation vermeintlich überproportional gegeben. Hier muss der Anwender erkennen können, welche der generierten Informationen für seine Darlegung geeignet sind.
3.3 Einzelfallbezogene Abgrenzung der Störungssachverhalte	Die Abgrenzung zwischen verschiedenen Ursachen wird in *detaillierten Raum-Zeit-Abhängigkeiten* durch den Simulator bewerkstelligt. Zwingende Abhängigkeitsbeziehungen müssen vorgegeben werden (siehe *Sequence*-Schnittstelle in *Kapitel 6.2.5*). Welcher Anteil bei einer Bauzeitverlängerung ursächlich für die Entstehung des Schadens war, ist bei komplexen Sachverhaltsdarstellungen sachlogisch abzuleiten. Die Begründung eines Bauzeitverlängerungsanspruchs lässt sich im Sinne der Systemtheorie, und damit nach dem gewöhnlichen Lauf der Dinge, oftmals nicht eindeutig klären. Die Soll-zu-Ist-Modifikation bietet Zeitvektoren zur Messung von Überschreitungen eines Vertragstermins an, um die zeitlichen Auswirkungen modellierter Ursachen, ausgehend von einer Stützstellenverifizierung, zu messen. Die Unterscheidung zwischen vertragswidrigen und vertragsgemäßen Anordnungen erfolgt durch die Gestaltung der Zeitfaktoren innerhalb der Bauzeitchronologie.
3.4 Bezug zum tatsächlichen Gesamtbauablauf	Jede Berechnung von Bauzeitverlängerungen basiert auf fiktiven Elementen und ist damit immer abstrakt, egal ob sie tatsächliche oder geplante Bauabläufe berücksichtigt oder nicht. Baurechtliche Anforderungen sind unter den Aspekten der Rechtsklarheit und des Rechtsfriedens zu klären. Aus diesem Grund ist es erforderlich, auf die ursächlichen Merkmale eines Störungssachverhalts zurückzugreifen, die einen Behinderungsschaden begründen.
3.5 Berücksichtigung von Nachträgen	Der Auftragnehmer kann durch die Simulationsmodellierung Modifikationen am Bauablaufmodell vornehmen, um etwaige Nachträge zu verdeutlichen. Diese lassen sich innerhalb der Soll-zu-Ist-Modifikation erfassen. Mit den Zeitvektoren sind Abgrenzungen der bereits vergüteten Nachträge möglich.
3.6 Berücksichtigung von Eigenverzögerungen des Auftragnehmers	Die Bauzeitchronik ermöglicht das Abgreifen und Darlegen auftragnehmerseitiger Verzögerungen. Aspekte über Fehler der Organisation oder Durchführung des Bauvorhabens sind vom Anwender der Simulation zu berücksichtigen.
3.7 Bauablaufbezogene Darstellung	Laut Soll-zu-Ist-Modifikationen müssen alle Stützstellen erreicht werden können, damit das Gesamtgefüge eines Bauablaufs nachvollzogen werden kann. Aus diesem Grund unterliegen alle Anhaltspunkte (Stützstellen) und alle Zwischenstände eines Bauablaufmodells einer sachlogischen Kontrolle (Verifizierung und Validierung). Grafische Darstellungen zur Gesamtbauzeit lassen sich nicht nur durch Balken- oder Netzpläne veranschaulichen. Die Digitalisierung kann innovative Ansätze bieten, die ggf. aufschlussreicher sind. Jede konkrete bauablaufbezogene Darstellung erfordert den Nachweis des Verantwortungsbereichs und darum den Nachweis der Behinderungsursachen. Durch die iterative Vorgehensweise der Soll-zu-Ist-Modifikation ist der direkte bzw. trennscharfe Zusammenhang zwischen Behinderungsursache und -wirkung des rekonstruierten Bauablaufs nachzuvollziehen.
4. Nachweis des leistungsabhängigen Mehraufwands	Umstände, die für die Entstehung einer Behinderung gem. § 287 ZPO ursächlich sind, können durch die Simulationsmodellierung berücksichtigt werden. Die Auswirkung entsteht durch die Ausführung des Simulationsmodells. Erforderliche Mehraufwendungen können unter Anwendung der Soll-zu-Ist-Modifikation infolge der Plausibilitätskontrolle (Validierung) erfasst werden. Der Zusammenhang wird durch die Stützstellenverifizierung (§ 286 ZPO) und die Segmentvalidierung (§ 287 ZPO) sichtbar und mithilfe der Bauzeitchronologie differenzierbar.

4.1 Erläuterung der Kausalität: direkte Zeitfolge/ direkter Mehraufwand	Das Benchmarking ist zur Validierung der Prozessabläufe geeignet. Diese Anforderungen werden zwangsläufig durch den Simulator berechnet und ermöglichen beliebige Prüfungen. Es kann gezeigt werden, welche Arbeitskräfte ihre Tätigkeiten behinderungsbedingt zu einem späteren Zeitpunkt ausführen mussten. Dennoch wird nicht auf den Umfang einer Koordinierung und Überwachung eingegangen. Dieser Abgleich lässt sich durch die sukzessive Fortschreibung erzielen.
4.2 Nachweis des Ist-Kapazitätseinsatzes	Dies kann durch die Definition von Agenten und Arbeitszeiten erfolgen.
4.3 Berücksichtigung von anderweitigem Einsatz der Kapazitäten im Bauablauf	Der anderweitige Einsatz sowie die entsprechende Erläuterung störungsbetroffener Kapazitäten werden *nicht* explizit dargestellt. Hierfür sind entsprechende Kommentare vorzunehmen.
4.4 Berücksichtigung von anderweitigem Einsatz der Kapazitäten durch Füllaufträge	Projektübergreifende Ausweichmöglichkeiten werden explizit nicht betrachtet. Allerdings kann anhand der vorgehaltenen Kapazitäten (Agenten) ein mögliches Weiterarbeiten auf der Baustelle getestet werden.
4.5 Dokumentation des Mehraufwands	Die Darlegung des Mehraufwands erfolgt durch Soll- und Ist-Anhaltspunkte. Eine solche Differenzierung würde durch die Anwendung der Soll-zu-Ist-Modifikation automatisch zustande kommen.

9 Resümee

9.1 Fazit

Die vorliegende Arbeit umfasst eine Grundlagenforschung, in der die Themengebiete *Baubetrieb*, *Simulation und BIM* mit den Anforderungen des *deutschen Baurechts* aus baubetrieblicher Sicht zur Analyse gestörter Ausbauarbeiten aufeinander abgestimmt sind. Darüber hinaus werden in *Kapitel 5* prototypische Lösungsvorschläge zur Durchführung digitaler Bauzeitanalysen in Anlehnung an eine DAW unterbereitet. Folgende Entwicklungen fanden dafür statt:

- eine *BIM-basierte Bauablaufsimulation* mit Petri-Netzen;
- ein *baubetriebliches Nachweisverfahren* zur Zeitwirkungsanalyse (Soll-zu-Ist-Modifikation).

Beide Entwicklungen lassen sich miteinander verknüpfen und bilden zusammen das im Titel der Arbeit genannte Konzept zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation. Den Innovationsgrad der Entwicklungen schätzten die befragten Experten aus der Baupraxis durchweg sehr hoch und angemessen ein.

Alles, was simuliert werden kann, lässt sich auch manuell berechnen. Dennoch ist die Simulation in der Lage, umfangreiche Berechnungen durchzuführen, die manuell kaum wirtschaftlich zu bewältigen wären. Die Simulation führt ihre Berechnungen im Sinne eines „stupiden Automaten“ aus und kann reproduzierbare Ergebnisse liefern. Aufgrund sehr feingliedriger, diskreter Einzelfallbetrachtungen sind umfangreiche und komplexe Simulationsergebnisse möglich, die ggf. nicht sofort nachvollziehbar erscheinen. Dies ist aber kein Nachteil. Beispielsweise waren die Simulationsanwender in den durchgeführten Testläufen bestrebt, ihre Eingaben und die Simulationsergebnisse regelmäßig zu hinterfragen. Dies führte zu kritischen Analysen, wodurch die betrachteten Sachverhalte verständlicher wurden.

Mit der BIM-basierten Bauablaufsimulation können gestörte Bauabläufe zwar nicht einfacher, dafür aber sachlogischer und detaillierter ausgearbeitet werden. Der Ansatz erlaubt einen Zugriff auf die in das System eingebrachten Daten. Unter Verwendung des entwickelten Darstellungskonzepts eignet sich die Soll-zu-Ist-Modifikation für einen substantiierten Sachvortrag. Bei tiefergehenden Fragen können z. B. im Verlauf eines Gerichtsverfahrens die Simulationsergebnisse in verschiedenen Systemebenen ein- und ausgeblendet werden. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der in *Kapitel 4.5*, *Kapitel 6.1.2* und *Kapitel 8.2* entworfenen Anhaltspunkte, die den simulierten Sachverhalt mit den (entscheidungs-)relevanten Dokumenten zusammenbringen.

Der Vorbehalt, die entwickelte BIM-basierte Bauablaufsimulation könnte Spekulationen infolge „schöner Visualisierungstechniken“ auf Basis umfangreicher Hintergrundberechnungen begünstigen, ist im direkten Vergleich gegenüber Netzplanberechnungen argumentativ abwegig (siehe *Kapitel 4.5*). Eher kann weniger „getrickst“ werden, da die entwickelte Fortschreibungsmethodik viele Abhängigkeitsbeziehungen berücksichtigt und sich ein vermeintlich gewünschtes Ergebnis nur durch eine geeignete Kombination verschiedener Eingaben erreichen lässt. Erst wenn diese Voraussetzungen

erfüllt sind, gilt es, zusätzlich die Simulationsergebnisse mit belegbaren Dokumenten zu verifizieren sowie durch Plausibilitäts- und Machbarkeitsprüfungen zu validieren. Als Bewertungsgrößen der Validierung können die gewichteten Aufwandswerte – „wie ein Blutbild" – für die tatsächlich erforderlichen Produktivitäten herangezogen werden. Sobald die Werte der erzielten Produktivitäten glaubhaft sind, ist eine besonders aussagekräftige Darlegung möglich. Andernfalls sind die Simulationsergebnisse nicht stichhaltig genug.

Da baubegleitende Simulationen in der Baupraxis aufgrund der kurzfristigen und pflegeintensiven Datenaufbereitung als problematisch angesehen werden,[1693] ist davon auszugehen, dass eine simulierte, baubegleitende Nachweisführung auf vergleichbare Hindernisse stoßen könnte. Dagegen ist anzunehmen, dass für ein nachträglich erstelltes Gutachten „sowieso" eine umfassende Bauzeitanalyse durchgeführt werden muss und daher ein zeitlicher Aufwand für entsprechende Untersuchungen anfällt. Diese Beweggründe führten dazu, dass die Soll-zu-Ist-Modifikation eher als Rekonstruktionswerkzeug für Gerichtsgutachten genutzt werden sollte.

Bauzeitanalysen können mithilfe der BIM-basierten Bauablaufsimulation nur „so gut" sein, wie es die genutzten Informationen/Daten und Eingaben zulassen. Je genauer ein Detaillierungsgrad gewählt wird, desto plausiblere Ergebnisse sind möglich. Dennoch hängt der entwickelte BIM-basierte Simulationsansatz, wie bei der Netzplantechnik, von den Fähigkeiten des Anwenders ab. Die Simulation kann zwar die Erstellung eines Gutachtens unterstützen, aber nicht eigenständig bewältigen.

Vorteile der durchgeführten Entwicklungen:

- digitales Nachweisverfahren auf Grundlage BIM-basierter Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der einschlägigen deutschen Rechtsprechung;
- komplexe Bauzeitanalysen termin-, geometrie- und prozessabhängiger Konflikte (Realitätsnähe);
- dezidierte Unterscheidungen zwischen Soll- und Ist-Leistungsmengen;
- faktorielle Aufwandsverteilungen im Geometrie- und Prozessmodell;
- Modellierung prozess- und terminabhängiger Störungssachverhalte;
- Gruppierungen und Gliederungen der Aufbaustrukturen;
- Entwurf eines Darstellungskonzepts zur substantiierten Darlegung durch ein- und ausblendbare Darstellungselemente;
- chronologische Einbindung zusätzlicher Informationen über Anhaltspunkte;
- Verwalten größerer Datenmengen;
- Visualisierungsmöglichkeiten (4D-Visualisierung, Liniendiagramme, Balkenpläne etc.);
- Ausbaufähigkeit des Simulationsansatzes (infolge variantenreicher Modifizier-Transitionen);
- Anregungen zum Hinterfragen eigener Bauzeitanalysen.

Nachteilig ist, dass durch die Digitalisierung künftig viele Daten erfasst und angezweifelt werden könnten. Um sie in einen schlüssigen Zusammenhang zu bringen, ist ein höherer Arbeitsaufwand erforderlich. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass für einen

[1693] Vgl. Spiekermann, 2011: S. 146-148; Gnerlich/Tiesler/Möhring/Franz, 2018: S. 50-51.

kommerziellen Einsatz ggf. Schulungen und Fortbildungen notwendig wären. Aufgrund der voranschreitenden Digitalisierung lassen sich die beiden zuletzt genannten Aspekte voraussichtlich kaum vermeiden.

9.2 Weiterer Forschungsbedarf

Vollständige Implementierung für Feldstudien:

Das *Kapitel 7.1* zeigte, dass mit der BIM-basierten Bauablaufsimulation grundsätzlich präzise Vorgangsberechnungen beliebiger Soll(0)-Bauablaufmodelle möglich sind. Im Sinne der Soll-zu-Ist-Modifikation ließen sich mit speziellen Funktionen die Soll(0)-Bauablaufmodelle in Ist-Bauablaufmodelle überführen. Mit den prototypischen Entwicklungen wurde die Funktionstauglichkeit getestet. Evaluierungen erfolgten durch eine Expertenbefragung. Hingegen fand eine ganzheitliche Feldstudie mit Praxisbeispielen nicht statt. Eine solche Untersuchung wäre der nächste Schritt für weitere Forschungsarbeiten. Dafür müsste das vorgestellte Software-Konzept vollständig implementiert werden. Das heißt, die bisher konzeptionell entworfene Soll-zu-Ist-Modifikation sollte digital bedienbar sein, um die Simulationsergebnisse in einer tatsächlichen Nachweisführung verarbeiten zu können.

Modellierungen durch eine bessere Usability:

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt wird in den Entwürfen für eine geeignete Software-Lösung zur besseren Unterstützung bzw. Benutzerfreundlichkeit (Usability) gesehen. Dieses Forschungsfeld könnte sich sehr umfangreich und innovativ gestalten. Das Ziel sollte darin bestehen, den Umgang mit großen Datenmengen und Modellierungsaufgaben zu erleichtern. Hierzu wurden bereits Vorschläge ausgearbeitet, die noch ausbaufähig sind. Es könnten z. B. modulare Erweiterungen des Simulators zur Modifizierung der simulierten Bauablaufmodelle ausgearbeitet werden. Dazu müssten mehrere spezialisierte Transitionen als Modul aufeinander abgestimmt werden, um wie Sequenzer in einer DAW zu funktionieren (siehe *Kapitel 5.1.2* und *Kapitel 6.3*). Auch die Eingabemöglichkeiten und das Aussehen dieser Module sind forschungswürdig.

Weitere Aspekte der Usability wären Spracheingaben und -ausgaben für eine schnellere und einfachere Simulationsmodellierung. Eine solche Sprachsteuerung könnte durch einen virtuellen Assistenten künstlicher Intelligenz – begleitend – unterstützt werden. Für ein besseres Verständnis sollte er auf benutzergesteuerte Abfragen antworten und so die komplexen Zusammenhänge der Simulationsergebnisse erklären oder beeinflussen. Der entwickelte Simulator würde ihm bereits die Möglichkeit bieten, über ein ausgeführtes Simulationsmodell auf sehr umfangreiche, ganzheitlich vernetzte Informationsschnittstellen zuzugreifen.

Denkbar wäre, dass der Assistent in einer *Virtual-Augmented-Umgebung* eine Verbindung zu analogen Dokumenten herstellt und diese in die Bauzeitanalysen einbindet. Analoge Dokumente sind bspw. Schriftstücke, Aktenordner oder Ablagen. Damit wäre eine Hybridlösung zwischen Schreibtisch- und Computerarbeit möglich. Da es gem. *Kapitel 4.4.1* auf rechtswissenschaftliche Anforderungen ankommen kann, ist (derzeit) davon auszugehen, dass eine menschliche Prüfung der digital erzielten Analyseergebnisse

notwendig bleibt. Schließlich arbeitet eine erfahrene Fachkraft immer mit ihren Kunden zusammen. Auch in diesem Bereich sind Forschungsarbeiten erstrebenswert.

Prinzipiell könnten die gewonnenen Simulationsergebnisse in Papierform ausgedruckt werden. Wie und mit welchen Inhalten sie dargestellt werden, ist ebenfalls forschungswürdig.

Erweiterungen des Simulationsansatzes:

Der Petri-Netz-Simulator wurde eher konzeptionell entworfen. Weitere Forschungen könnten sich auf die Erzielung einer effektiveren Berechnungsgeschwindigkeit konzentrieren. Zudem wurden ausschließlich Kollisionen von 2D-Flächen im virtuellen 3D-Raum betrachtet. Das Prinzip geometrischer Kollisionen ließe sich auf 3D-Körper erweitern, z. B. auf Türen oder andere Einbauteile. Um dies zu erreichen, ist eine geometrische Kollisionsprüfung im virtuellen 3D-Raum (*Clash-Detection*) erforderlich, die voneinander abhängige Bauteile identifiziert und gem. *Kapitel 6.2.5* blockiert und deblockiert.

Außerdem wurde im vorgeschlagenen Simulationsansatz die Baulogistik nur durch Agentenbewegungen auf einem konstanten Wegenetz bestimmt. Die Agenten bildeten lediglich Arbeitskräfte ab. Ein Forschungsbedarf besteht in der Erweiterung von Aufzügen oder Baumaschinen. Die Entwicklung zur automatischen Erstellung eines Wegenetzes könnte erforscht werden.

Forschungsmöglichkeiten zu Komplexitäten und Produktivitäten:

Überdies wäre eine Untersuchung der Schneidlinien interessant. Versuche zeigten, dass diese vor allem bei komplexen Situationen des Bauablaufs häufiger auftreten und näher zusammenliegen. Ob daraus ein Grad der Komplexität ermittelt werden kann, ist noch ungeklärt. Für ein baubetriebliches Gutachten ließe sich hieraus ggf. die Erkenntnis gewinnen, in welchen „Komplexitäts-Sphären" die Bauzeitanalyse einzustufen ist. Unter Umständen kann davon ausgegangen werden, dass ein möglicher Erklärungsbedarf bei vielen Schnitten höher ausfällt, als bei wenigen Schnitten.

Zudem besteht hinsichtlich des Benchmarkings eine weitere Forschungsmöglichkeit. Es müssten Erkenntnisse erlangt werden, anhand welcher Daten eine geeignete Validierung durchgeführt werden kann. Auch die Frage, ob dieser Ansatz überhaupt geeignet ist, sollte geklärt werden. Ein befragter Fachanwalt äußerte hierzu, dass die Möglichkeiten der Produktivitätsanalyse zur Erstellung eines Privatgutachtens aus Sicht des Auftragnehmers zu hoch gesetzt sein könnten, da sich erhöhte Anforderungen i. d. R. erst im Verlauf eines Rechtsstreits ergeben. Hingegen sah er diesbezüglich Vorteile bei der Erstellung unparteilicher Gerichtsgutachten. Darüber hinaus ist zu klären, in welchem Umfang ein Benchmarking durchgeführt werden könnte, ohne die aus rechtlicher Sicht unerwünschte Qualität eines Anscheinsbeweises zu erreichen.

Baubetriebliche Forschungsschwerpunkte:

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in zukünftigen Gerichtsverfahren – insbesondere unter Berücksichtigung der neuen Rechtsnormen aufgrund der Bauvertragsrechtsreform – neue Anforderungen zustande kommen. Möglicherweise könnte dann die BIM-basierte Bauablaufsimulation zur Herleitung *tatsächlich erforderlicher Kosten* geeignet sein, da sich mit ihr sehr plausible Bauzeitanalysen durchführen lassen. Derartige Forschungsarbeiten

wurden bereits von Auftragnehmer- und Auftraggeber-Vertretern gewünscht. Beispielsweise könnten Simulationsmethoden geprüft werden, um machbare und plausible Varianten für Mindestkosten zu finden.

Zudem äußerten die Experten regelmäßig einen Bedarf hinsichtlich der Streitvermeidung. Laut eines Juristen könnte das simulationsbasierte Nachweisverfahren in einem anderen Einsatzgebiet zur „Versachlichung der Diskussionen" getestet werden.

Weiterhin ist eine baubegleitende Datenerfassung für die Erstellung baubetrieblicher Gutachten forschungswürdig. Die Soll-zu-Ist-Modifikation könnte in Anlehnung an die von *Tiesler* entwickelten Nachweisverfahren, bei denen für jeden zeitabhängigen Anspruch eine eigene Methodik angewandt wird, erweitert werden.[1694]

[1694] Siehe Tiesler, 2018: S. 200 ff.

Literaturverzeichnis

Abdul-Malak/El-Saadi/Abou-Zeid, 2002: Process Model for Administrating Construction Claims. In: Journal of Management in Engineering, Vol. 18, Issue 2/2002, S. 84-94. American Society of Civil Engineers (ASCE).

AbouRizk, 2010: Role of Simulation in Construction Engineering and Management. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 136, Issue 10/2010, S. 1140-1153. American Society of Civil Engineers (ASCE).

AbouRizk/Dozzi, 1993: Application of Computer Simulation in Resolving Construction Disputes. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 119, Issue 2/1993, S. 355-373. American Society of Civil Engineers (ASCE).

AbouRizk/Hajjar, 1998: Simphony: An Environment for Building Special Purpose Construction Simulation Tools. In Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 25, Issue 3/1998: 604-617. Canadian Science Publishing.

AbouRizk/Halpin, 1990: Probabilistic simulation studies for repetitive construction processes. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 116, Issue 4/1990, S. 575-594. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Ailland, 2013: Ereignisbasierte Abbildung von Bau-Ist-Zuständen. Dissertation 2013, Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Band 29, Bauhaus-Universität Weimar, Bauhaus Universitätsverlag.

Akinci/Fischen/Levitt/Carlson, 2002: Formalization and Automation of Time-Space Conflict Analysis. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 16, Issue 2/2002, S. 124-134. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Althaus, BauR 2012: Analyse der Preisfortschreibung in Theorie und Praxis. In: Baurecht (BauR), Heft 2a/2012, 359-379. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Althaus, ZfBR 2007: Änderung des Bauentwurfs und nicht vereinbarte Leistungen: Überlegungen zum Verhältnis von § 1 Nr. 3 und Nr. 4 Satz 1 VOB/B. In: Zeitschrift für deutsches und internationales Bau- und Vergaberecht (ZfBR), Heft 5/2007, 411-415. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Anschütz, 1974: Kybernetik – kurz und bündig, Kybernetik-Skelett, 3. Auflage 1974. Vogel-Verlag, Würzburg.

Arashpour/Wakefield/Blismas/Lee, 2013: Analysis of Disruptions Caused by Construction Field Rework on Productivity in Residential Projects. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 140, Issue 2/2013, S. 04013053 1-12. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Ashby, 1957: An Introduction to Cybernetics, Second Impression 1957. Chapman & Hall LTD, London.

Astour, 2015: Entwicklung eines BIM-basierten Systems zur Entscheidungsunterstützung mittels Simulation für die Baustellenplanung. Dissertation 2015, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 33, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel, kassel university press GmbH, Kassel.

Axelson, St. 02.03.2017: Introducing DelaymasterTM: A Forensic Project Delay Calculator for All Seasons, pezalaconsulting. White paper – Internetquelle: http://pezala.com/NewWhitePaper OnFDA1.pdf [Zuerst abgerufen am 02.03.2017 und zuletzt abgerufen am 11.09.2018], S. 1-16.

Azhar, 2011: Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. In: Leadership and management in engineering, Vol. 11, Issue 3/2011, S. 241-252. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Bauch/Bargstädt, 2017: Praxis-Handbuch Bauleiter, Bauleistungen sicher überwachen. 2., aktualisierte und erweiterete Auflage 2017, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln.

Becker, 2017: Spezialreport: Reform des Bauvertragsrechts, Alle wichtigen Änderungen auf einen Blick. Deubner Verlag GmbH & Co. KG, Köln 2017, S. 1-16.

BeckOGK, Stand: beck-online.GROSSKOMMENTAR zum Zivilrecht, BGB (in Auszügen Kommentiert). GesamtHrsg. Gsell/Krüger/Lorenz/Reymann. (beck-online-Modul): Verlag C. H. Beck München.

BeckOK BGB, Stand: Beck´scher Online-Kommentar, BGB, 46. Edition 2018. Hrsg. Bamberger/Roth/Hau/Poseck. (beck-online-Modul): Verlag C. H. Beck, München.

BeckOK VOB/B, Stand: Beck´scher Online-Kommentar, VOB/B, 31. Edition 2018. Hrsg. Jansen/Kandel/Preussner. (online-Modul): id Verlags GmbH, Mannheim.

BeckOK ZPO, Stand: Beck´scher Online-Kommentar, ZPO, 29. Edition 2018. Hrsg. Vorwerk/Wolf. (online-Modul): Verlag C. H. Beck, München.

Beck´scher VOB-Kommentar, 2013: Beck´scher VOB-Kommentar, Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil B, Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen, 3. Auflage 2013. Hrsg. Ganten/Jansen/Voit. Verlag C. H. Beck, München.

Behaneck, St. 01.09.2015: Teil 2: Aktueller Stand und Nutzen von Building Information Modeling und künftige Entwicklungen, BIM, BAM, BOOM? In: deutsche bauzeitung, Ausgabe 9/2015. Internetquelle: www.db-bauzeitung.de/db-themen/technik/bim-bam-boom [zuletzt abgerufen am 12.09.2018], Konradin Medien GmbH.

Behaneck, St. 29.01.2016: Teil 3: BIM-Anwender berichten, Zukunftsmusik mit leisen Dissonanzen. In: deutsche bauzeitung, Ausgabe 2/2016. Internetquelle: www.db-bauzeitung.de/db-themen/technik/bim-bam-boom [zuletzt abgerufen am 12.09.2018], Konradin Medien GmbH.

Behnam/Wickramasinghe/Ghaffar/Vu/Tang/Isa, 2016: Automated progress monitoring system for linear infrastructure projects using satellite remote sensing. In: Automation in Construction, Vol. 68/2016, S. 114-127, Elsevier B. V.

Beißert/König/Bargstädt, 2007: Constraint-based simulation of outfitting processes in building engineering. In: 24th W78 Conference, 2007, S. 491-497.

Ben-Alon/Sacks, 2017: Simulating the behavior of trade crews in construction using agents and building information modeling. In: Automation in Construction, Vol. 74/2017, S. 12-27. Elsevier B.V.

Berg, 1984: REFA in der Baupraxis, Teil 1 Grundlagen, 2. Auflage 1984, ZTV-Verlag Frankfurt/Main.

Berner/Habenicht/Kochkine/Spiekermann/Väth, 2013: Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken. In: Bauingenieur, Band 88/2013, S. 89-97. Springer-VDI-Verlag.

Beuermann, IBR 2018: Bezugnahme auf Anlagen ist kein schlüssiger Sachvortrag! In: Immobilien- & Baurecht (IBR), 2018, 484, id Verlags GmbH, Mannheim.

Biel, St. 26.01.2015: Baumängel richtig Anzeigen. Hausbau-Blog, Veröffentlicht am 26.01.2015. Internetquelle: http://hausbaublog.eu/baumangel-richtig-anzeigen [Zuletzt abgerufen am 09.09.2018].

Bleichert, 2015: Entwicklung eines Simulationswerkzeuges zur Ermittlung des Energieverbrauchs im Rahmen der Ökobilanzierung von Bauprozessen, Dissertation 2015, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 32, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel, kassel university press GmbH, Kassel.

Boehme-Neßler, NJW 2017: Die Macht der Algorithmen und die Ohnmacht des Rechts, Wie die Digitalisierung das Recht relativiert. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 42/2017, 3031-3037. Verlag C. H. Beck, München.

Böhmer/Simon/Helmbrecht, 2016: Baurechtsstreitigkeiten, Umfrage zur Auswertung baurechtlicher Mandate, Bericht vom 10.11.2016. Gemeinschaftsprojekt vom Institut für Bauforschung e.V. und dem Bauherren-Schutzbund e.V., Internetquelle: www.bsb-ev.de [Zuletzt abgerufen am 09.09.2018].

Bolz, IBR 2017: Kein (wirksamer) Endtermin vereinbart: Wann kommt der Auftragnehmer in Verzug? In: Immobilien- & Baurecht (IBR), 2017, 243, id Verlags GmbH, Mannheim.

Börkircher, 2011: Simulationsbasierter Ansatz zur Unterstützung der Bauproduktionsplanung. Dissertation 2011, Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 40, Shaker Verlag.

Borrmann, 2015: Building Information Modeling. In: DETAIL, Vol. 6/2015, S. 602-607. DETAIL Business Information GmbH.

Bossel, 2004: Systeme Dynamik Simulation, Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2004.

Bottek, 2011: Von der Arbeitsvorbereitung zur Fertigungsplanung auf der Baustelle. In: Zukunftspotential Bauwirtschaft: Tagungsband, 1. Internationaler BBB-Kongress 15.09.2011 in Dresden, September 2011, S. 239-248. Verlag: Technische Uni Dresden.

Bourke, 1989: Triangulate – Efficient Triangulation Algorithm Suitable for Terrain Modelling or an Algorithm for Interpolating Irregularly-Spaced Data with Applications in Terrain Modelling. Presented at Pan Pacific Computer Conference, Beijing, China, January 1989.

Brand, NJW 2017: Grenzen zivilprozessualer Wahrheit und Gerechtigkeit, Disclosure- und Discovery-Elemente im deutschen Zivilverfahrensrecht. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 49/2017, 3558-3563. Verlag C. H. Beck, München.

Brüssel, 2007: Baubetrieb von A bis Z, 5. Auflage 2006. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Burg/Moser, 2017: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation, 3. aktualisierte Auflage 2017. Hrsg. Burg/Moser. Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Chahrour, 2007: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dissertation 2007, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 7, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Chen/Griffis/Chen/Chan, 2013: A framework for an automated and integrated project scheduling and management system. In: Automation in Construction, Vol. 35/2013, S. 89-110. Elsevier B. V.

Cheng/Chen, 2002: Integrating barcode and GIS for monitoring construction progress. In: Automation in Construction, Vol. 11/2002, S. 23-33. Elsevier B. V.

Cheng/Wang/Ling/Bai, 2011: A Petri net simulation model for virtual construction of earthmoving operations. In: Automation in Construction, Vol. 20/2011, S. 181-188. Elsevier B. V.

Choi, 2011: Quantifying the Effects of Interference for an Alternative Method of Construction Productivity Estimation. In: KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, Issue 5/2011, S. 761-769.

Chou/Yang, 2017: Preliminary Evaluation of BIM-based Approaches for Schedule Delay Analysis. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 245, S. 062048 1-8. IOP Publishing.

Chritamara/Ogunlana/Bach, 2002: System dynamics modeling of design and build construction projects. In: Construction Innovation, Vol. 2, Issue 4/2002, S. 269-295. Emerald Publishing.

Daban/Kashefi, 2016: Bachelorprojekt: Umfrage – Störungen im Bauablauf. Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren, Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel, 2016.

Damriantant/Wakefield, 2000: An alternative approach for modeling of interference in discrete-event systems. In: Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 17, Issue 3/2000, S. 213-235. Informa UK Limited.

Dang, 2014: Automated Detailing of 4D Schedules. Dissertation 2014, Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Band 32, Bauhaus-Universität Weimar. Bauhaus Universitätsverlag.

Dellmann/Pedell, 1994: Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.

Deutscher Bundestag, BT-Drs. 18/11437: Entwurf eines Gesetzes zur Reform des Bauvertragsrechts und zur Änderung der kaufrechtlichen Mängelhaftung, Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Recht und Verbraucherschutz (6. Ausschuss). Drucksache 18/11437, Stand: März 2017.

Diederichs/Streckel, NZBau 2009: Beurteilung gestörter Bauabläufe – Anteile der Verursachung durch Auftraggeber und Auftragnehmer. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 1/2009, 1-5. Verlag C. H. Beck oHG, München.

DIN 18299, 2016: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art. September 2016, Stand 2016-11, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau). Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 69001-5, 2009: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe. Januar 2009, Stand 2016-11, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 69900, 2009: Projektmanagement – Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe. Januar 2009, Stand 2016-11, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 9000, 2015: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. November 2015, Stand 2016-11, DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ). Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN IEC 60050-351, 2014: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013). September 2014, Stand 2016-11, DIN/VDE-DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 21500, 2016: Leitlinien Projektmanagement (ISO 21500:2012). Februar 2016, Stand 2016-11, DIN-Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ). Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dölling, NJW 2013: Die Voraussetzungen der Beweiserhebung im Zivilprozess. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 43/2013, 3121-3127. Verlag C. H. Beck, München.

Dori, 2015: Simulation-based methods for float time determination and schedule optimization for construction projects. Dissertation 2015, Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München.

Drittler, 2017: Nachträge und Nachtragsprüfung beim Bau- und Anlagenbauvertrag, Lösungen zum Erkennen, Sichern, Begründen, Nachweisen, Prüfen von Ansprüchen aus Auftragnehmer- und Auftraggeberinteresse, 3. Auflage 2017. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Drittler, BauR 2017: Entschädigung ungedeckter Allgemeiner Geschäftskosten unter Bauzeitverlängerung: Widerstreit zweier OLG-Entscheidungen. In: Baurecht (BauR), Heft 11/2017, 1931-1938. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Duve, NJW 2014: Ansprüche aus Bauzeitänderungen – ewiger Stolperstein? In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 41/2014, 2992-2995. Verlag C. H. Beck, München.

Duve/Richter, BauR 2006: Kausalitätsfragen bezüglich eines gestörten Bauablaufes. In: Baurecht (BauR), Heft 4/2006, 608-619. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Dzeng/Lin/Hsiao, 2014: Application of RFID tracking to the optimization of functionspace assignment in buildings. In: Automation in Construction, Vol. 40/2014, 68-83. Elsevier B. V.

Eden/Williams/Ackermann, 2005: Analysing project cost overruns: comparing the „measured mile" analysis and system dynamics modelling. In: International Journal of Project Management. Vol. 23/2005, S. 135-139. Elsevier B. V.

Eden/Williams/Ackermann/Howick, 2000: The role of feedback dynamics in disruption and delay on the nature of disruption and delay (D&D) in major projects. In: Journal of the Operational Research Society, Vol. 51, Issue 3/2000, S. 291-300. Springer-Verlag.

Egger/Hausknecht/Lieblich/Przybylo, 2013: BIM-Leitfaden für Deutschland, Information und Ratgeber, Endbericht. Forschungsprogramm, ZukunftBAU, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). AktZ. 10. 08.17.7–12.08. In Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), 2013.

Ehrl, DStR 2017: Das neue Bauvertragsrecht im Überblick. In: Deutsches Steuerrecht (DStR), Heft 44/2017, 2395-2401. Verlag C. H. Beck, München.

Eschenbruch/Gerstberger, BauW 2018: Zeitenwende für baubetriebliche Gutachten. In: Bauwirtschaft (BauW), Heft 1/2018, S. 45-56. Werner Verlag. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Eschenbruch/Malkwitz/Grüner/Poloczek/Karl, 2014: Die BIM-Methode – eine Herausforderung, auch für Baujuristen Digitales Planen und Bauen braucht keinen Gesetzgeber, Maßnahmenkatalog zur Nutzung von BIM in der öffentlichen Bauverwaltung unter Berücksichtigung der rechtlichen und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen, Gutachten zur BIM-Umsetzung. Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). AktZ. 10.08.17.7-12.05. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2014.

Eschenbruch/von Rintelen, NZBau 2010: Bauablaufstörung und Terminfortschreibung nach der VOB/B – Stresstest für die baubetrieblichen Gutachten. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 7/2010, 401-411. Verlag C. H. Beck, München.

Fathi/Dai/Lourakis, 2015: Automated as-built 3D reconstruction of civil infrastructure using computer vision: Achievements, opportunities, and challenges. In: Advanced Engineering Informatics, Vol. 29/2015, S. 149-161. Elsevier B. V.

Feine/Smarsly/Bargstädt, 2016: Scenario simulations for improved production planning in construction engineering using standard simulation software. In: The 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE). Osaka, Japan, 06.07.2016.

Fischer/Jungedeitering, BauR 2015: Die BIM-Methode im Lichte des Baurechts. In: Baurecht (BauR), Heft 1/2015, 8-15, Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Fischer/Hofer, 2008: Lexikon der Informatik. 14. überarbeitete Auflage 2008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Franz, 1989: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen. Dissertation 1989, Gesamthochschule Kassel.

Franz, BauR 2012: Nachtragskalkulation in Zukunft – Das Ende der Preisfortschreibung!? In: Baurecht (BauR), Heft 2a/2012, 380-395. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Franz/Kues, BauR 2010: Guter Preis bleibt guter Preis – Rechtfertigt die Faustformel Korbions ein Vertragspreisniveau? In: Baurecht (BauR), Heft 5/2010, 678-687. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Franz/Möhring/Gnerlich/Tiesler, BauW 2018: Yes we can (really)? Eine baubetriebliche Replik „(z)um richtigen Verständnis der konkreten bauablaufbezogenen Darstellung" oder der Frage: „Wird das Pferd aus der Perspektive der jeweiligen Disziplin von hinten aufgezäumt?" In: Bauwirtschaft – Markt, Management, Recht (BauW), Heft 3/2018, S. 134-139. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Fuchs, NZBau 2014: Großversagen der Auftraggeber? In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 7/2014, 409-415. Verlag C. H. Beck, München.

Fuchs/Hofkirchner, 2002: Ein einheitlicher Informationsbegriff für eine einheitliche Informationswissenschaft. Stufen zur Informationsgesellschaft. In: Festschrift zum 65. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski. Hrsg. Floyd/Fuchs/Hofkirchner, S. 242-281. Verlag Peter Lang GmbH 2002, Frankfurt/Main.

Gareis/Halpin, 1979: Planung und Kontrolle von Bauproduktionsprozessen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979. – Deutsche Übersetzung des Werkes: „Design of Construction and Process Operations" von: Halpin/Woodhead, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1976.

Gelisen/Griffis, 2013: Automated Productivity-Based Schedule Animation: Simulation-Based Approach to Time-Cost Trade-Off Analysis. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 140, Issue 4/2013, S. B4013007 1-10. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Genschow/Stelter, 2013: Störungen im Bauablauf, Problemlösungen – Schritt für Schritt – an einem Praxisbeispiel dargestellt, 3. Auflage 2013. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2012: An investigation into whether building information modelling (BIM) can assist with construction delay claims. In: Proceedings of the First UK Academic Conference on BIM, Newcastle Business School & School of Law Building, Northumbria University, 5-7 September 2012, S. 36-44.

Gibbs/Emmitt/Ruikar/Lord, 2013: A Case Study Investigation into the use of Computer Generated Visualisations to Assist with Construction Delay Claims. In: Conference: Proceeding of the 19th International CIB World Building Congress, Construction and Society, At Brisbane, Australia, May 2013.

Gibbs/Lord/Emmitt/Ruikar, 2017: Interactive Exhibit to Assist with Understanding Project Delays. In: Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 9, Issue 1/2016, S. 04516008 1-12. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Gnerlich, 2017: BIM und Simulation – Erste Ansätze und Eingrenzungen für baubetriebliche Gutachten über gestörte Bauabläufe im deutschen Baurecht. In: 28. BBB-Assistententreffen, Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 27. bis 29. Juni 2017 an der Technischen Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebiets Baubetrieb und Bauwirtschaft, I Forschung, Band 3, S. 75-89.

Gnerlich/Tiesler/Franz, 2018: Einfluss objekt-verteilter Zeitaufwandswerte auf die Anspruchsbewertung gestörter Bauabläufe. In: Tagungsband der BauSIM 2018. 7. Deutsch-Österreichische Konferenz in Karlsruhe, Sept. 2018. Hrsg. Both/Wagner. Karlsruher Institut für Technologie. S. 455-462.

Gnerlich/Tiesler/Möhring/Franz, 2018: Baubetriebliches Statement über Prognosen und Rekonstruktionen mittels BIM-basierter Simulation zur Bewertung gestörter Bauabläufe. In: Sonderband Digitalisierung anlässlich des 4. BIM-Symposiums Rheinland-Pfalz in Kaiserslautern, Okt. 2018. Hrsg. Körkemeyer/Rehman. Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, Schriftenreihe Forschung, Band 4, 1. Auflage, S. 45-56.

Greenwald, 2013: A Creative Proposal for Dispute Systems Design for Construction Projects Employing BIM. In: Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 5, Issue 1/2013, S. 2-5. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Guévremont/Hammad, 2018: Visualization of Delay Claim Analysis Using 4D Simulation. In: Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 10, Issue 3/2018, S. 05018002 1-8. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Haghsheno, 2004: Analyse der Risiken des GMP-Vertrags bei der Abwicklung von Bauprojekten. Dissertation 2004, Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb, Nr. 35, Technische Universität Darmstadt, Verlag Mensch & Buch, Berlin.

Hajjar/AbouRizk, 1999: Simphony: an environment for building special purpose construction simulation tools. In: Proceedings of the 31st conference on Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ, USA, 5.-8. December 1999. Hrsg. Farrington/Nembhard/Sturrock/Evans, Vol. 2, S. 998-1006.

Hammacher, NZBau 2016: Prüf- und Hinweispflichten für Auftraggeber und Auftragnehmer in Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen, Dargestellt am Beispiel der überarbeiteten ATV DIN 18 335 „Stahlbauarbeiten". In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 1/2016, 20-23. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Han/Love/Peña-Mora, 2013: A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects. In: Mathematical and Computer Modelling, Vol. 57/2013, S. 2044-2053. Elsevier B. V.

Haroon/Shah/Asim/Naeem/Kamran/Javaid, 2016: Constraints in the IoT: the world in 2020 and beyond. In: International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Vol. 7, Issue 11/2016, S. 252- 271. The Science and Information (SAI) Organization.

Heilfort, BauR 2003: Besonderheiten der Entstehung, Auswirkung und Darstellung von Bauablaufstörungen in leistungsflexiblen Gewerken – dargestellt am Beispiel Trockenbau. In: Baurecht (BauR), Heft 11/2003, 1646-1649. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Heilfort, BauR 2010: Nachweis der haftungsbegründenden und haftungsausfüllenden terminlichen Kausalität von Bauablaufstörungen mit dem Bauablauf-Differenzverfahren – ein Bericht aus der Praxis. In: Baurecht (BauR), Heft 01/2010, 25-31. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Heilfort, BauR 2017: Vorgehensweise zum Nachweis von Bauablaufstörungen auf Grundlage der aktuellen Rechtsprechung. In: Baurecht (BauR), Heft 2/2017, 178-188. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

HK-BGB, 2017: Bürgerliches Gesetzbuch – Handkommentar, NomosKommentar, 9. Auflage 2017. Schriftleitung: Schulze. Verlag Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

HK-ZPO, 2017: Zivilprozessordnung, Familienverfahren | Gerichtsfassung | Europäisches Verfahrensrecht, Handkommentar, 7. Auflage 2017. Hrsg. Saenger. Verlag Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

Hofstadler, 2014: Produktivität im Baubetrieb, Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.

Hohmann, 1997: Von der Netzplantechnik zur Simulation – Analyse von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, IKM, 14, Bauhaus-Universität.

Horenburg, 2014: Simulationsgestützte Ablaufplanung unter Berücksichtigung aktueller Baufortschrittsinformationen. Dissertation 2014, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, TUM.

Ibbs/Liu, 2005: System Dynamic Modeling of Delay and Disruption Claims. In: Cost Engineering, Vol. 47, Issue 6/2005, S. 12-15.

Ingenstau/Korbion, 2017: VOB – Teile A und B – Kommentar, 20. Auflage 2017. Hrsg. Leupertz/Wietersheim. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Jalili/Ford, 2016: Quantifying the impacts of rework, schedule pressure, and ripple effect loops on project schedule performance. In: System Dynamics Review, Vol. 32, Issue 1/2016, S. 82-96. John Wiley & Sons, Inc.

Jansen, DS 2013: Die Bedeutung baubetrieblicher Gutachten im Vergütungsprozess – Warum ist die gerichtliche Durchsetzung von Nachtragsforderungen so schwierig? – Anforderungen an den Inhalt baubetrieblicher Gutachten. In: Der Sachverständige (DS), Heft 4/2013, 91-94. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Jauernig, 2018: Jauernig, Bürgerliches Gesetzbuch, mit Rom-I-, Rom-II-VO, EuUnthVO/HUntProt und EuErbVO, Kommentar. Hrsg. Stürner, 17. Auflage 2018. Verlag C. H. Beck, München.

Kapellmann, NJW 2005: Der BGH und die „Konsoltraggerüste" – Bausollbestimmung durch die VOB/C oder die „konkreten Verhältnisse"? In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 4/2005, 182-188. Verlag C. H. Beck, München.

Kapellmann/Messerschmidt, 2018: VOB Teile A und B, Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen mit Vergabeverordnung (VgV). Hrsg. Kapellmann/Messerschmidt, 6. Auflage 2018. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Kapellmann/Schiffers/Markus, 2017: Vergütung, Nachträge und Behinderungsfolgen beim Bauvertrag, Rechtliche und baubetriebliche Darstellung der geschuldeten Leistung und Vergütung sowie der Ansprüche des Auftragnehmers aus unklarer Ausschreibung, Mengenänderung, geänderter oder zusätzlicher Leistung aus Behinderung gemäß VOB/B, Band 1: Einheitspreisvertrag. Werner Verlag 2017, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Kappes, BauW 2017: Das BIM-Angebotsportfolio eines Bauunternehmers. In: Bauwirtschaft – Markt, Management, Recht (BauW), Heft 2/2017, 67-73. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Khanzadi/Kaveh/Alipour/Mohammadi, 2017: Assessment of labor productivity in construction projects using system dynamic approach. In: Scientia Iranica – Transaction A, Civil Engineering, Vol. 24, Issue 6/2017, S. 2684-2695.

Kiedrowski, NJW 2017: Die Auslegung von Bauverträgen zur Bestimmung von Nachtragsleistungen. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 48/2017, 3484-3486. Verlag C. H. Beck, München.

Kim/Kim, 2010: Multi-agent-based simulation system for construction operations with congested flows. In: Automation in Construction, Vol. 19/2010, S. 867-874. Elsevier B. V.

Klügl, 2000: Aktivitätsbasierte Verhaltensmodellierung und ihre Unterstützung bei Multiagentensimulationen. Dissertation 2000, Universität Würzburg, Fakultät für Mathematik und Informatik.

Kniffka, Stand: ibr-online-Kommentar Bauvertragsrecht, Online-Kommentar zu den Grundzügen des gesetzlichen Bauvertragsrechts (§§ 631-650v BGB) unter besonderer Berücksichtigung der Rechtsprechung des Bundesgerichtshofs, 3. Auflage 2018. Hrsg. Kniffka. (Online-Modul): id Verlags GmbH, Mannheim (auch als Druckfassung erhältlich).

Kniffka/Koeble, 2014: Kompendium des Baurechts, Privates Baurecht und Bauprozess. Hrsg. Kniffka/Koeble, 4. Auflage 2014. Verlag C. H. Beck, München.

Koenen, IBR 2016: Die BIM-Methode – eine Herausforderung, auch für Baujuristen, Digitales Planen und Bauen braucht keinen Gesetzgeber. In: ibr-online, IBR 2016, 1072 (nur online). id Verlags GmbH, Mannheim.

Koc/Skaik, 2014: Disputes Resolution: Can Bim Help Overcome Barriers? In: CIB 2014: Proceedings of the 2014 International Conference on Construction in a Changing World, Dambulla, Sri Lanka. 2014.

König/Beißert/Steinhauer/Bargstädt, 2007: Ereignisdiskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung. In: Workshop: Simulation in der Bauwirtschaft, 2007. Internetquelle: simofit.inf.bi.ruhr-uni-bochum.de/ [Zuletzt abgerufen am 10.09.2018], S. 1-12.

Kohlhaas, 2015: VDI 2552 Blatt 4 BIM – Datenaustausch. In: Bauinformatik – Baupraxis, Leitlinien – Richtlinien – Normen – Ergebnisse aus dem VDI-Koordinierungskreis BIM. 6. Fachkonferenz Bauinformatik – Baupraxis, November 2015, Dresden. Hrsg. Scherer/Katranuschkov/Opitz. S. 41-48.

Kordi, 2013: Ansätze zur automatischen Terminplanung für Roh- und Ausbauarbeiten auf Basis der Integration von CAD- und Bauprozessmodellen. Dissertation 2013, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 26, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Košturiak/Gregor, 1995: Simulation von Produktionssystemen. Springer Verlag, Wien New York, 1995.

Krause/Popescu, 2017: Masterplan 4.o – digital planen und bauen in greifbarer Zukunft. In: CS - computer-spezial, Software für Architekten, Ingenieure, Bauunternehmen, Heft 1/2017, S. 8. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.

Kues, NZBau 2018: Bauzeitnachträge – Die offenen Fragen werden nicht weniger! In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 9/2018, 505-506. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Kugler, 2012: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Dissertation 2012, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 22, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Langen, BauR 2011: Mehrfachkausalität bei Mängeln und Bauzeitverzögerungen. In: Baurecht (BauR), Heft 2a/2011, 381-392. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Leinemann, NJW 2017: Das neue Bauvertragsrecht und seine praktischen Folgen. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 43/2017, 3113-3119. Verlag C. H. Beck, München.

Leinemann, NZBau 2009a: Die Geltendmachung von Ansprüchen aus gestörtem Bauablauf. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 9/2009, 563-567. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Leinemann, NZBau 2009b: Die Ermittlung und Berechnung von Ansprüchen aus gestörtem Bauablauf. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 10/2009, 624-629. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Leupertz, DS 2013: (Außergerichtliche) Streitbeilegung und Streitentscheidung in der Verantwortung des Bausachverständigen. In: Der Sachverständige (DS), Heft 10/2013, 296-299. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Liu/Altaf/Lei/Al-Hussein, 2015: Automated production planning in panelized construction enabled by integrating discrete-event simulation and BIM. In: 5th International/11th Construction Specialty Conference, Vancouver, British Columbia, 9.-10. June 2015, S. 048 1-10.

Liu/Singh/Lu/Bouferguene/Al-Hussein, 2018: BIM-based Automated Design and Planning for Boarding of Light-Frame Residential Buildings. In: Automation in Construction, Vol. 89/2018, S. 235-249. Elsevier B. V.

Lu/Chan/Zhang/Cao, 2007: Generic process mapping and simulation methodology for integrating site layout and operations planning in construction. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 21, Issue 6/2007, S. 453-462. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Lu/Olofsson, 2014: Building information modeling and discrete event simulation: Towards an integrated framework. In: Automation in Construction, Vol. 44/2014, S. 73-83. Elsevier B. V.

Luz, BauR 2017: Der Sachverständigenbeweis: Die größte Problembaustelle des Baurechts – Ein Weckruf. In: Baurecht (BauR), Heft 1/2017, 14-23. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Maduranga/Palamakumbura/Dissanayake, 2016: Preparation of extension of time (EOT) claims and delay analysis techniques used in the construction industry. In: The 7th International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka from 16th to 18th December 2016.

Malkwitz/Aghazadeh/Bartholomé/Kleinen/Körbel, 2017: Der gestörte Bauablauf – Empirische Untersuchung in Abhängigkeit des Projektvolumens. Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften, Institut für Baubetrieb und Baumanagement. E-Publikation: https://duepublico.uni-duisburg-essen.de [Zuletzt abgerufen am 09.09.2018].

Markus, NZBau 2014: Anforderungen an die Begründung von Ansprüchen wegen bauzeit-verlängernden Behinderungen. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 11/2014, 688-690. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Martinez/Ioannou, 1999: General-purpose systems for effective construction simulation. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 125, Issue 4/199, S. 265-276. American Society of Civil Engineers (ASCE).

MCE-Consult, 2008: Jedes Detail zählt. In: Wirtschaftsblatt, Themenheft „Bauen, Mieten, Investieren“ zur Expo Real, April 2008, S. 78-79.

Mechnig/Bolz, IBR 2016: Kein verbindlicher Bauzeitenplan vereinbart: Keine Ansprüche wegen gestörten Bauablaufs! In: Immobilien- & Baurecht (IBR), 2016, 76. id Verlags GmbH, Mannheim.

Mechnig/Völker/Mack/Zielke, NZBau 2014: Ist das Bauzeitlabyrinth ein Irrgarten? Bauzeitverlängerungs-ansprüche mit dem Adaptionsverfahren schlüssig und bauablaufbezogen visualisieren. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 2/2009, 85-92. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Menden, IBR 2015: BIM-Methode und Baurecht. In: ibr-online, IBR 2015, 1128 (nur online). id Verlags GmbH, Mannheim.

Mertins, NJ 2009: Substantiierung im Zivilprozess. In: Neue Justiz (NJ), Heft 11/2009, 441-448. Verlag Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

Messerschmidt/Voit, 2018: Privates Baurecht, Kommentar zu §§ 631 ff. BGB samt systematischen Darstellungen sowie Kurzkommentierungen zu VOB/B, HOAI und BauFordSiG, 3. Auflage 2018. Hrsg. Messerschmidt/Voit. Verlag C. H. Beck, München.

Meurer, St. 06.06.2017: Die Änderung des Bauvertragsrechts im Überblick. Veröffentlicht am 06.06.2017, Internetquelle: https://bda-bund.de/wp-content/uploads/2017/01/Die-%c3%84nderung-des-Bauvertrags rechts-im-%c3%9cberblick.pdf [Zuletzt ab-gerufen am 19.10.2017].

Mirzaei/Nasirzadeh/Parchami Jalal/Zamani, 2018: 4D-BIM Dynamic Time–Space Conflict Detection and Quantification System for Building Construction Projects. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 144, Issue 7/2018, S. 04018056 1-14. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Möhring, 2011: Die „konkrete bauablaufbezogene Darstellung“ als zentraler Bestandteil für die Führung des adäquaten Kausalitätsnachweises bei Bauablaufstörungen. In: Neue Landschaft, Jahrgang 56, Heft 2/2011, S. 37-41. Patzer Verlag Berlin Hannover.

Möhring, 2012: Ablaufbezogenes Dokumentationsverfahren zum Nachweis der adäquaten Kausalität bei Bauablaufstörungen mit Schwerpunkt Haftungsgrund im Leistungsbereich Landschaftsbau. Dissertation 2012. kassel university press.

Moon/Xu/Hou/Wu/Wang/Tam, 2017: RFID-Aided Tracking System to Improve Work Efficiency of Scaffold Supplier: Stock Management in Australasian Supply Chain. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 144, Issue 2/2018, S. 04017115 1-9. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Motzke/Bauer/Seewald, 2018: Prozesse in Bausachen, Privates Baurecht | Architektenrecht, 3. Auflage 2018. Hrsg. Motzke/Bauer/Seewald. Verlag Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

MüKoBGB, 2016: Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch, Band 2, Schuldrecht – Allgemeiner Teil, 7. Auflage 2016. Hrsg. Säcker/Rixecker/Oetker/Limperg, Red. Krüger. Verlag C. H. Beck, München.

MüKoZPO, 2016: Münchener Kommentar zur Zivilprozessordnung mit Gerichtsverfassungsgesetz und Nebengesetzen, Band 1, §§ 1-354, 5. Auflage 2016. Hrsg. Rauscher/Krüger, Verlag C. H. Beck, München.

Musielak, NJW 2000: Der rechtskräftig entschiedene Lebenssachverhalt – Versuch einer Abgrenzung. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 49/2000, 3593-3599. Verlag C. H. Beck, München.

Musielak/Voit, 2018: Zivilprozessordnung mit Gerichtsverfassungsgesetz, Kommentar, 15. Neubearbeitete Auflage. Hrsg. Musielak/Voit. Verlag Franz Vahlen GmbH, München.

Nagel/Götting/Hänel/Wagner, 1990: Ausbauprozesse, Technologie der Bauproduktion, 1. Auflage 1990. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Nicklisch/Weick/Jansen/Seibel, 2016: VOB Teil B, Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Kommentar, 4. Völlig neubearbeitete Auflage 2016. Hrsg. Jansen/Seibel. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Niemeyer, 1977: Systemstudium Wirtschaftsinformatik, Kybernetische System- und Modelltheorie, system dynamics, 1. Auflage 1977. Verlag Franz Vahlen GmbH, München.

NK-BGB, 2016: BGB, Schuldrecht, Band 2, NomosKommentar, 3. Auflage 2016. Hrsg. Dauner-Lieb/Langen. Verlag Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

Oloufa, 1993: Modeling operational activities in object-oriented simulation. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 7, Issue 1/1993, S. 94-106. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Ory/Weth, NJW-Beilage 2016: Schriftstücke und elektronische Dokumente im Zivilprozess – Von der Papierform zur elektronischen Form. In: Neue Juristische Wochenschrift, Beilage (NJW-Beilage), Heft 4/2016, 96-100. Verlag C. H. Beck, München.

Pärn/Edwards/Sing, 2018: Origins and probabilities of MEP and structural design clashes within a federated BIM model. In: Automation in Construction, Vol. 85/2018, S. 209-219. Elsevier B. V.

Peters, NZBau 2011: Die Mitwirkung des Bestellers bei der Durchführung eines Bauvertrags. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 11/2011, 641-645. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Peterson, 1977: Petri nets. In: ACM Computing Surveys, Vol. 9, Issue 3/1977, S. 223-252.

Peterson, 1981: Petri net theory and the modeling of systems. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1981.

Putzier, NZBau 2018: Sofortige Änderungsanordnung unter dem Bauvertragsrecht 2018. In: Neue Juristische Wochenschrift (NJW), Heft 3/2018, 131-134. Verlag C. H. Beck, München.

Rabe/Spiekermann/Wenzel, 2008: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

Racky, 1997: Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Festlegung der Vergabeform. Dissertation 1997, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 4: Bauingenieurwesen, Nr. 142, Technische Universität Darmstadt. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Raoufi/Robinson Fayek, 2018: Fuzzy Agent-Based Modeling of Construction Crew Motivation and Performance. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 32, Issue 5/2018, S. 04018035 1-16. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Razavi/Haas, 2010: Multisensor data fusion for on-site materials tracking in construction. In: Automation in Construction, Vol. 19/2010, S. 1037-1046. Elsevier B. V.

Razavi/Moselhi, 2012: GPS-less indoor construction location sensing. In: Automation in Construction, Vol. 28/2012, S. 128-136. Elsevier B. V.

Reister, 2014: Nachträge beim Bauvertrag, 3. Auflage 2014. Hrsg. Reister. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Robinson, 1997: Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta, GA, December 7.-10. 1997, S. 53-59.

Rösch/Dresp, 2017: Der bauteilorientierte Bauablaufplan als bidirektionales Herzstück der Simulation und Fertigungssteuerung beim modellbasierten Planen und Bauen. In: Planen, Errichten und Betreiben – Digitalisierung im Bau, 4. Internationaler BBB-Kongress, am 14.09.2017 in Stuttgart. Hrsg. Berner, 1. Auflage 2017, S. 257-265, Universität Stuttgart – Selbstverlag.

Roquette/Bescher, BauR 2018: Yes we can! In: Baurecht (BauR), Heft 3/2018, 422-435. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Roquette/Viering/Leupertz, 2016: Handbuch Bauzeit, 3. Auflage 2016. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Rustom, 2006: Formulation of Generic Simulation Models for Analyzing Construction Claims. In: Australian Journal of Construction Economic and Building, Vol. 6, 21/2006, S. 10-34.

Rutzen, 2009: Diplomarbeit: Bauüberwachung im Brückenbau – Darstellung des Leistungsbildes der Bauleitung/Bauüberwachung am Beispiel einer Brücke. Bauhaus–Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Baubetrieb und Bauverfahren.

Samkari, 2014: Automatisierungsansätze zur Verbesserung der Simulation von Bauabläufen im Hochbau. Dissertation 2014, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 29, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Samkari/Gnerlich/Franz, 2013: Perception of a Building Construction Schedule. In: Proceedings of the Emerging M&S Applications in Industry & Academia/Modeling and Humanities Symposium. Society for Computer Simulation International, 2013. S. 1-8.

Scherzer, St. 31.10.2014: Standpunkt – Welches BIM brauchen wir? In: Deutsches Architektenblatt (online). Veröffentlicht am 31.10.2014, Internetquelle: https://dabonline.de/2014/10/31/welches-bim-brauchen-wir-rudolf-scherzer-building-information-modeling-technologie/ [Zuletzt abgerufen am 12.09.2018].

Schiffers, 1998: Ausführungsfristen – ihre Festlegung und ihre Fortschreibung bei auftraggeberseitig zu vertretenden Behinderungen. In: Jahrbuch Baurecht 1998, Aktuelles Grundsätzliches Zukünftiges, 1. Jahrgang 1998. Hrsg. Kapellmann/Vygen. Werner Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, S. 276-314.

Schiffers/Sindermann, BauW 2017: Baubetriebliche Umsetzung der Regelungen gem. § 6 VOB/B in Bezug auf zeitliche Ansprüche des Auftragnehmers. In: Bauwirtschaft – Markt, Management, Recht (BauW), Heft 3-4/2017, S. 122-130. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Schopbach, 2001: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden. Dissertation 2001, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 1, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Schroeck/Shockley/Smart/Romero-Morales/Tufano, 2012: Analytics: Big Data in der Praxis, Wie innovative Unternehmen ihre Datenbestände effektiv nutzen. IBM Global Business Services, Business Analytics and Optimization Executive Report. IBM Institute for Business Value, Saïd Business School, University Oxford. IBM Corporation 2012. Internetquelle: https://www-935.ibm.com/services/de/gbs/ thoughtleadership/GBE03519-DEDE-00.pdf, [Zuletzt abgerufen am 01.06.2017].

SCL-Protocol, 2017: Protocol of Delay and Disruption Protocol 2nd Edition. Published by the Society of Construction Law, Leicestershire (UK), February 2017. Internetquelle: www.scl.org.uk/sites/default/files/SCL_Delay_Protocol_2nd_Edition.pdf [Zuletzt abgerufen am 12.09.2018].

Senior/Halpin, 1998: Simplified simulation system for construction projects. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 124, Issue 1/1998, S. 72-81. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Shi/AbouRizk, 1997: Resource-based modeling for construction simulation. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 123, Issue 1/1997, S. 26-33. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Sigalov/König, 2017: Advanced Engineering Informatics. In: Advanced Engineering Informatics, Vol. 33/2017, S. 456-472. Elsevier B. V.

Sienz, IBR 2017: Entschädigung ist kein Schadensersatz: Keine bauablaufbezogene Darstellung erforderlich! In: Immobilien- & Baurecht (IBR), 2017, 665. id Verlags GmbH, Mannheim.

Soltani/Anderson/Kang, 2017: The Challenges of Using BIM in Construction Dispute Resolution Process. In: 53rd General Meeting of ASC in Seattle, Washington, April 2017, S. 771-776.

Song/Eldin, 2012: Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling. In: Automation in Construction, Vol. 27/2012, S. 32-39. Elsevier B. V.

Sonntag, NZBau 2017: Gemeinkostenunterdeckung bei Zeitnachträgen, Zum Verhältnis von § 642 BGB zu Schadensersatzansprüchen nach § 280 BGB oder § 6 Absatz VI VOB/B. In: Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht (NZBau), Heft 9/2017, 525-532. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Sonntag/Sindermann, BauW 2018: Juristische und baubetriebliche Anforderungen an die Anspruchsdarlegung des Auftraggebers bei Verzugsschäden aufgrund von gestörten Bauabläufen. In: Bauwirtschaft (BauW), Heft 02/2018. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Spiekermann, 2011: Simulation von Unikatprozessen aus Sicht eines Spezialisten für Simulationsdienstleistungen. In: Zukunftspotential Bauwirtschaft: Tagungsband, 1. Internationaler BBB-Kongress am 15.09.2011 in Dresden, September 2011, S. 239-248. Verlag: Technische Uni Dresden.

Statistisches Bundesamt, 10/2.1, Jahrgang 2016: Statistisches Bundesamt, Fachserie 10 Reihe 2.1, Rechtspflege, Zivilgerichte 2016. Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.

Stanzel, 2017: Masterprojekt: Anforderungen einer Sensitivitätsanalyse für eine prototypische Simulationsstudie über gestörte Bauabläufe auf der Basis von BIM. Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren, Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel, 2017.

Staud, 2010: Unternehmensmodellierung – Objektorientierte Theorie und Praxis mit UML 2.0. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

Sterman, 2001: System Dynamics Modeling: Tools for learning in a complex world. In: California management review, Vol. 43, Issue 4/2001, S. 8-25. SAGE Publishing for the Haas School of Business (United States).

Su/Isaac/Lucko, 2018: Integrated Temporal-Spatial Model for Construction Plans with Boolean Logic Operators. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 144, Issue 4/2018, S. 04018009 1-15. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Sundermeier, 2009: Gestaltungsvorschläge einer ‚Neuen Vertragsordnung' für Bauleistungen – eine ingenieurökonomische Analyse des VOB/B-Bauvertragsrechts. Dissertation 2009, TU Dortmund. Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen Universitätsbibliothek, Dortmund.

Szczesny/König, 2015: Reactive scheduling based on actual logistics data by applying simulation-based optimization. In: Visualization in Engineering, a SpringerOpen Journal, Vol. 3, Issue 1/2015, S. 1-16. Springer-Verlag.

Tauscher/Smarsly/König/Beucke, 2014: Automated Generation of Construction Sequences using Building Information Models. In: 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, June 2014, Orlando, Florida, United States, S. 745-752.

Taylor/Ford, 2008: Managing Tipping Point Dynamics in Complex Construction Projects. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 134, Issue 6/2008, S. 421-431. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Thode, ZfBR 2004: Nachträge wegen gestörten Bauablaufs im VOB/B-Vertrag, Eine kritische Bestandsaufnahme. In: Zeitschrift für deutsches und internationales Bau- und Vergaberecht (ZfBR), Heft 3/2004, 214-225. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Tiesler, 2018: Entwicklung eines substantiierten Kausalitätsnachweises von Ursache und Wirkung für Bauablaufstörungen auf Basis der deutschen Rechtsprechung. Dissertation 2018, Schriftenreihe Bauwirtschaft, I Forschung 38, Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel. kassel university press GmbH, Kassel.

Tommelein/Riley/Howell, 1999: Parade Game: Impact of Work Flow Variability on Trade Performance. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 125, Issue 5/1999, S. 304-310. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Tuttas/Braun/Borrmann/Stilla, 2017: Acquisition and Consecutive Registration of Photogrammetric Point Clouds for Construction Progress Monitoring Using a 4D BIM. In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, Vol. 85, Issue 1/2017, S. 3-15. Springer-Verlag.

Ulrich/Probst, 1995: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln, Ein Brevier für Führungskräfte, 4., unveränderte Auflage 1995. Verlag Paul Haupt, Bern Stuttgart Wien.

Valavanoglou/Heck, 2016: Building Information Modeling and forensic Analysis of Delay and Disruption. In: Interaction between Theory and Practice in Civil Engineering and Construction. ISEC Press 2016, S. 1-6.

Valavanoglou/Rebolj/Heck, 2017: Construction Delay and Disruption Claims Assisted Through BIM Technology. In: LC3 2017: Vol. I – Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction (JC3), July 4.-7. 2017, Heraklion, Greece, S. 391-398.

van der Alst, 2014: Geschäftsprozessmodellierung: Die „Killer-Applikation" für Petrinetze. In: Informatik-Spektrum, Vol. 37, Issue 3/2014, S. 191-198. Springer-Verlag.

VDI-2552, Blatt 2, 2018: VDI-Richtlinie – Building Information Modeling, Begriffe. Juni 2018, Stand 2018-08, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Fachbereich Bautechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI-2552, Blatt 3, 2018: VDI-Richtlinie – Building Information Modeling, Modellbasierte Mengenermittlung zur Kostenplanung, Terminplanung, Vergabe und Abrechnung. Mai 2018, Stand 2018-08, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Fachbereich Bautechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI/BS-2552, Blatt 8.1, 2017: VDI-Richtlinie – Building Information Modeling, Qualifikationen Basiskenntnisse. Dezember 2018, Stand 2018-04, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Fachbereich Bautechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI-3633, 2018: VDI-Richtlinie – Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Begriffe. Mai 2018, Stand 2018-08, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL), Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI-3633, Blatt 1, 2014: VDI-Richtlinie – Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen Grundlagen VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 1: Grundlagen und Planung VDI-Handbuch Technische Logistik, Band 8: Materialfluss II (Organisation/Steuerung). Dezember 2014, Stand 2016-11, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL), Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Voigtmann, 2014: Simulation baulogistischer Prozesse im Ausbau. Dissertation 2014, Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Band 33, Bauhaus-Universität Weimar. Bauhaus Universitätsverlag.

von Bertalanffy, 1968: General System Theory, Foundations, Development, Applications. University of Alberta Edmonton, Canada. George Braziller, lnc. One Park Avenue New York, 1968.

von Cube, 1970: Was ist Kybernetik? Grundlagen Methoden Anwendungen, 3. Auflage 1970. Verlag Carl Schünemann, Bremen.

Vygen/Joussen/Lang/Rasch, 2015: Bauverzögerung und Leistungsänderung, Rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen, 7. Auflage 2015. Hrsg. Vygen/Joussen/Lang/Rasch. Werner Verlag, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Wakefield/Sears, 1997: Petri nets for simulation and modeling of construction systems. In: Journal of construction engineering and management, Vol. 123, Issue 2/1997, S. 105-112. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Watkins/Mukherjee/Onder/Mattila, 2009: Using Agent-Based Modeling to Study Construction Labor Productivity as an Emergent Property of Individual and Crew Interactions. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 135, Issue 7/2009, S. 657-667. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Weber/Helmus, 2006: Aktuelle Situation und Erfahrung der Nachunternehmer in der deutschen Bauwirtschaft. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, Heft 12/2006, S. 34-36. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.

Weise, NJW-Spezial 2017: Die einseitige Anordnung im neuen Bauvertragsrecht. In: Neue Juristische Wochenschrift Spezial (NJW-Spezial), Heft 16/2017, 492-493. Verlag C. H. Beck, München.

Weise, NJW-Spezial 2018a: VOB/B bleibt weiter unverändert. In: Neue Juristische Wochenschrift Spezial (NJW-Spezial), Heft 10/2018, 300-301. Verlag C. H. Beck, München.

Weise, NJW-Spezial 2018b: Preisfortschreibung nach tatsächlichen Mehrkosten? In: Neue Juristische Wochenschrift Spezial (NJW-Spezial), Heft 16/2018, 492-493. Verlag C. H. Beck, München.

Weigel, 2017: Masterarbeit: Bewertung ausgewählter Nachweisverfahren für die terminbezogene Beurteilung auftragnehmerseitiger Ansprüche aus Bauzeitnachträgen. Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel, 2016.

Wessel, ZfBR 2010: Bauzeitverzögerungen, Ausführungsfristen und „Zeitpuffer". In: Zeitschrift für deutsches und internationales Bau- und Vergaberecht (ZfBR), Heft 6/2010, 527-532. Verlag C. H. Beck oHG, München.

Williams/Ackermann/Eden, 2001: Delay and disruption (D and D) claims: preparing them and learning lessons for future projects. In: Fourth European Project Management Conference, 01.06.2001.

Wotschke/Kindermann, 2011: Die Simulation des (un)gestörten Bauablaufs als Beweismittel in einem Streitfall. In: Simulation von Unikatprozessen: Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis, Schriftenreihe Bauwirtschaft, III Tagungen und Berichte, Universität Kassel. Hrsg. Franz, S. 93-107. kassel university press GmbH, Kassel 2011.

Würfele/Gralla/Sundermeier, 2012: Nachtragsmanagement, Leistungsbeschreibung Leistungsabweichung, Bauzeitverzögerung, 2. Auflage 2012. Hrsg. Würfele/Gralla/Sundermeier. Verlag Luchterhand, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln.

Xu/AbouRizk, 1999: Product-based model representation for integrating 3D CAD with computer simulation. In: Proceedings of the 31st conference on Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ, USA, 5.-8. December 1999. Hrsg. Farrington/Nembhard/Sturrock/Evans, Vol. 2, S. 971-977.

Zanner/Saalbach/Viering, 2014: Rechte aus gestörtem Bauablauf nach Ansprüchen, Entscheidungshilfen für Auftraggeber, Auftragnehmer und Projektsteuerer, Bau- und Architektenrecht nach Ansprüchen. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2014.

Zeiß, 2009: Kritische Analyse technischer Begründungen zu Ansprüchen auf Schadenersatz wegen verlängerter Bauzeit. Auszug aus der Festschrift für Friedrich Quack „Recht und Baurecht – ein Leben", 2009. Internetquelle: www.bau-managementforum.de/uploads/media/Beitrag_zur_Festschrift_Prof._Quack.pdf, [Zuletzt abgerufen am 01.06.2017].

Zhang/Li/Lu, 2008: Modeling time-constraints in construction operations through simulation. In: Journal of construction engineering and management, Vol. 134, Issue 7/2008, S. 545-554. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Zimmermann/Hamann, 2009: Vergleich bauvertraglicher Regelungsmechanismen im Hinblick auf eine optimierte Abwicklung und zur Senkung von Konfliktpotential am Beispiel von VOB, NEC und FIDIC", Forschungsinitiative ZukunftBau F2710. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2009.

Judikaturverzeichnis

Entnommen aus den online-Plattformen:

BeckRechtsprechung (BeckRS).
Internetadresse: www.beck-online.beck.de, Verlag C. H. Beck, München.

Immobilien und Baurecht Rechtsprechung (IBRRS).
Internetadresse: www.ibr-online.de, id Verlags GmbH, Mannheim.

Bundesgerichtshof:

BGH, Urteil vom 20.02.1986 – AktZ. VII ZR 286/84 (KG), BeckRS 9998: 163960.
BGH, Urteil vom 21.12.1989 – AktZ. VII ZR 132/88, IBRRS 2000: 0939.
BGH, Urteil vom 14.01.1999 – AktZ. VII ZR 73/98, IBRRS 2000: 0695.
BGH, Urteil vom 21.10.1999 – AktZ. VII ZR 185/98, IBRRS 2000: 0800.
BGH, Urteil vom 11.11.1999 – AktZ. VII ZR 403/98, IBRRS 2000: 0774.
BGH, Urteil vom 21.03.2002 – AktZ. VII ZR 224/00, IBRRS 2002: 0570.
BGH, Urteil vom 24.02.2005 – AktZ. VII ZR 141/03, IBRRS 2005: 1218.
BGH, Urteil vom 24.02.2005 – AktZ. VII ZR 225/03, IBRRS 2005: 1177.
BGH, Beschluss vom 25.10.2012 – AktZ. VII ZR 233/11, IBRRS 2012: 4506.
BGH, Beschluss vom 10.01.2013 – AktZ. VII ZR 110/11, IBRRS 2011: 3693.
BGH, Urteil vom 14.03.2013 – AktZ. VII ZR 142/12, IBRRS 2013: 1570.
BGH, Beschluss vom 12.12.2013 – AktZ. IX ZR 299/12, IBRRS 2014: 0534.
BGH, Beschluss vom 19.07.2017 – AktZ. VII ZR 297/14, IBRRS 2017: 4000.
BGH, Urteil vom 26.10.2017 – AktZ. VII ZR 16/17, IBRRS 2017: 3751.

Kammergericht (OLG Berlin):

KG, Urteil vom 19.04.2011 – AktZ. 21 U 55/07, IBRRS 2011: 5286.
KG, Urteil vom 10.01.2017 – AktZ. 21 U 14/16, IBRRS 2017: 0410.
KG, Urteil vom 10.07.2018 – AktZ. 21 U 30/17, IBRRS 2018: 2231.

Oberlandesgericht Brandenburg:

OLG Brandenburg, Beschluss vom 18.08.2009 – AktZ. 11 W 25/08, IBRRS 2011: 1539.
OLG Brandenburg, Urteil vom 02.12.2015 – AktZ. 11 U 102/12, IBRRS 2015: 3225.

Oberlandesgericht Düsseldorf:

OLG Düsseldorf, Urteil vom 21.11.2014 – AktZ. I-22 U 37/14, BeckRS 2015: 226.
OLG Düsseldorf, Urteil vom 24.03.2015 – AktZ. I-21 U 137/14, BeckRS 2016: 16047.

Oberlandesgericht Dresden:

OLG Dresden, Urteil vom 06.01.2012 – AktZ. 1 U 13/10, IBRRS 2012: 1754.

Oberlandesgericht Hamm:

OLG Hamm, Urteil vom 12.02.2004 – AktZ. 17 U 56/00, IBRRS 2004: 0821.
OLG Hamm, Urteil vom 14.04.2005 – AktZ. 21 U 133/04, IBRRS 2005, 2393.
OLG Hamm, Urteil vom 12.04.2011 – AktZ. I-24 U 29/09, IBRRS 2011: 3693.
OLG Hamm, Urteil vom 30.07.2013 – AktZ. 21 U 84/12, IBRRS 2013: 3984.
OLG Hamm, Urteil vom 09.05.2018 – AktZ. 12 U 88/17, IBRRS 2018: 1881.

Oberlandesgericht Köln:

OLG Köln, Beschluss vom 28.11.2011 – AktZ. 17 U 141/10, IBRRS 2012: 4506.
OLG Köln, Beschluss vom 27.10.2014 – AktZ. 11 U 70/13, IBRRS 2015: 0137.
OLG Köln, Urteil vom 28.01.2014 – AktZ. 24 U 199/12, IBRRS 2014: 1002.
OLG Köln, Urteil vom 31.05.2017 – AktZ. 16 U 98/16, IBRRS 2017: 2535.
OLG Köln, Urteil vom 05.07.2017 – AktZ. 16 U 138/15, IBRRS 2017: 2510.

Oberlandesgericht München:

OLG München, Beschluss vom 02.09.2014 – AktZ. 27 U 2924/14 Bau, IBRRS 2017: 4000.
OLG München, Urteil vom 27.04.2016 – AktZ. 28 U 4738/13 Bau, IBRRS 2017: 2365.

Anhang

Für die Fallbeispiele des Anhangs gelten folgende Abkürzungen:

AG	=	Auftraggeberseitiger Behinderungssachverhalt
AN	=	Auftragnehmerseitiger Störungssachverhalt
Ist	=	Dokumentierte Informationen vom Ist-Bauablauf
„Ist“	=	Ist-Bauablaufmodell (Simulationsergebnis)
Mod.	=	Modifiziertes Bauablaufmodell (Simulationsergebnis)
P	=	Pufferzeit
Soll(0)	=	Ursprüngliches Soll(0)-Bauablaufmodell (Simulationsergebnis)
V1	=	Vorgangsintervall 1
V2	=	Vorgangsintervall 2
V3	=	Vorgangsintervall 3
V4	=	Vorgangsintervall 4

A.1 Fallbeispiel nach *Roquette et al.* (Fall 3)

Im *Bauablaufmodell 2. Mod*. wird zum Zeitpunkt der *2. Stützstellenverifizierung* das *Vorgangsintervall V2* vorgezogen – dadurch verbraucht der Auftragnehmer die freie *Pufferzeit P*. Um diesen Schritt durchzuführen, muss sich im *2. Ist-Anhaltspunkt* mindestens ein belegbares Dokument befinden, welches diesen Sachverhalt beschreibt. Weiterhin ist der auftraggeberseitige *Behinderungssachverhalt AG* im Bauablaufmodell *4. Mod.* zu modellieren. Die dadurch resultierende Behinderungszeit „Behinderung“ wird mit dem Bauablaufmodell *4. Mod.* abgegriffen. Nach der gesamten Fortschreibung bestehen keine Verzugs- oder Fristverlängerungsansprüche, da der Ist-Bauablauf vor dem Fertigstellungstermin beendet wurde.

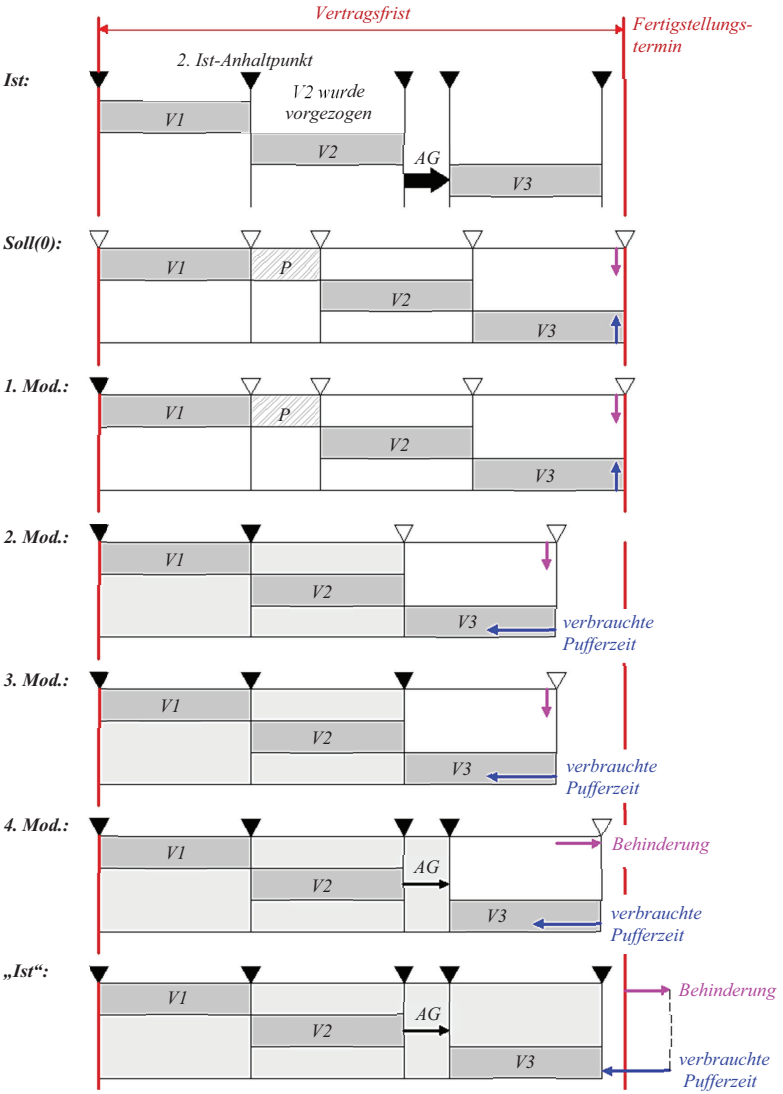


Abbildung A-1: Fallbeispiel nach Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 672

A.2 Fallbeispiel nach *Roquette et al.* (Fall 4)

Im unten gezeigten Fallbeispiel wird davon ausgegangen, dass der Auftragnehmer die *Pufferzeit P* für seine Produktionsprozesse nicht genutzt hat. Stattdessen tritt die belegbare *Verzögerung AN* ein, die für die Gesamtverzögerung ursächlich ist (siehe Zeitvektoren). Nach der gesamten Fortschreibung bestehen Verzugsansprüche seitens des Auftraggebers gegenüber dem Auftragnehmer. Der Auftragnehmer hat die *Pufferzeit P* für seine Produktionsprozesse nicht genutzt. Dies ist daran zu erkennen, dass der *2. Ist-Anhaltspunkt* keine überprüfbaren Dokumente enthält, die auf einen vom Auftragnehmer ausgeführten Leistungsstand hinweisen. Auch während der *Pufferzeit P* sind keine Zustandsbeschreibungen eines möglichen Ist-Anhaltspunkts vorhanden, die das Vorziehen einer auszuführenden Bauleistung belegen.

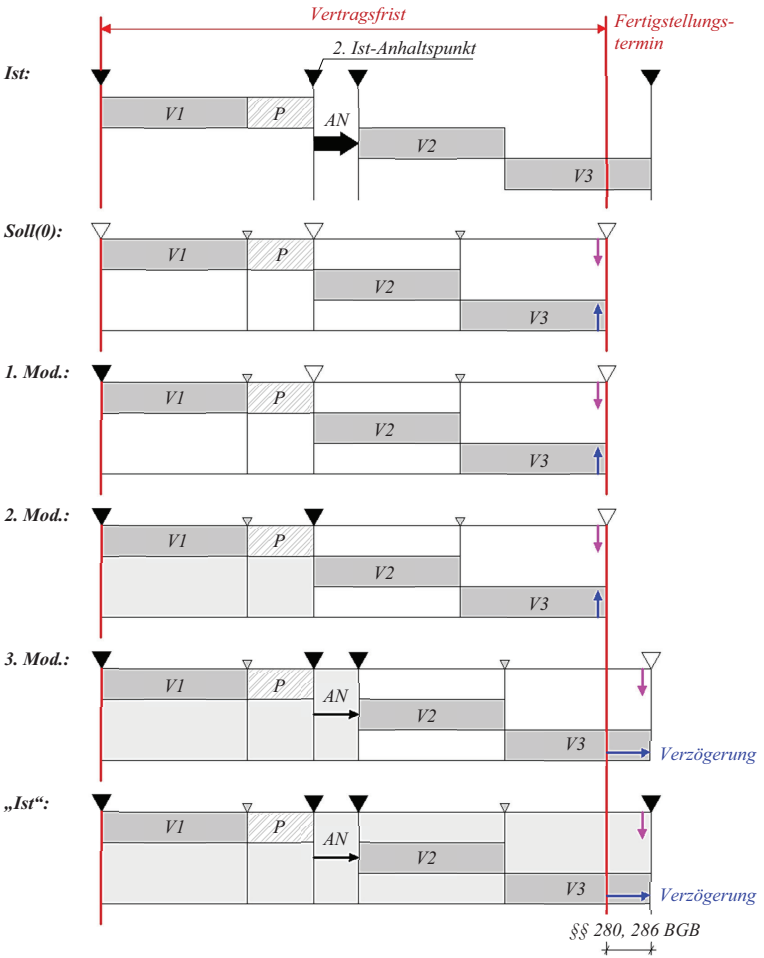


Abbildung A-2: Fallbeispiel nach Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 673

A.3 Fallbeispiel nach *Roquette et al.* (Fall 5)

Im folgenden Fallbeispiel gehen *Roquette et al.* von einer auftraggeber- und einer auftragnehmerseitig verursachten Bauablaufstörung aus. Die vom Auftraggeber erzeugte *Behinderung AG* wird durch die im Soll(0)-Bauablauf eingeplante *Pufferzeit P* vollständig aufgefangen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass kein weiterer Ist-Anhaltspunkt vorhanden ist, der gegen derartige Umstände spricht. Darum kommt *keine* Verschiebung des tatsächlichen Fertigstellungstermins durch die *Behinderung AG* zustande.

Darüber hinaus nutzt der Auftragnehmer die verfügbare *Pufferzeit P* nicht. Daher verschiebt die vom ihm verursachte *Verzögerung AN* den Fertigstellungstermin zeitlich nach hinten, somit ist die Fristüberschreitung auf das auftragnehmerseitige Verhalten zurückzuführen. Die nicht genutzte Pufferzeit muss, wie der Eintritt der auftragnehmerseitigen Verzögerung, aus Dokumenten des *4. Ist-Anhaltpunkts* entnommen werden können.

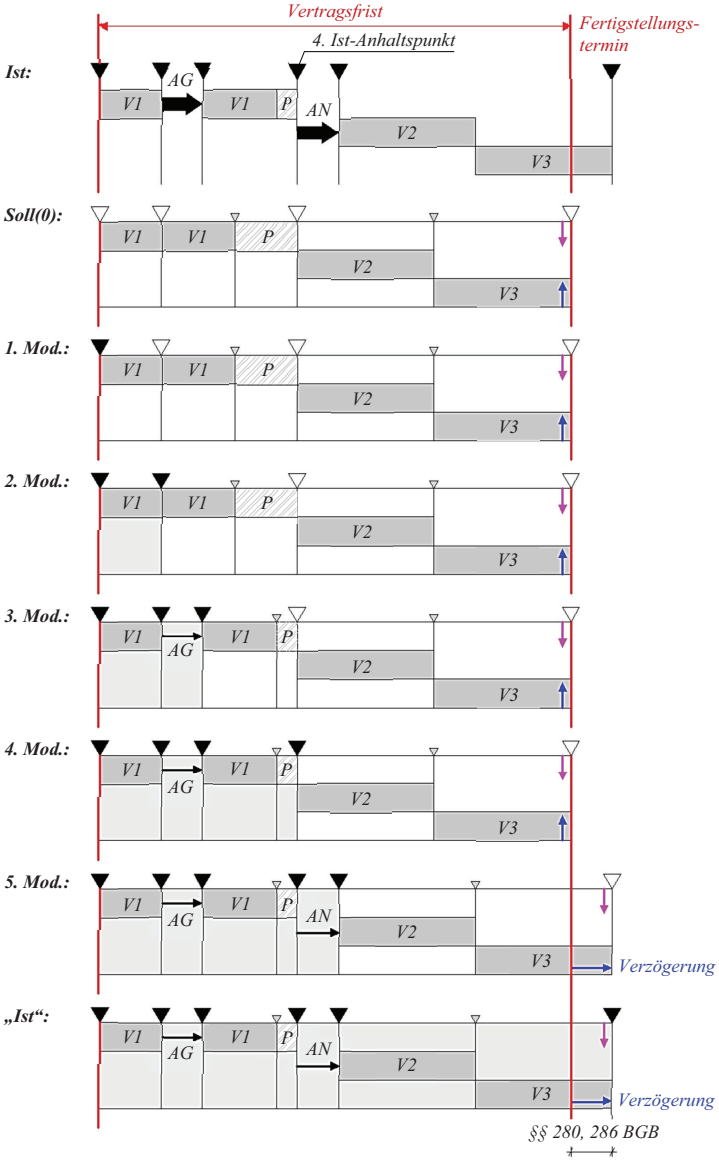


Abbildung A-3: Fallbeispiel nach Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 675

A.4 Fallbeispiel nach *Roquette et al.* (Fall 6)

Im nachstehenden Fallbeispiel der *Abbildung A-4* wird wie im Fallbeispiel des *Anhangs A.3* davon ausgegangen, dass eine auftraggeber- und eine auftragnehmerseitige Bauablaufstörung vorliegen. In dem in *Abbildung A-4* dargestellten Fall ist der Auftragnehmer zur eingeplanten *Pufferzeit P* leistungsbereit, um die Arbeiten des *Vorgangsintervalls V2* vorziehen zu können. Tatsächlich ist das Vorziehen der Arbeiten aber nicht möglich, da eine vom Auftraggeber verursachte Behinderung die Nutzung der *Pufferzeit P* verhindert. Der Nachweis der Leistungsbereitschaft erfolgt über die belegbaren Dokumente, die dem *4. Ist-Anhaltspunkt* zu entnehmen sind. Beispielsweise werden Lohnstundenzettel vorausgesetzt, die belegen, dass die Arbeiten während der *Pufferzeit P* hätten beginnen können. Hinweise für den Beginn möglicher Arbeiten würde das systeminterne Störungsprotokoll gem. *Kapitel 7.2.3* liefern.

Um die zeitlichen Auswirkungen der vom Auftraggeber verursachten Bauablaufstörung als Behinderung erfassen zu können, müssen dem Auftragnehmer *Pufferzeiten +P* gutgeschrieben werden. In der *Abbildung A-4* erfolgt dies im *Bauablaufmodell 4. Mod.*, so dass eine abgreifbare Verschiebung zustande kommt. Auf Modellebene kann dies durch die Verlegung eines Starttermins erfolgen (gem. *Kapitel 6.2.5* besitzt jeder Start zwei Anfangstermine).

Die Berücksichtigung solcher freier Pufferzeiten erfordert seitens des Anwenders ein aufmerksames Arbeiten. Die Soll-zu-Ist-Modifikation unterstützt derartige Sachverhalte durch die chronologisch angeordneten Ist-Anhaltspunkte.

Zur Erfassung der Behinderung könnte alternativ ein eigenständiges Gruppenintervall bis zum *3. Ist-Anhaltspunkt* ausgearbeitet werden, damit die Behinderungsdauer direkt abgegriffen werden kann. Diese lässt sich an ein darauf folgendes Gruppenintervall „weitergeben". Andernfalls könnte der Fertigstellungstermin zu dieser Momentanbetrachtung zeitlich nach hinten verlegt werden, um dem Auftraggeber eine zusätzliche Gesamtpufferzeit zu gewähren.

In der weiteren Fortschreibung wird die verbleibende *Pufferzeit P* und die gutgeschriebene *Pufferzeit +P* vom Auftragnehmer genutzt, so dass im *Bauablaufmodell 5. Mod.* eine „verbrauchte Pufferzeit" ermittelt werden kann. Die auftragnehmerseitige *Bauablaufstörung AN* führt im *Bauablaufmodell 7. Mod.* zu einer Verzögerung. Sie wird durch die verbrauchte Pufferzeit im Sinne der Vektorrechnung kompensiert (siehe Modellversion *7. Mod.*).

Im Gesamtergebnis ergibt sich eine Behinderungsdauer, die ursächlich für die Überschreitung des Fertigstellungstermins ist.

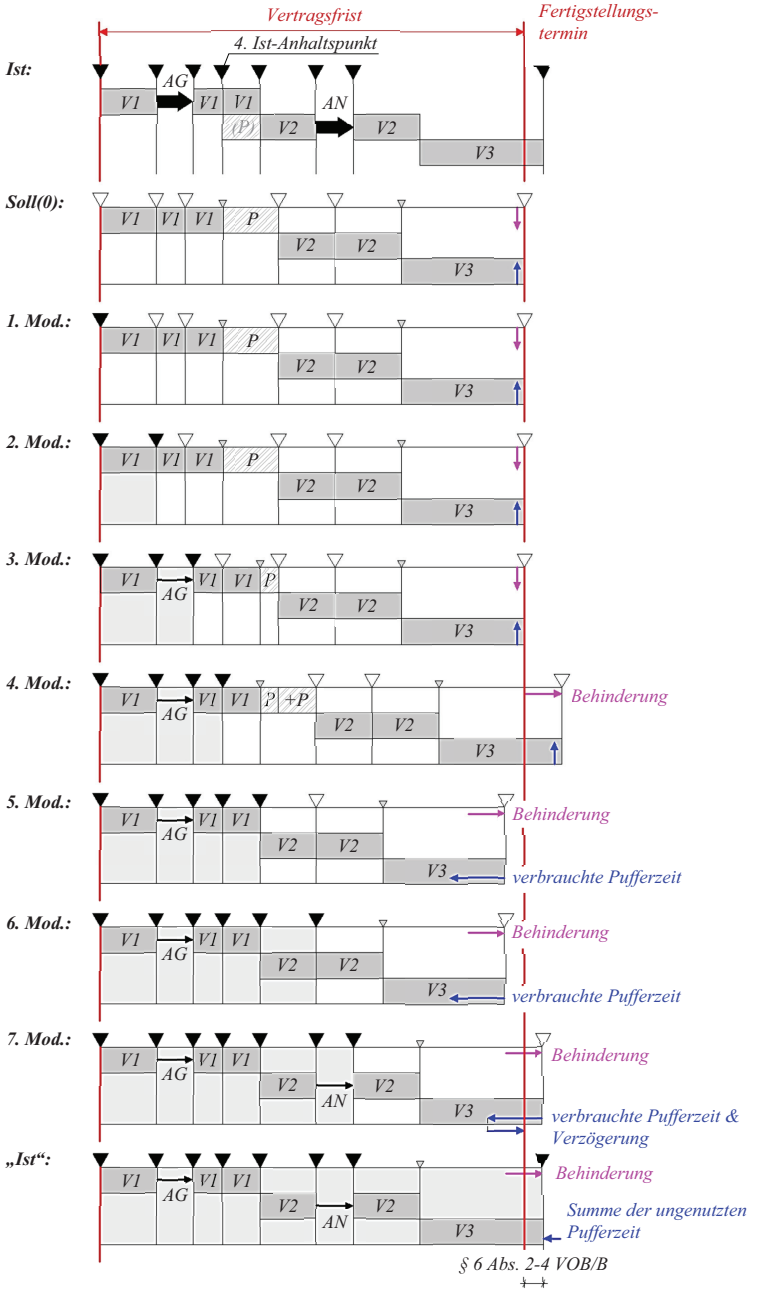


Abbildung A-4: Fallbeispiel nach Roquette/Viering/Leupertz, Rdn. 676

A.5 Fallbeispiel nach *Lang/Rasch*

Das folgende Fallbeispiel berücksichtigt Hemmungen und Beschleunigungen eines gestörten Bauablaufs. Im *Bauablaufmodell 3. Mod.* tritt die auftragnehmerseitige Bauablaufstörung ein. Sie wird als Behinderungsdauer durch einen Zeitvektor abgegriffen.

Im *Bauablaufmodell 4. Mod.* wird aufgrund der dort durchgeführten Stützstellenverifizierung eine Beschleunigungsmaßnahme seitens des Auftragnehmers sichtbar. Die dadurch erreichte Zeitabweichung wird mit einem Zeitvektor festgehalten und dem Auftragnehmer „gutgeschrieben". Im *Bauablaufmodell 5. Mod.* kommt die zweite Bauablaufstörung des Auftraggebers zum Tragen. Daraufhin wird im *Bauablaufmodell 6. Mod.* eine weitere Beschleunigungsmaßnahme des Auftragnehmers identifiziert.

Im *Bauablaufmodell 7. Mod.* verlängert sich das *Vorgangsintervall V4*, so dass eine auftragnehmerseitige Verzögerung vorliegt. Diese Änderung wird als *Verzögerung* erfasst, da die Ist-Anhaltspunkte keine Informationen enthalten, die gegen eine derartige Annahme sprechen. Das abschließende *„Ist"-Bauablaufmodell* verdeutlicht, dass die Verzögerung des Auftragnehmers durch die zuvor eingeleiteten Beschleunigungsmaßnahmen kompensiert wird. Letztendlich sind es ausschließlich die Zeitanteile der beiden Behinderungen, die den verspäteten Fertigstellungstermin ausgelöst haben. Aus diesem Grund liegt ein Fristverlängerungsanspruch vom geplanten bis zum tatsächlichen Fertigstellungstermin vor.

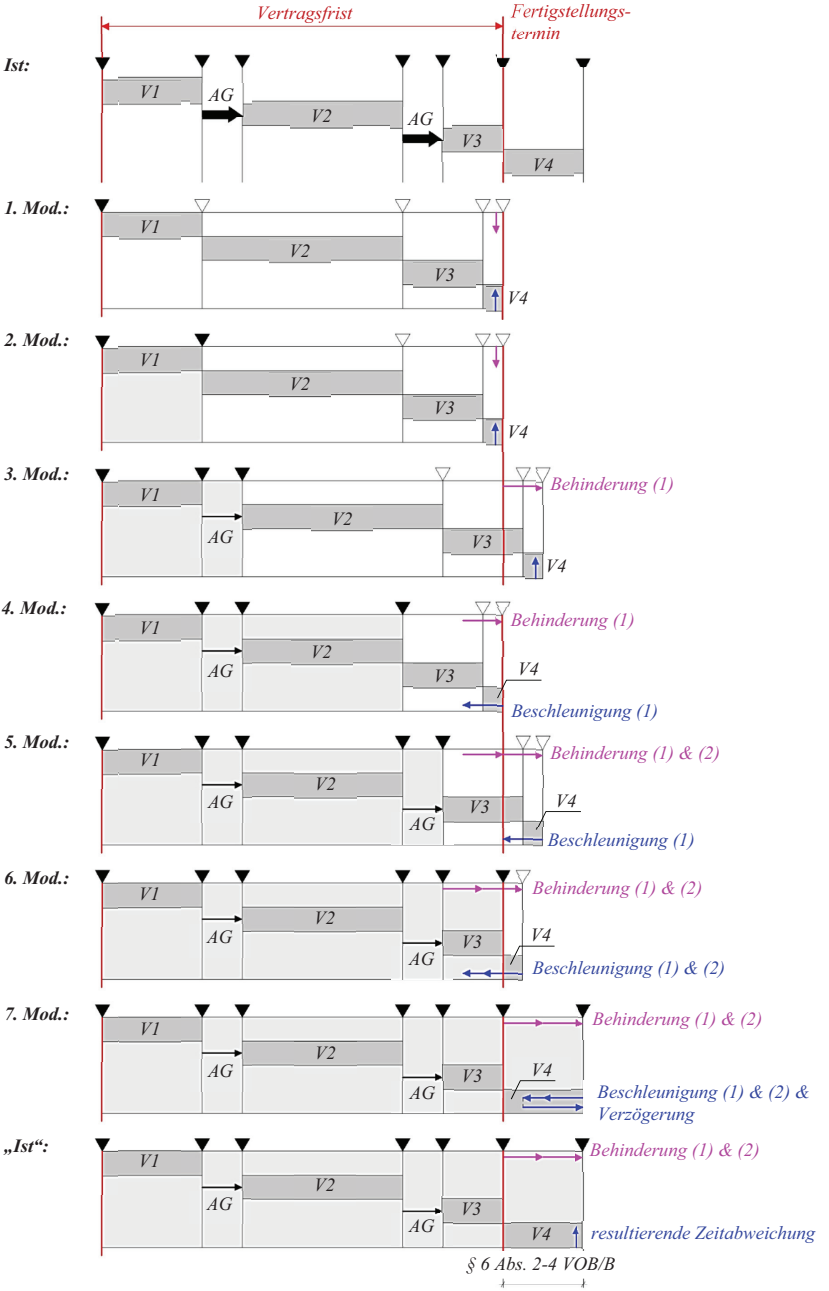


Abbildung A-5: Fallbeispiel nach Lang/Rasch in Vygen/Joussen/Lang/Rasch, Rdn. 163, S. 631

Kontakt:
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen
Institut für Bauwirtschaft (IBW)
Mönchebergstr. 7
34109 Kassel

Fachgebiete:		Sekretariate:
Bauwirtschaft/Projektentwicklung	Prof. Busch	0561 / 804 3105
Bauorganisation und Bauverfahren	Prof. Franz	0561 / 804 2615
Baubetriebswirtschaft	Prof. Racky	0561 / 804 2619
Bauinformatik	n. n.	0561 / 804 3675

www.ibw-kassel.de

Schriftenreihe Bauwirtschaft
des Instituts für Bauwirtschaft der Universität Kassel

I - Forschung

Band 1: Schopbach, Holger (2001)
Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden

Band 2: Grau, Heidrun (2002)
Zielorientiertes Geschäftsprozessmanagement zur Förderung der Wirtschaftlichkeit von Abbundzentren

Band 3: Arnold, Daniel (2005)
Entwicklung einer Methodik für Innovationsprozesse im Wohnungsbau

Band 4: Schmitt, Roland (2005)
Die Beschaffung von Schalungsgeräten und den zugehörigen Ingenieurleistungen nach deren Outsourcing

Band 5: Heinrich, Nils (2006)
Entwicklung von Parametern zur Risikobewertung für Projektentwicklungen auf brachgefallenen Flächen - am Beispiel freizeitlich orientierter Projekte

Band 6: Mittelstädt, Norbert (2006)
Leitlinie zur projektbezogenen Spezifikation und erfolgsabhängigen Honorarbemessung von extern beauftragten Projektmanagement-Leistungen

Band 7: Chahrour, Racha (2007)
Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau

Band 8: Mieth, Petra (2007)

Weiterbildung des Personals als Erfolgsfaktor der strategischen Unternehmensplanung in Bauunternehmen. Ein praxisnahes Konzept zur Qualifizierung von Unternehmensbauleitern

Band 9: Mergl, Oliver (2007)

Flexibilisierung von Baustrukturen durch Modularisierung zur Verbesserung des Nutzungspotenziales am Beispiel industrieller Produktionsstätten des Automobilbaus

Band 10: Eitelhuber, Andreas (2007)

Partnerschaftliche Zusammenarbeit in der Bauwirtschaft – Ansätze zu kooperativem Projektmanagement im Industriebau

Band 11: Hermelink, Andreas (2008)

Ein systemtheoretisch orientierter Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigkeitsgerechten Technikbewertung angewandt auf den mehrgeschossigen Wohnungsbau im Niedrigstenergie-Standard

Band 12: Utsch, Jens H. (2008)

Entscheidungskomplexorientiertes Controlling – ein Beitrag zur Unterstützung der Planung und Entscheidungsfindung im Baubetrieb

Band 13: Pauli, Christian (2009)

Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Beurteilung der PPP-Eignung kommunaler Bauvorhaben

Band 14: Fistera, Detlev (2009)

Revitalisierung brachgefallener Wohnbauflächen. Indikatorenbildung zur multikriteriellen Untersuchung und prophylaktischen Abschätzung von entstehenden Wohnbaubrachen

Band 15: Dobler, Thomas (2009)

Entwicklung der Archintra-Methodik als Beitrag zur Verbesserung von Bauprozessen

Band 16: Strack, Stefan (2010)

Entwicklung eines Bewertungssystems für Redevelopment-Maßnahmen von leer stehenden Gebäuden für Wohnzwecke

Band 17: Körtgen, Manfred (2010)

Optimierungsansätze zur prozessorientierten Abwicklung komplexer Baumaßnahmen unter Einsatz neuer Informations- und Kommunikationssysteme

Band 18: Stichnoth, Philipp (2010)

Entwicklung von Handlungsempfehlungen und Arbeitsmitteln für die Kalkulation betriebsphasenspezifischer Leistungen im Rahmen von PPP-Projekten im Schulbau

Band 19: Deppenmeier, Jens (2011)

Lebenszyklusorientierte Planung von Erschließungskonzepten in Hochhäusern am Beispiel von Aufzugsanlagen. Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Lebenszykluskosten mit Hilfe von Verkehrsberechnungs-Simulationen unter Berücksichtigung der Transportstrategie

Band 20: Schleicher, Melanie (2012)

Komplexitätsmanagement bei der Baupreisermittlung im Schlüsselfertigbau

Band 21: Altmüller, Patrick (2012)

Entwicklung einer differenzierten Preisgleitklausel für Funktionsbauverträge im Straßenbau

Band 22: Kugler, Martin (2012)

CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau

Band 23: Groenmeyer, Thomas (2012)

Logistikimmobilien vom Band. Standardisierung im gewerblichen Hochbau am Beispiel von Warehouse-Logistikimmobilien

Band 24: Schölzel, Stefan (2013)

Optimierungsanalysen und -ansätze des Planungs- und Schnittstellenmanagements vor Baubeginn im Vergleich zur baubegleitenden Planung

Band 25: Schlabach, Carina (2013)

Untersuchungen zum Transfer der australischen Projektabwicklungsform Project Alliancing auf den deutschen Hochbaumarkt

Band 26: Kordi, Basel (2013)

Ansätze zur automatischen Terminplanung für Roh- und Ausbauarbeiten auf Basis der Integration von CAD- und Bauprozessmodellen

Band 27: Federowski, Martin (2014)

Mieterbetreuung als Projektmanagementprozess beim Bauen im bewohnten Bestand

Band 28: Rathswohl, Stefan (2014)

Entwicklung eines Modells zur Implementierung eines Wissensmanagement-Systems in kleinen und mittleren Bauunternehmen

Band 29: Samkari, Kais (2015)

Automatisierungsansätze zur Verbesserung der Simulation von Bauabläufen im Hochbau

Band 30: Hintsche, Sven L. (2015)

Optimierung der Schnittstellenregelung zwischen dem auftraggeberseitigen Betriebsdienst und der auftragnehmerseitigen baulichen Erhaltung bei Funktionsbauverträgen im Straßenbau

Band 31: Aljaratli, Dima (2015)

„CIREVIVAL“: ein Bewertungssystem für Wiederaufbau-Maßnahmen von zerstörten öffentlichen Gebäuden in Syrien

Band 32: Bleichert, Oliver (2015)

Entwicklung eines Simulationswerkzeuges zur Ermittlung des Energieverbrauchs im Rahmen der Ökobilanzierung von Bauprozessen

Band 33: Astour, Habeb (2016)

Entwicklung eines BIM-basierten Systems zur Entscheidungsunterstützung mittels Simulation für die Baustelleneinrichtungsplanung

Band 34: Hassoun, Bashar (2016)

Entwicklung eines Fehlermanagement-Systems zum sicheren Umgang mit menschlichen Ausführungsfehlern im Hochbau

Band 35: Rode, Bernd (2016)

Entwicklung von Indikatoren zur Bestimmung eines zukünftigen baulichen Bedarfs sozialer Institutionen dargestellt am Beispiel einer Tagespflege

Band 36: Vollmer, Kévin (2017)

Konzept einer webbasierten Plattform für das Produktionsmanagement von Bauprozessen in der Großregion Saar - Lor - Lux - Rheinland-Pfalz – Wallonie

Band 37: Olender, Margarete Dorothea (2018)

Kontrollierte Planungsprozesse. Entwicklung eines Systems zur Reduktion von Störungen und Optimierung von Planungsabläufen

Band 38: Tiesler, Antje S. L. (2018)

Entwicklung eines substantiierten Kausalitätsnachweises von Ursache und Wirkung für Bauablaufstörungen auf Basis der deutschen Rechtsprechung

Band 39: Klahm, Roman M. (2019)

Entwicklung eines Verfahrens zur Prozesssteuerung mittels Indikatoren für die Realisierung von Bauvorhaben im Hochbau

Band 40: Gnerlich, Ralf (2019)

Entwicklung eines Konzepts zur digitalen Untersuchung von Bauzeitverzögerungen auf Grundlage einer BIM-basierten Bauablaufsimulation

II - Lehre

Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)
Seminar Sommersemester 2003, Hochhäuser

III - Tagungen und Berichte

Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)
Tagungsband zum Symposium 2002
Projektentwicklung brachgefallener Flächen am 13. September 2002

Band 2: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)
3. IBW-Symposium, 17. September 2004 an der Universität Kassel.
Partnerschaftliche Vertragsmodelle für Bauprojekte

Band 3: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)
4. IBW-Symposium, 15. September 2006 an der Universität Kassel.
Innovative Abwicklungsformen für Bauprojekte: Partnering und PPP

Band 4: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)
1. IBW-Workshop, 13. September 2007 an der Universität Kassel.
Simulation in der Bauwirtschaft

Band 5: Busch, Prof. Dr.-Ing. Antonius (Hrsg.)
5. IBW-Symposium, 26. September 2008 an der Universität Kassel.
Projektentwicklung brachgefallener Flächen und Immobilien

Band 6: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)
Tagungsband des 20. Assistententreffens der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 01. – 03. April 2009 an der Universität Kassel

Band 7: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)
Forum Baubetrieb, 4. November 2009 an der Universität Kassel.
Kooperationsorientierte Projektabwicklung im Hochbau

Band 8: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)
2. IBW-Workshop, 24. März 2011 an der Universität Kassel.
Simulation von Unikatprozessen – Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis

Band 9: Busch, Prof. Dr.-Ing. Antonius (Hrsg.)

„RÖ 80 – Was hat es gebracht“. Tagungsband zum IBW-Konvent 2016 anlässlich des 80. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rösel veranstaltet am 11.11.2016 vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel

Weitere Informationen zur Schriftenreihe unter www.uni-kassel.de/upress

ISBN 978-3-7376-0682-0

