

Produktion & Energie

Band 1

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach



**Mark Junge**

**Simulationsgestützte  
Entwicklung und Optimierung  
einer energieeffizienten  
Produktionssteuerung**

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

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

Prof. Dipl.-Ing. Adolf Reinhardt

Prof. Dr.-Ing. h.c. Jürgen Hesselbach

Tag der mündlichen Prüfung

30. März 2007

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. 2007

ISBN 978-3-89958-301-9

URN: urn:nbn:de:0002-3016

© 2007, kassel university press GmbH, Kassel

[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Umschlaggestaltung: Karen Marschinke, Formkonfekt, Kassel

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel

Printed in Germany

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse (upp) des Institutes für Produktionstechnik und Logistik (IPL) der Universität Kassel.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach für seine Unterstützung und den Freiraum, den er mir bei der Durchführung dieser Arbeit und meiner Tätigkeit am Fachgebiet gegeben hat, bedanken.

Ebenso gilt mein besonderer Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel für die Übernahme des Zweitgutachtens und die Unterstützung bei dieser Arbeit. Außerdem bedanke ich mich bei den Prüfern Herrn Prof. Dipl.-Ing. Adolf Reinhardt und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jürgen Hesselbach.

Zudem danke ich allen Mitarbeitern sowie allen Studien- und Diplomarbeitern des Fachgebiets für die konstruktive Unterstützung. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Antje Bußmann, Frau Verena Horn, Herrn Björn Bockel und Herrn Lars Martin für die kritische Durchsicht dieser Arbeit ganz besonders bedanken.

Mark Junge

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	1
1 Einleitung	4
2 Ausgangssituation	6
3 Produktionsplanung und -steuerung	13
3.1 Definitionen und Einordnung	13
3.2 Charakterisierung der Betriebstypen	18
3.3 Ziele	22
3.4 Verfahren der Maschinenbelegungsplanung	24
3.4.1 Optimierende Verfahren	27
3.4.2 Heuristische Verfahren	27
3.4.3 Verfahren der künstlichen Intelligenz	32
3.5 Umweltorientierung in PPS-Systemen	33
4 Materialflusssimulation	34
4.1 Definition	34
4.2 Einsatzgebiete	36
4.3 Methode und Konzept	39
5 Thermische Gebäudesimulation	44
5.1 Definition	44
5.2 Einsatzgebiete	45
5.3 Methode	46
6 Stoff- und Energiefluss von Maschinen	53
6.1 Ökobilanzierung / Ganzheitliche Bilanzierung	53
6.2 Modellansätze für den Kunststoffspritzguss	56
7 Kennzahlen für die Produktion	63
7.1 Kostenrechnung	63
7.2 Durchlaufzeit	65
7.3 Bestand	66
7.4 Auslastung	67
7.5 Termintreue	68
8 Aufbau des Simulationssystems	69

8.1	Anforderungen	69
8.2	Materialflusssimulation	72
8.3	Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen	74
8.4	Thermische Gebäudesimulation	76
8.5	Kopplung Materialflusssimulation – Stoff- und Energiefluss von Maschinen – Gebäudesimulation	79
8.6	Test der Kopplung	82
9	Entwicklung von energieeffizienten Produktionssteuerungskonzepten	84
9.1	Grundlegende Ansätze	84
9.2	Ansatz Temperatortrend	86
9.3	Ansatz Unterscheidung Tag / Nacht	87
9.4	Ansatz Lüftungswärmeverluste	88
9.5	Parameteroptimierung	92
10	Anwendung an einer Beispielanlage	94
10.1	Beschreibung Beispielanlage	94
10.2	Modellerstellung	94
10.2.1	Materialflussmodell	94
10.2.2	Maschinenmodelle	96
10.2.3	Gebäudemodell	97
10.2.4	Kennzahlen	98
10.3	Verifikation und Validierung	100
10.4	Experimentplan	110
10.5	Ergebnisse	112
10.5.1	Energetische Optimierung	112
10.5.2	Wirtschaftliche Optimierung	120
10.5.3	Optimierung Stromkosten	125
10.5.4	Vergleich und Bewertung	130
11	Zusammenfassung und Ausblick	132
	Abbildungsverzeichnis	134
	Tabellenverzeichnis	137
	Formelverzeichnis	138
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang	155



# Nomenklatur

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$\beta$	Stündlicher Luftwechsel	[1/h]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/h]
$\lambda$	Wärmeleitkoeffizient	[W/mK]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\dot{q}$	spezifischer Wärmestrom	[W/m <sup>2</sup> ]
A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
AB	Abgang im Bezugszeitraum	[Stck]
AP	Anzahl Produktionsaufträge	[-]
ATP	Anzahl termintreuer Produktionsaufträge	[-]
AU	Auslastung	[%]
B	Bestand	[Stck]/[Std]
BZ	Bezugszeitraum	[h]
c	Spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]
E	Energie	[J]
H	Enthalpie	[J]
K	Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]
L	Leistung	[h/BKT]
LTT	Liefertermintreue	[%]

m	Masse	[kg]
n	Anzahl Arbeitsvorgänge	[-]
P	Leistung	[W]
p	Druck	[Pa]
R	Reichweite	[h]
S	Spezifischer Strahlungswärmestrom	[W/m <sup>2</sup> ]
s	Weg	[m]
T	Temperatur	[K]
SK	Stromkosten	[€]
SP	Strompreis	[€]
t	Zeit	[s]
TBE	Termin Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges	[h]
TBEV	Termin Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges	[h]
TRA	Rüstanfang	[h]
U	Innere Energie	[W]
V	Volumen/Rauminhalt	[m <sup>3</sup> ]
W	Arbeit	[J]
ZAU	Auftragszeit	[h]
ZDF	Durchführungszeit	[h]
ZDL	Durchlaufzeit	[h]
ZU	Zugang im Bezugszeitraum	[Stck]
ZUE	Übergangszeit	[h]

**Indizes****Benennung**

k

Konvektiv

r

Radiativ

w

Wand

L

Luft

V

Ventilation

H

Heizung

a

Außen

i

Innen

G

Interne Wärmequelle

zu

Zuluft

m

Mittelwert

0

Beginn Bezugszeitraum

1

Ende Bezugszeitraum

max

Maximal

# 1 Einleitung

Die Produktionsplanung und -steuerung ist vor allem durch logistikorientierte Zielgrößen geprägt. Niedrige Bestände und kurze Durchlaufzeiten bei gleichzeitig hoher Termintreue und hoher Auslastung sind das Ziel.

In den letzten Jahren haben vor allem steigende Energiepreise zu neuen Rahmenbedingungen geführt. Die Rohstoffverknappung, Reduzierung von Treibhausgasemissionen und die damit verbundene Umstellung auf erneuerbare Energien werden diesen Trend in den folgenden Jahren noch verstärken.

Produzierende Unternehmen sehen sich daher zunehmend in einem Spannungsfeld zwischen Energie und Klima. Gerade energieintensive Branchen benötigen neue Ansätze, um durch eine energieeffizientere Produktion den steigenden Kosten zu begegnen. Die klassischen Maßnahmen wie neue Maschinenteknologie und verbesserte Gebäude und Gebäudetechnik sind mit hohen Investitionen verbunden und werden nur bei Neuinvestitionen berücksichtigt. Maßnahmen, die durch eine intelligente Steuerung das vorhandene Einsparpotenzial ausschöpfen, benötigen nahezu keine Investitionen.

In der kunststoffverarbeitenden Industrie besteht ein nicht unerheblicher Energieverbrauch aus Heizenergie. Vor allem bei der Verarbeitung von Materialien, die gesundheitsschädliche Schadstoffe emittieren, führt eine verstärkte Luftwechselrate zu einem deutlich höheren Heizenergiebedarf.

Der Ansatz einer energieeffizienten Produktionssteuerung, die die Wechselwirkungen zwischen Emissionen, Lüftung und Wärmeverlusten ausnutzt, liegt nahe.

Im Rahmen der Arbeit soll daher untersucht werden, ob durch einen solchen Ansatz der Energiebedarf gesenkt werden kann und inwieweit die logistischen und wirtschaftlichen Zielgrößen dadurch beeinflusst werden. Die Untersuchung soll an einem Simulationssystem durchgeführt werden, das neben den Materialflüssen auch die Stoff- und Energieflüsse innerhalb der Fabrik abbildet. Es steht hierbei die Anwendung des Simulationssystems im Vordergrund, weshalb keine wissenschaftliche Untersuchung der Kopplung der verschiedenen Simulatoren durchgeführt wird. Bei der Untersuchung sollen auch Optimierungsmethoden

eingesetzt werden, um die Produktionssteuerung hinsichtlich der energetischen und wirtschaftlichen Zielgrößen zu optimieren.

In Kapitel 2 wird daher zunächst die Ausgangssituation beschrieben, in der neben der Entwicklung der Energiekosten auch die Einsparmöglichkeiten und die Wechselwirkungen innerhalb der Produktion erläutert werden. Daraufhin werden in den Kapiteln 3 bis 7 die benötigten Grundlagen dargestellt. Kapitel 3 definiert die Produktionsplanung und -steuerung sowie deren Ziele und gibt eine Übersicht über die existierenden Verfahren der Maschinenleistungsplanung. In Kapitel 4 werden die Einsatzgebiete und die Methode der Materialflusssimulation beschrieben. Analog dazu findet in Kapitel 5 eine Einführung in die thermische Gebäudesimulation statt. Kapitel 6 gibt den aktuellen Stand im Bereich der Untersuchung von Stoff- und Energieflüssen von Maschinen wieder, wobei auf die Methode der Ökobilanzierung bzw. der Ganzheitlichen Bilanzierung zurückgegriffen wird, aber auch andere Modellansätze im Bereich der Kunststoffverarbeitung aufgegriffen werden. In Kapitel 7 werden zudem die Kennzahlen des logistischen Systems genauer erläutert. Aufbauend auf den Grundlagen wird die Entwicklung des Simulationssystems (Kapitel 8) beschrieben, wobei, ausgehend von den Anforderungen an das System, die einzelnen Komponenten sowie die Kopplung detailliert werden. Daraufhin findet in Kapitel 9 eine Beschreibung der Möglichkeiten für eine energieeffiziente Produktionssteuerung und der entwickelten Ansätze statt. Die Anwendung an einer Beispielanlage und die dabei erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 10 dargestellt (Abbildung 1).

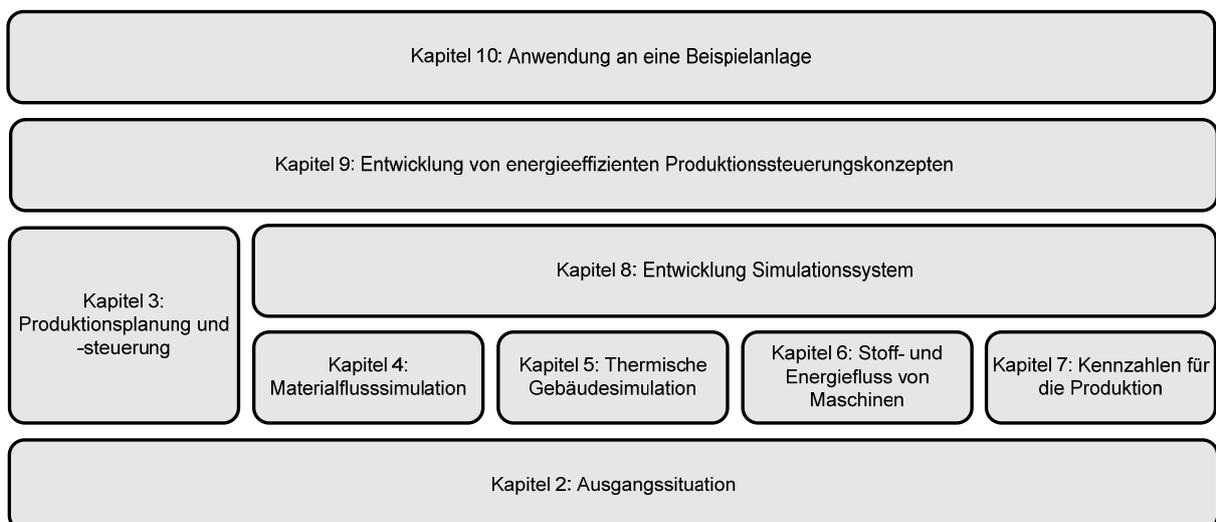


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

## 2 Ausgangssituation

In Produktionsbetrieben werden im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung vorrangig logistische Ziele verfolgt. Dies resultiert aus dem Denken, dass Produktionskosten hauptsächlich durch Materialkosten, Personalkosten und Abschreibungen von Maschinen bzw. Anlagen festgelegt werden. Davon ausgehend wird versucht, eine möglichst hohe Auslastung der Maschinen bei gleichzeitig geringen Beständen und niedrigem Personalaufwand zu erreichen. Die Verschiebung zu einem kundenorientierten Ansatz hat kurze Lieferzeiten und hohe Termintreue in den Blickpunkt gebracht (Wiendahl, 2005, S. 254 f.).

Aktuell sind zudem umweltliche bzw. energetische Zielgrößen zu nennen. Rohstoffverknappung und Klimaerwärmung haben zu steigenden Energiepreisen und Kosten für die Emission von Treibhausgasen geführt. Die Energiepreissteigerung ist sowohl im Strom- als auch im Gas- und Ölmarkt zu erkennen. Beispielhaft ist in Abbildung 2 die Entwicklung des Rohölpreises in den letzten Jahren aufgeführt.

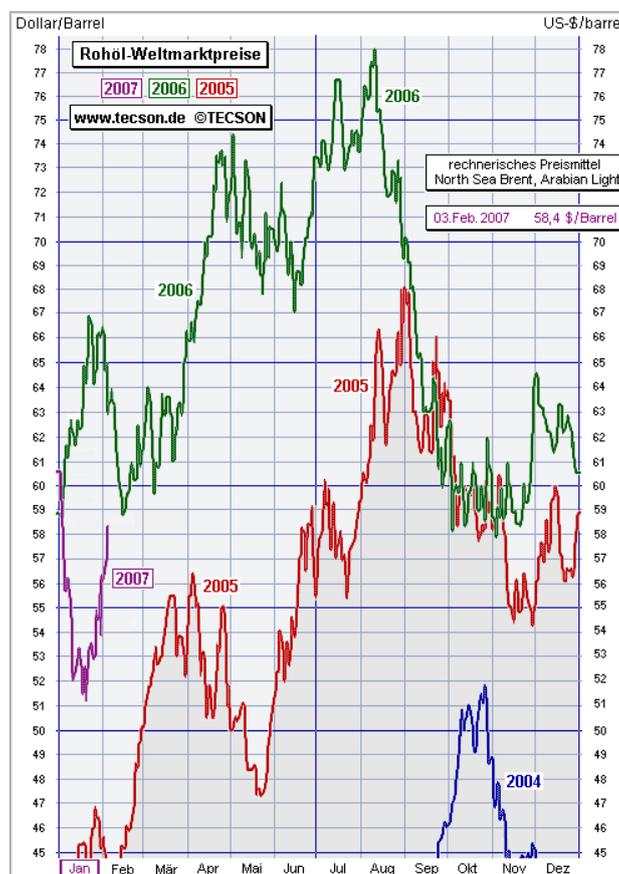


Abbildung 2: Entwicklung des Rohöl-Weltmarktpreises in US-\$/Barrel (Tecson, 2007)

Trotz des aktuellen Rückgangs ist auch weiterhin ein steigender Trend zu prognostizieren, da in den nächsten 10–30 Jahren der Punkt erreicht sein wird, bei dem etwa die Hälfte des zu erwartenden Erdöls bereits gefördert ist („depletion mid–point“) und die damit verbundene zurückgehende Fördermenge eine Verknappung bedeutet und den Preis weiter steigen lassen wird (Rempel, 2000). Auch auf dem Strom– und Gasmarkt wird ein steigender Trend erwartet.

Neben der Verknappung von Rohstoffen führen auch Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen (z. B. Einführung erneuerbarer Energien, Emissionshandel) zu Preissteigerungen. Im Rahmen des Kyotoprotokolls hat sich die EU auf eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>–Emissionen bis 2012 um acht Prozent gegenüber 1990 verpflichtet (Vorholz, 2001). Die Aufteilung innerhalb der EU–Länder ist unterschiedlich, so verpflichtet sich beispielsweise Deutschland zu einer Reduktion von 21 % (Vorholz, 2001). Als Instrument ist beispielhaft der Emissionshandel zu nennen, durch den Unternehmen eine vorgegebene Emissionsmenge (Emissionszertifikate) erlaubt wird. Bei höheren Emissionsmengen muss zugekauft und nicht ausgeschöpfte Zertifikate können verkauft werden. Hierdurch entstehen zusätzliche Kosten bzw. es wird ein Anreiz für Reduzierungsmaßnahmen geschaffen (EHRL, 2003; TEHG, 2004).

Zur weiteren Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an den Primärenergien vorgesehen. Die Bundesregierung hat beispielsweise das Ziel, bis 2010 den Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch auf mindestens 12,5 % zu steigern (EEG, 2004). Langfristszenarien sehen bis 2050 sogar einen Anteil von 50 % am Primärenergieverbrauch (WBGU, 2003; Fishedick, Nitsch, 2002), wie in Abbildung 3 zu sehen ist.

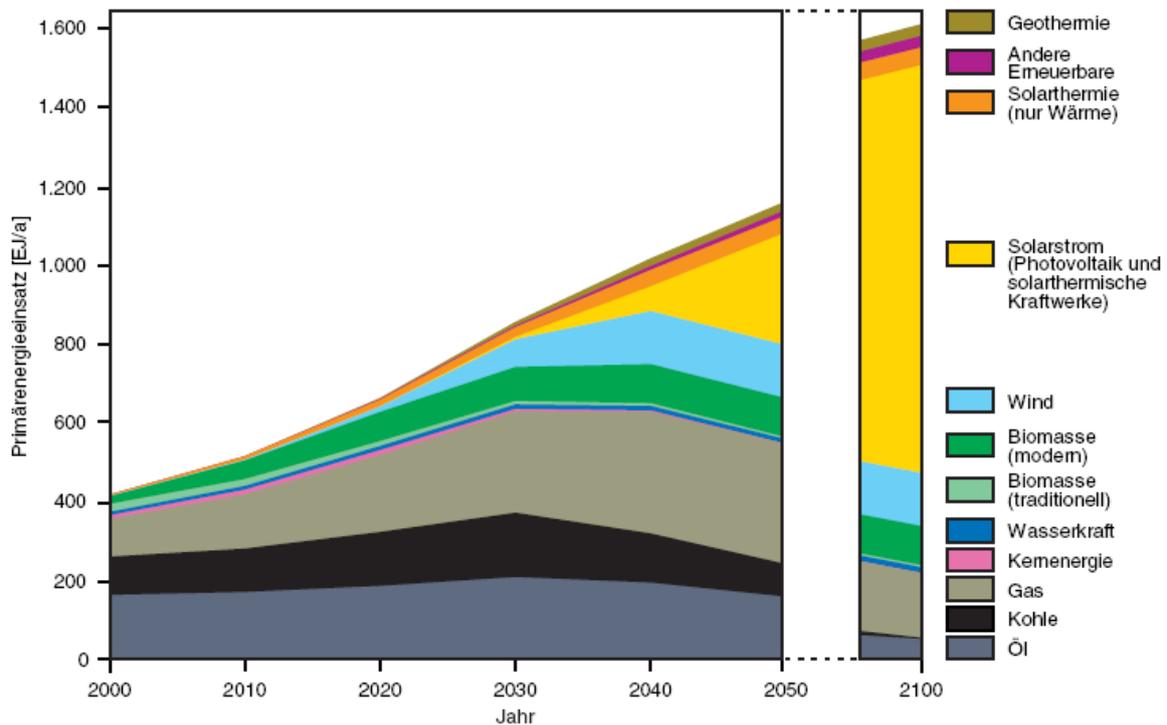


Abbildung 3: Veränderung des globalen Energiemix im exemplarischen Pfad bis 2050/2100 (WBGU, 2003, S. 4)

Die Umstellung auf erneuerbare Energien, die sich zurzeit noch in der Entwicklungsphase befinden, führt auch zu höheren Energieerzeugungspreisen. Weiterhin ist mit zunehmendem Anteil von regenerativen Energiequellen wie Wind- und Solarenergie verstärkt mit einer angebotsabhängigen Energieerzeugung zu rechnen, da hier der Einfluss auf die Energiemenge fremdbestimmt (Wind, Sonne) ist.

Neben diesen Einflüssen durch die veränderte Energiesituation sind auch Einflüsse über Klima und Umwelt zu erkennen. Es treten vermehrt Wetterschwankungen und Wetterextrema auf. So sind extreme Heißwetter- und Kaltwetterperioden zu beobachten, die die Produktionsbetriebe beeinflussen. Diese Temperatureinflüsse führen bei Präzisionsteilen zu Qualitätsproblemen, da z. B. in der Kunststoffproduktion höhere Temperaturen zu einer schlechteren Abkühlphase führen und dies Oberflächen- und Maßprobleme zur Folge hat. Meist wird durch eine verstärkte Kühlung entgegengewirkt, die allerdings zu höheren Energiekosten führt. Neben diesem Qualitätseinfluss führen höhere Temperaturen allerdings teilweise auch zu Produktionsausfällen, da hierbei beispielsweise Maschinensteuerungen nicht mehr funktionieren. Auch die Reduzierung von Treibhausgasemissionen führt zu Problemstellun-

gen, in dem einige Materialien (z. B. Kältemittel, Schutzgase) nicht mehr verwendet werden können.

Nach einer Unternehmensbefragung der Deutschen Energie-Agentur GmbH (DENA, 2005) halten daher auch 97 % aller befragten Unternehmen das Thema Energieeffizienz für wichtig. Eine Fabrik befindet sich demnach in dem in Abbildung 4 dargestellten Spannungsfeld zwischen Energieerzeugung und Klima.

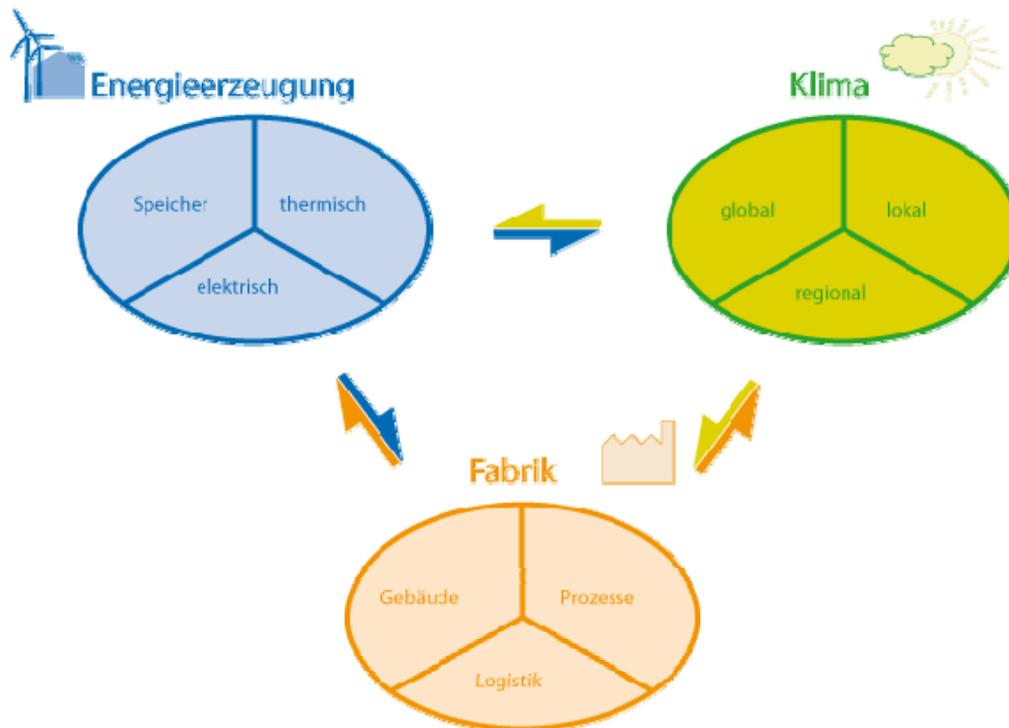


Abbildung 4: Fabrik im Spannungsfeld zwischen Energieerzeugung und Klima (Hesselbach, Junge, 2005b, S. 3)

Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die genannten Einflüsse auf die Produktion zu einer Berücksichtigung im Zielsystem führen können und ob ein Einfluss durch die Produktionssteuerung ausgeübt werden kann.

Im Bereich der Produktion sind grundsätzlich sechs Ansätze möglich, um Energieeinsparungen bzw. Treibhausgasemissionsminderungen zu erzielen.

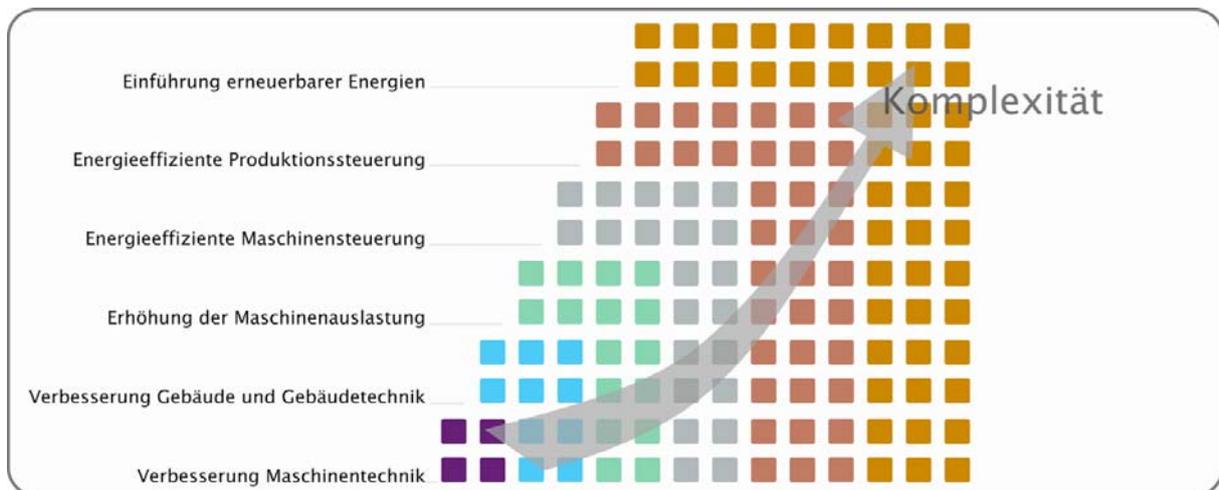


Abbildung 5: Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Produktion

In Abbildung 5 sind die Maßnahmen in einer Übersicht dargestellt, wobei auch gleichzeitig die steigende Komplexität und Vernetzung bei dem Einsatz der Maßnahmen veranschaulicht ist. Bei der Verbesserung der Maschinentechnik kann eine Optimierung der Energieeffizienz losgelöst von anderen Prozessen und Anlagen erreicht werden. Die Reduzierung des Energieverbrauchs durch bessere Gebäudetechnik benötigt aber schon eine Abstimmung zwischen Maschinentechnik und Gebäudetechnik. Die folgenden Maßnahmen besitzen einen noch stärker vernetzenden Charakter und benötigen einen systemischen Ansatz zur Untersuchung der Maßnahmen.

Die Maßnahmen unterscheiden sich neben dem Vernetzungscharakter noch durch unterschiedliche Kosten und damit verbundene Investitionszyklen. Eine Investition in neue Maschinentechnik oder Gebäudetechnik wird meist nur nach zehn oder mehr Jahren durchgeführt. Der Einsatz erneuerbarer Energien ist ebenfalls mit hohen Investitionen verbunden, wogegen die übrigen drei Maßnahmen durch eine Optimierung der Steuerung nur geringe Investitionskosten besitzen.

Bei einer energieeffizienten Produktionssteuerung sind vor allem die in einer Fabrik vorhandenen Wechselwirkungen zu beachten, die am Beispiel der Kunststoffproduktion erläutert werden. In Abbildung 6 ist eine vereinfachte Produktionshalle dargestellt.

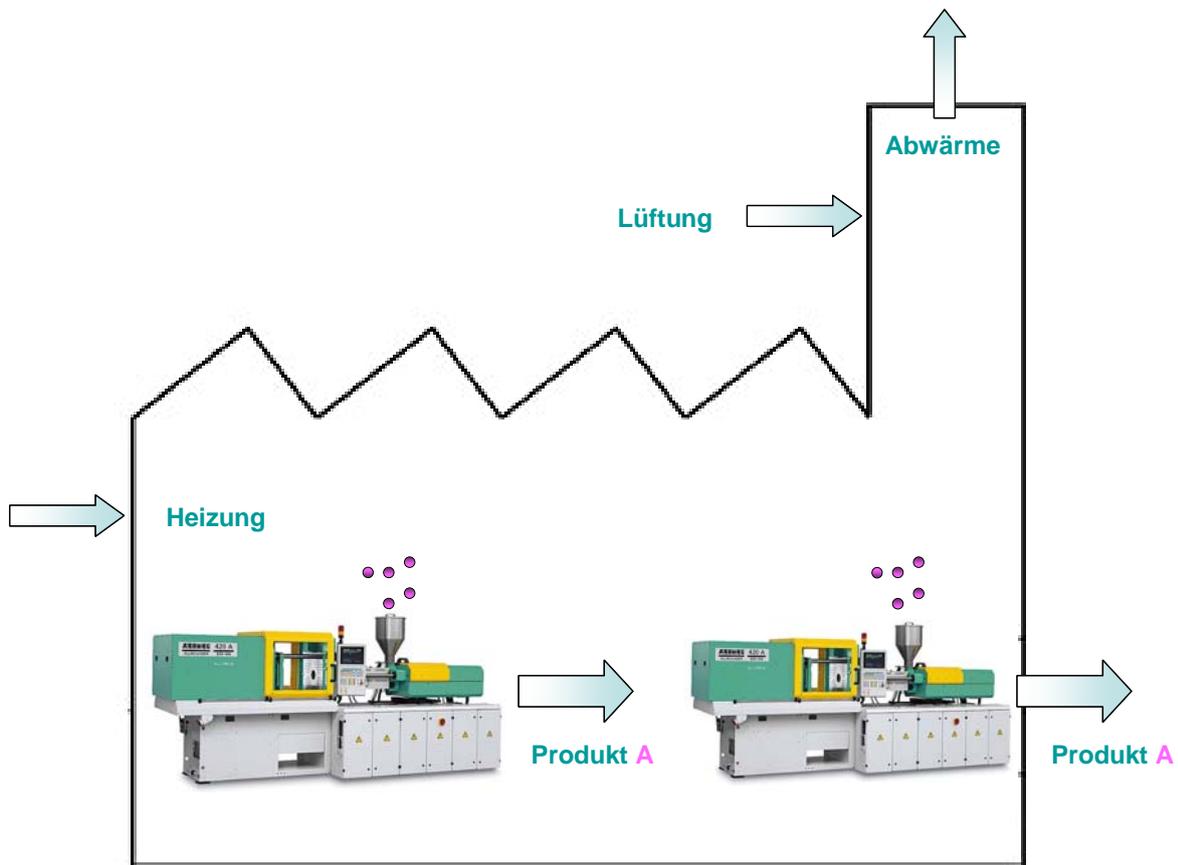


Abbildung 6: Wechselwirkungen in der Kunststoffproduktion

Bei der Produktion von Kunststoffteilen entstehen unterschiedliche Emissionen. Diese unterscheiden sich sowohl in der Stoffart als auch in der Menge. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben ist für bestimmte Schadstoffe eine maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) vorgegeben, die nicht überschritten werden darf. Zur Einhaltung der Vorgabe muss verstärkt gelüftet werden, wenn entsprechend emissionsreiche Produkte gefertigt werden. In Verbindung mit der Lüftung findet ein Wärmeverlust statt. Der Einsatz von Wärmetauschern kann die Wärmeverluste nur mindern, aber nicht verhindern. Um eine für den Produktionsprozess und die Mitarbeiter gleichmäßige Umgebungstemperatur zu erzielen, ist der Einsatz von Heizsystemen erforderlich. Gerade bei niedrigen Außentemperaturen ist ein erhöhter Heizenergiebedarf vorhanden. Die Produktionssteuerung legt die Produktionsreihenfolge und somit die Zeitpunkte fest, wann emissionsreiche Produkte zu fertigen sind. Der Heizenergiebedarf wird demnach beeinflusst durch die Produktionssteuerung, da hierdurch ein verstärktes Lüften bei niedrigeren oder bei höheren Außentemperaturen festgelegt wird.

Die Berücksichtigung dieser Wechselwirkung führt zu einer erhöhten Komplexität bei der Produktionssteuerung, da hierfür zusätzlich folgende Daten berücksichtigt werden müssen:

- Aktuelle Außentemperatur
- Gebäudetechnik (Heiztechnik, Lüftungstechnik)
- Emissionen der einzelnen Produkte
- Maximale Arbeitsplatzkonzentration der Schadstoffe
- Wärmeabgabe der einzelnen Produkte/Maschinen

Neben diesen Daten müssen weiterhin alle logistischen Größen wie z. B. Lieferzeiten und Bearbeitungszeiten betrachtet werden.

Die Untersuchung und Entwicklung von energieeffizienten Produktionssteuerungen kann nur über einen systemischen Ansatz erfolgen. Es müssen sowohl die Teilsysteme (Maschine, Materialfluss, Gebäude, Gebäudetechnik und Produktionssteuerung) detailliert abgebildet als auch die Wechselwirkungen untereinander berücksichtigt werden. Ein Simulationssystem ist aufgrund der Komplexität notwendig, um energieeffiziente Steuerungsansätze entwickeln und erproben zu können.

## 3 Produktionsplanung und –steuerung

### 3.1 Definitionen und Einordnung

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die mit der Produktionsplanung und –steuerung zusammenhängenden Begriffe erläutert und die Produktionsplanung und –steuerung innerhalb der Produktion eingeordnet. Zudem werden grundlegenden Aufgaben, vorhandene Modelle und Vorgehensweisen besprochen. Diese Aufarbeitung ist notwendig, da in der Literatur sehr unterschiedliche Begriffe im Bereich der Produktionsplanung und –steuerung verwendet werden.

Der Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation REFA definiert die Begriffe Planen und Steuern wie folgt:

„Planen ist das systematische Suchen und Festlegen von Zielen sowie von Aufgaben und Mitteln zum Erreichen der Ziele“ (REFA, 1991b, S. 18).

„Steuern ist das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Aufgabendurchführung hinsichtlich Menge, Termin, Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen“ (REFA, 1991b, S. 22).

Die Arbeitsvorbereitung ist ein Teil der Auftragsabwicklung und stellt das Bindeglied zwischen Konstruktion und Herstellung der Erzeugnisse dar. Häufig ist auch der Begriff der Fertigungsvorbereitung anzutreffen, da sie sich ursprünglich nur mit der Vorbereitung der Fertigung beschäftigt hat (Wiendahl, 2005, S. 195). Heutzutage umfasst die Arbeitsvorbereitung die Teilbereiche Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung (Wiendahl, 2005, S. 195; Eversheim, 1989, S. 2).

Die Arbeitsplanung beschäftigt sich mit allen einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, um ein Erzeugnis zu fertigen oder eine Dienstleistung durchzuführen. Es findet die Festlegung und Auswahl von Fertigungsverfahren und Betriebsmitteln statt, ohne einen Bezug zu konkreten Aufträgen und Terminen herzustellen. Ohne Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen wird das wirtschaftlichste Verfahren bevorzugt (Wiendahl, 2005, S. 196). Häufig wird die Arbeitsplanung auch durch nachfolgende Fragen charakterisiert (Wiendahl, 2005, S. 196; Eversheim, 1989, S. 2):

- Was soll gefertigt oder geleistet werden?
- Wie soll gearbeitet werden?
- Womit soll gearbeitet werden?

Die Arbeitssteuerung hingegen befasst sich mit allen für einen konkreten Auftrag durchzuführenden Maßnahmen. Ebenfalls können die Inhalte der Arbeitssteuerung durch Fragen beschrieben werden (Eversheim, 1989, S. 2):

- Wie viel Erzeugnisse sind in welchen Zeitabschnitten zu fertigen?
- Wann müssen die Arbeitsaufträge, das benötigte Material, die Arbeitsmittel und die Arbeitskräfte bereitgestellt werden?
- Wo soll gefertigt werden (Arbeitsmittel)?
- Wer soll die Fertigung durchführen (Arbeitskräfte)?

In der Praxis findet meist keine so klare Gliederung und Unterscheidung der Arbeitsvorbereitung statt. Die Aufgaben der Arbeitssteuerung werden zudem häufig unter dem in dieser Arbeit verwendeten Begriff der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zusammengefasst (Wiendahl, 2005, S. 196). Besonders zu beachten ist zudem, dass die Produktionsplanung und -steuerung einen vernetzenden Charakter besitzt, da sie im Rahmen der Auftragsabwicklung nahezu allen betrieblichen Abteilungen wie Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Teilefertigung, Montage, Ersatzteilwesen und Versand betrifft (Frackenpohl, 2002, S. 6). Es wird damit im Allgemeinen auf die Planung der operativen Ebene abgezielt. Ausgehend von einer vorgegebenen Ausstattung mit Betriebsmitteln und einer feststehenden Produktpalette sind folgende Aufgaben durchzuführen (Kurbel, 1995, S. 17 f. bzw. S. 39):

- Welche Mengen welcher Produkte sind im Planungszeitraum herzustellen (Produktionsprogrammplanung)?
- Welche Mengen an Vor- und Zwischenprodukten werden dafür benötigt (Sekundärbedarfsplanung)?
- Welche Mengen eines (End-, Zwischen- und Vor-) Produkts sollen zu einem Fertigungslos zusammengefasst werden (Losgrößenplanung)?

- Zu welchen Zeitpunkten soll die Herstellung bzw. Beschaffung der (End-, Zwischen- und Vor-) Produkte erfolgen (Terminplanung)?
- Wie können die zeitlichen Anforderungen mit den vorhandenen Kapazitäten abgestimmt werden (Kapazitätsplanung)?

Diese Planungsaufgaben sind schon früh aufgegriffen worden. Hier ist besonders Gutenberg zu nennen, der bereits 1951 die Produktionsplanung in Produktionsprogrammplanung, Bereitstellungplanung und Planung des Produktionsprozesses einteilte (Kurbel, 1995, S. 39; Gutenberg, 1951). Obwohl demnach die Aufgaben nicht neu sind, wurden sie bis heute nicht vollständig gelöst, da die Aufgabenstellungen sehr komplex sind (Kurbel, 1995, S. 15). Neben der Produktionsplanung werden industrielle Produktionsvorgänge auch von der Produktionstheorie untersucht. Während die Produktionstheorie versucht, das Produktionspotenzial eines Betriebes, effiziente Produktionsverfahren und Hauptkosteneinflussgrößen zu identifizieren, obliegt das konkrete Planen und Steuern der Produktionsplanung (Jahnke, Biskup, 1999, S. 19).

Die Produktionsplanung und -steuerung lässt sich abhängig vom Planungshorizont in drei Ebenen unterteilen, nämlich in die strategische (langfristige), taktische (mittelfristige) und operative (kurzfristige) Produktionsplanung (Jahnke, Biskup, 1999, S. 13; Gutenberg, 1983, S. 64 f.). Während die strategische Planung einen Zeitraum von sechs Monaten bis zu zwei Jahren betrachtet, ist die taktische Planung meist auf einen Zeitraum von einigen Wochen bis Monaten begrenzt. Die operative Planung bezieht sich dagegen auf Reichweiten von einigen Tagen oder wenigen Stunden (Kurbel, 1995, S. 17 f.; Jahnke, Biskup, 1999, S. 16; Frackenpohl, 2002, S. 7 f.). Die Planungsgenauigkeit nimmt dabei zu, je kürzer der Planungszeitraum ist. Diese Ebenen sind allerdings nicht scharf zu trennen, sondern gehen ineinander über (Jahnke, Biskup, 1999, S. 16). Die Aufgaben der PPS werden in der Literatur hauptsächlich an dem Vorgehensmodell von Hackstein erläutert. Hackstein unterteilt die Produktionsplanung in die Hauptfunktionen Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung und Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Produktionssteuerung in Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung (Hackstein, 1989, S. 5). Zudem führt er den Begriff der Werkstattsteuerung als Querschnittsfunktion ein (Hackstein, 1989, S. 248). In Abbildung 7 ist das Modell von Hackstein dargestellt.

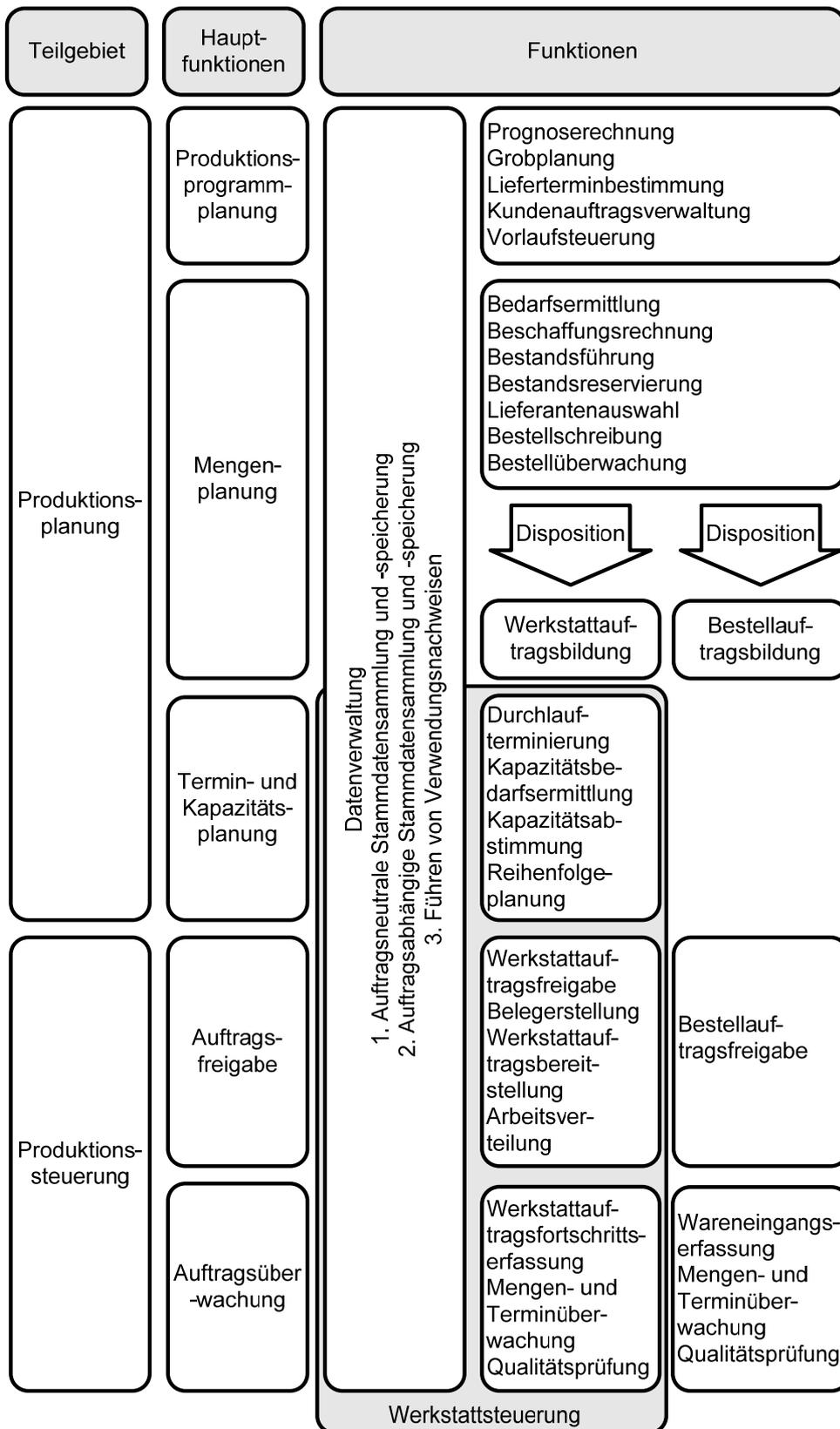


Abbildung 7: Funktionen der Produktionsplanung und Steuerung (angelehnt an Hackstein, 1989, S. 5 ff.)

Aufbauend auf dem Modell von Hackstein wurde das Aachener PPS-Modell entwickelt (Frackenpohl, 2002, S. 7), welches in der Literatur sehr verbreitet eingesetzt wird. Das Modell untergliedert sich hauptsächlich in vier Bereiche: Aufgaben-, Prozess-, Funktions- und Datenmodell (Nicolai et al., 1995; Luczak et al., 1999, S. 15). Hier wird nur das Aufgabenmodell betrachtet, da die übrigen Modelle meist sehr unternehmens- und EDV-spezifisch geprägt sind (Luczak et al., 1999, S. 16 ff.). Das Aufgabenmodell unterscheidet zwischen Kern- und Querschnittsaufgaben. Während die Kernaufgaben für die Auftragsabwicklung zuständig sind, erfolgt über die Querschnittsaufgaben die Integration der betroffenen Bereiche (Luczak et al., 1999, S. 16 f.).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass ausgehend von einer Planung des Produktionsprogramms zuerst eine Mengenplanung stattfindet, in der alle zur Herstellung benötigten Mengen an Vor-, Zwischen- und Endprodukten bestimmt werden. Darauf aufbauend findet eine Termin- und Kapazitätsplanung für die Herstellung statt. Bei dieser Terminierung findet noch keine Berücksichtigung der vorhandenen Betriebsmittel statt, es wird von unbegrenzten Kapazitäten ausgegangen. Erst während der Reihenfolgeplanung im Rahmen der Produktionssteuerung findet eine termingerechte, arbeitsvorgangsgenaue Planung mit Zuordnung zu den jeweiligen Betriebsmitteln statt (Frackenpohl, 2002, S. 7 f.; Jahnke, Biskup, 1999, S. 71 f.). Für diesen Schritt der Reihenfolgeplanung existieren in der Literatur verschiedene Begriffe. Unter anderem werden die Bezeichnungen Feinterminierung, Ressourcenfeinplanung, Maschinenbelegungsplanung, Ablaufplanung, Werkstattsteuerung bzw. die in der englischsprachigen Literatur verwendeten Begriffe Sequencing und Scheduling verwendet (Conway et al., 1967, S. 3; Pinedo, 1995, S. 3; Jahnke, Biskup, 1999, S. 228; Frackenpohl, 2002, S. 9; Evers, 2002, S. 14).

Neben einer grundsätzlichen Kritik an der Vorgehensweise der Produktionsplanung und -steuerung wird auch häufig die Funktion der Feinplanung in bestehenden Systemen als unzureichend bezeichnet (Hoff, Endres, 2002). Es hat daher eine Tendenz zur Dezentralisierung dieser Komponente stattgefunden, welche in Form von Leitständen ausgeübt wird (Jahnke, Biskup, 1999, S. 75; Binner, 2003, S. 336; Kurbel, 1999, S. 233 f.). In diesem Zusammenhang hat auch die Entwicklung von Systemen wie Manufacturing Execution System (MES) oder Shop Floor Control (SFC) stattgefunden (Hoff, Endres, 2002). Bei der Vorgehens-

weise der PPS wird hauptsächlich kritisiert, dass nur eine geringe Übereinstimmung zwischen den Plänen der PPS-Systeme und der tatsächlichen Produktion existiert (Kurbel, 1995, S. 27). Dies hängt hauptsächlich davon ab, dass bei der groben Terminplanung keine Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten stattfindet (Kurbel, 1995, S. 28; Drexel et al., 1994). Bei der später stattfindenden Belegungsplanung wird somit von unrealistischen Annahmen ausgegangen. Neuere Systeme, welche meist mit dem Begriff Advanced Planning Systems (APS) bezeichnet werden, versuchen diese Problematik dadurch zu beheben, dass sie die Planungsschritte integrieren und von Beginn an eine ressourcenbezogene Planung durchführen (Grunow et al., 2002; Viergutz, Tuschinski, 2004).

### **3.2 Charakterisierung der Betriebstypen**

Die Produktionsplanung und -steuerung wird hauptsächlich in der Sachgüterproduktion eingesetzt. Hierunter sind sowohl physikalische, biologische als auch chemische Gewinnungs- und Transformationsvorgänge zu verstehen, die als Ergebnis Sachgüter in Form von Stoffen oder Energien erzeugen (Jahnke, Biskup, 1999, S. 11). Die Betriebe der Sachgüterproduktion unterscheiden sich aber in einigen Merkmalen (Abbildung 8). Für die Produktionsplanung und -steuerung entstehen dadurch unterschiedliche Anforderungen, da aufgrund der jeweiligen Merkmale verschiedene Aufgaben eine höhere oder niedrigere Priorität besitzen. Daher wird an dieser Stelle eine Charakterisierung der unterschiedlichen Betriebstypen beschrieben. Die Charakterisierung erfolgt anhand der am Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) der RWTH Aachen entwickelten Typologie in Form eines morphologischen Kastens.

Merkmale der Auftragsabwicklung		Merkmalsausprägung der Auftragsabwicklung			
1	Art der Auftragsauslösung	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen	Kundenanonyme Vorproduktion/ kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager
2	Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten
3	Erzeugnisstruktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	Geringteilige Erzeugnisse	
4	Ermittlung Erzeugnis-/Komponentenbedarf	Deterministisch auf Erzeugnisebene	Teilweise deterministisch/ teilweise heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Erzeugnisebene
5	Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert	Teilweise auftragsorientiert/teilweise periodenorientiert	periodenorientiert	
6	Beschaffungsart	Weitestgehend Fremdbezug	Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend	
7	Bevorratung	Kaum Bevorratung von Bedarfpositionen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen
8	Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
9	Organisationsform	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Gruppen-/Linienfertigung	Fließfertigung
10	Fertigungsstruktur	Fertigung mit geringer Tiefe	Fertigung mit mittlerer Tiefe	Fertigung mit großer Tiefe	
11	Kundenänderungseinflüsse	Viele Änderungseinflüsse	Gelegentliche Änderungseinflüsse	Wenige Änderungseinflüsse	

Abbildung 8: Merkmalausprägungen im morphologischen Kasten (angelehnt an Sames, Büdenbender, 1997)

Einige der aufgeführten Merkmale sind gegenseitig bedingt oder schließen sich aus, wodurch eine Vereinfachung auf drei Industrietypen erfolgen kann. Diese Typisierung erfolgt aufgrund der Hauptmerkmale „Art der Auftragsauslösung“ und „Organisationsform“ (Jahnke, Biskup, 1999, S. 23). In Abbildung 9 sind die drei Industrietypen mit den jeweiligen Hauptmerkmalen dargestellt.

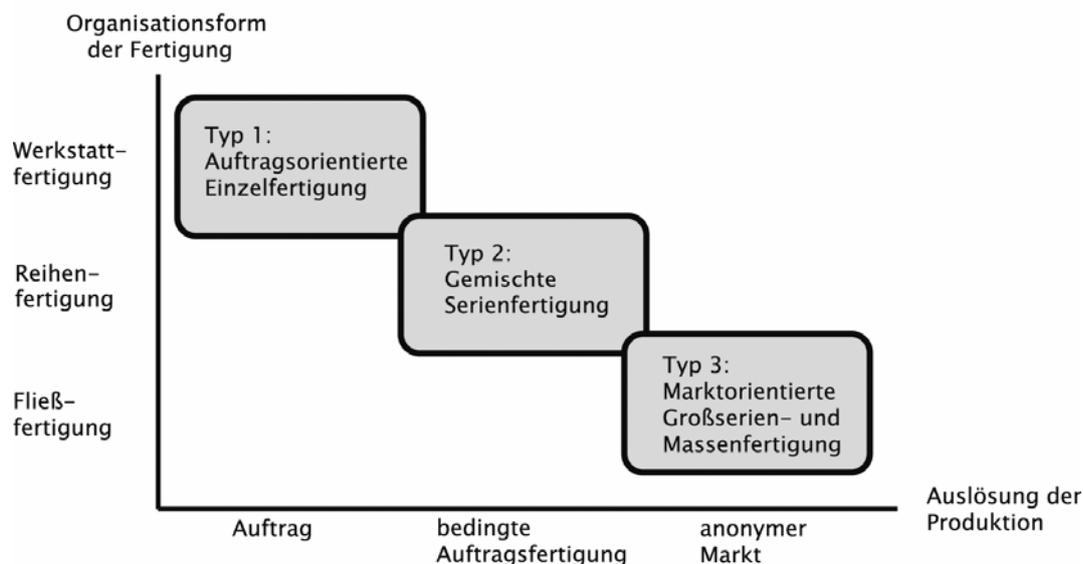


Abbildung 9: Darstellung der Industrietypen nach den Hauptmerkmalen (Jahnke, Biskup, 1999, S. 24)

Die auftragsorientierte Einzelfertigung (Typ 1) tritt beispielsweise im Flugzeug-, Schiff- und Spezialmaschinenbau auf. Hier muss eine möglichst flexible Fertigung aufgrund der unstetigen und nicht prognostizierbaren Nachfragesituation sichergestellt werden. Die Ablaufplanung und Lagerhaltung sind die vorherrschenden Fragestellungen. Die gemischte Serienfertigung (Typ 2) ist eine Mischform der beiden anderen Typen, die beispielsweise bei der Automobilproduktion und ihren Zulieferern anzutreffen ist. Je nach Betrieb herrscht verstärkt eine bedingte Auftragsfertigung oder eine Fertigung für den anonymen Markt. Die Losgrößenplanung und Ablaufplanung zählen hier zu den wichtigsten Aufgaben. Die marktorientierte Großserien- und Massenfertigung (Typ 3) zeichnet sich durch eine starre Fertigung aus, bei der hauptsächlich die Optimierung der Bearbeitungszeiten und Lagerhaltung im Vordergrund steht. Beispiele hierfür sind die Nahrungsmittel- und Papierindustrie (Jahnke, Biskup, 1999, S. 23 ff.).

Neben dem Stellenwert der einzelnen Aufgaben hat besonders die Tatsache, ob eine Mehr- oder Einstufenfertigung vorliegt, Einfluss auf die Maschinenbelegungsplanung. Erfolgt die Fertigung eines Produktes in mehreren nacheinander folgenden Bearbeitungsstufen, muss nicht nur eine Zuordnung von Auftrag und Maschine erfolgen, sondern es müssen gleichzeitig die Abhängigkeiten der Bearbeitungsstufen untereinander berücksichtigt werden. Zudem unterscheidet sich die Anzahl der möglichen Permutationen (Hüttner, 1979, S. 10).

Die Anzahl der Permutation  $P_{n,m}$  bei einer mehrstufigen Fertigung ergibt sich aus:

$$P_{n,m_{\text{mehrstufig}}} = (n!)^m$$

Formel 1: Permutationen bei mehrstufiger Fertigung (Hüttner, 1979, S. 11)

In der Formel bezeichnet  $n$  die Anzahl der zu verplanenden Aufträge und  $m$  die Zahl der zur Verfügung stehenden Maschinen. Es wird in dem Fall davon ausgegangen, dass jeder Auftrag auf jeder Maschine bearbeitet werden muss, die Reihenfolge beliebig ist und je Bearbeitungsstufe nur eine Maschine zur Verfügung steht. (Hüttner, 1979, S. 11)

Bei der einstufigen Fertigung wird die Anzahl der Permutation wie folgt berechnet:

$$P_{n,m_{\text{einstufig}}} = n! \binom{n+m-1}{m-1}$$

Formel 2: Permutationen bei einstufiger Fertigung (Hüttner, 1979, S. 11)

Die nachfolgende Tabelle gibt die Anzahl der Permutationen für ausgewählte Beispiele an.

Tabelle 1: Anzahl der Permutationen einstufig – mehrstufig

Aufträge	Maschinen	Permutationen einstufig	Permutationen mehrstufig
2	5	30	32
3	5	210	7.776
4	5	1.680	7.962.624
5	5	15.120	24.883.200.000

In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass die Zahl der Permutationen sehr schnell mit der Anzahl der einzuplanenden Aufträge ansteigt, wobei dieser Effekt bei einer mehrstufigen Fertigung noch stärker vorhanden ist.

### 3.3 Ziele

In der Theorie gilt das Wirtschaftlichkeitsprinzip als eine der Leitlinien unternehmerischen Handelns. Demnach soll die Wirtschaftlichkeit als Quotient aus der erbrachten Leistung (Output) des Unternehmens und den dabei entstandenen Kosten (Input) möglichst hoch sein. Während die Leistung meist von Faktoren außerhalb der Produktionsplanung und -steuerung festgelegt wird, können in erster Linie die Kosten mitbestimmt werden. Die von der Produktionsplanung und -steuerung beeinflussbaren Kosten sind hauptsächlich (Kurbel, 1995, S. 19):

- Einrichtungs- und Rüstkosten der Produktionsanlagen
- Leer- und Stillstandskosten von Produktionsanlagen
- Lagerhaltungskosten von Rohmaterial und Vor-, Zwischen- und Endprodukten
- Kosten durch Nichteinhaltung von Lieferterminen (z. B. Konventionalstrafen)
- Kosten durch die Vermeidung absehbarer Terminüberschreitungen (z. B. Überstunden)

In der Praxis werden allerdings nicht die Kosten als Zielgröße herangezogen, da um dies zu realisieren, zum Planungszeitpunkt alle erforderlichen Kosteninformationen vorliegen müssten. In der Regel liegen diese Informationen nicht vor, da sie teilweise auch wegen ihres Opportunitätskostencharakters kaum zu erfassen sind. Stattdessen werden häufig Ersatzzielgrößen verwendet, die in Zusammenhang mit den Kostenzielen stehen (Kurbel, 1995, S. 19).

Nach Wiendahl hat sich das nachfolgend dargestellte Zielsystem etabliert (Abbildung 10).

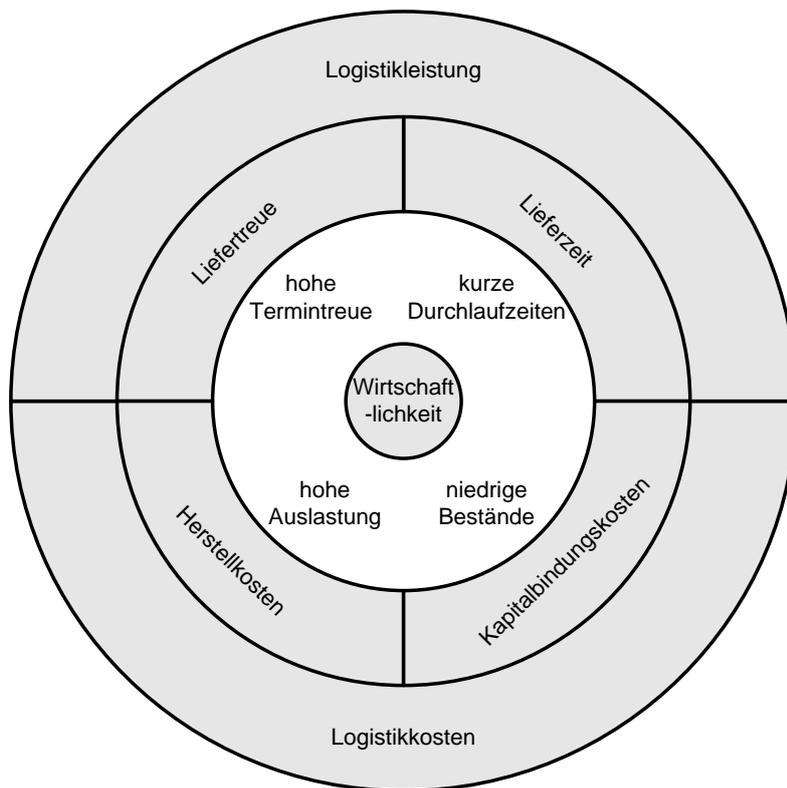


Abbildung 10: Zielsystem (Wiendahl, 2005, S. 254)

Allerdings entsteht hierbei ein Zielkonflikt durch die unterschiedlichen Ziele, welcher auch als Dilemma der Produktionssteuerung bezeichnet wird und schon von Gutenberg 1951 aufgezeigt wurde (Gutenberg, 1951; REFA, 1991b, S. 41; Kurbel, 1995, S. 20; Wiendahl, 2005, S. 254 f.). Dieser Konflikt besteht darin, dass eine maximale Kapazitätsauslastung nur durch hohe Bestände erreicht werden kann, dies aber zudem zu hohen Durchlaufzeiten führt. Eine hohe Termintreue benötigt ebenfalls einen hohen Kapazitätsbestand. Es ist demnach nicht möglich, alle Ziele gleichzeitig zu verfolgen (REFA, 1991b, S. 40). Mittlerweile ist festzustellen, dass eine Verschiebung der Ziele von betriebsbezogenen (hohe Auslastung, niedrige Bestände) hin zu marktbezogenen Zielen (hohe Liefertreue, niedrige Lieferzeit) stattgefunden hat. Gleichzeitig werden aber auch niedrige Bestände gefordert, wodurch die Auslastungsmaximierung in den Hintergrund getreten ist (Wiendahl, 2005, S. 255; Kurbel, 1995, S. 21 f.).

### 3.4 Verfahren der Maschinenbelegungsplanung

Bereits seit mehreren Jahren ist die Maschinenbelegungsplanung Forschungsgegenstand in der Wirtschaftsinformatik und dem Operations Research (Kurbel, Rohmann, 1995). Formal wird darunter die Planung der Reihenfolge für  $n$  Fertigungsaufträge (Jobs)  $J_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , die auf  $m$  Arbeitssystemen (Maschinen)  $M_j$ ,  $1 \leq j \leq m$  bearbeitet werden, verstanden. Jeder Fertigungsauftrag besteht aus  $m$  Operationen (Arbeitsvorgängen),  $o_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $1 \leq j \leq m$ , wobei  $o_{ij}$  jene Operation eines Fertigungsauftrags  $J_i$  bezeichnet, die auf Maschine  $M_j$  ausgeführt wird. Bei der Abarbeitung der Arbeitsvorgänge ist eine technologische Reihenfolge zu beachten und jede Maschine kann zu jedem Zeitpunkt nur eine Operation durchführen. Zudem ist jeder Operation eine Bearbeitungszeit (processing time)  $p_{ij}$  zugeordnet (Zäpfel, Braune, 2005, S. 5; Brucker, 2004, S. 2; Pinedo, 1995, S. 8). Weiterhin existiert eine Kostenfunktion  $f_i(t)$ , welche die Kosten für Bearbeitung des Jobs  $J_i$  zum Zeitpunkt  $t$  beschreibt. Ziel ist es, eine zulässige Reihenfolge zu finden, bei der keine zwei Zeitintervalle, die auf einer Maschine bzw. einem Job zugeordnet sind, überlappen, sowie alle sonstigen Randbedingungen erfüllt und die Zielfunktion bzw. Kostenfunktion minimiert werden (Brucker, 2004, S. 3). Die unterschiedlichen Maschinenbelegungsprobleme werden in der englischsprachigen Literatur des Operations Research nach drei Feldern  $\alpha|\beta|\gamma$  klassifiziert.  $\alpha$  spezifiziert die Maschinencharakteristika,  $\beta$  die Auftragscharakteristika und  $\gamma$  das Zielkriterium. Diese Klassifikation wurde von Graham et al. eingeführt (Graham et al., 1979). Eine ausführliche Darstellung kann bei Brucker (Brucker, 2004) und Pinedo (Pinedo, 1995) gefunden werden.

Dieser Beschreibungsformalismus gibt schon Aufschluss darüber, dass es kein allgemeines Verfahren gibt, welches die Maschinenbelegungsproblematik optimal löst. Es werden häufig Vereinfachungen durchgeführt, wodurch ein praktischer Einsatz nicht möglich ist. Das Maschinenbelegungsproblem gilt nach der Komplexitätstheorie als NP-vollständig, was bedeutet, dass der Rechenaufwand mit zunehmender Anzahl von Aufträgen und Maschinen exponentiell wächst (Kurbel, Rohmann, 1995). Es wird aber zur Vollständigkeit auf einige Verfahren der klassischen Optimierung hingewiesen.

Aufgrund der Komplexität und des hohen Rechenaufwands haben sich verschiedene Lösungsansätze etabliert. Im Folgenden wird eine Klassifizierung der einzelnen Verfahren durchgeführt und daraufhin eine Auswahl näher erläutert.

Grundsätzlich können die existierenden Verfahren der Maschinenbelegungsplanung in optimierende Verfahren, heuristische Verfahren und Verfahren der künstlichen Intelligenz eingeteilt werden (Evers, 2002, S. 25 f.). Die optimierenden Verfahren basieren auf mathematischen Ansätzen und haben das Optimum zum Ziel. Es sind Enumerationen, Branching & Bounding, sowie lineare und dynamische Programmierung zu unterscheiden. Zudem existieren einige spezielle Ansätze für begrenzte Anwendungsfälle, die nicht allgemein übertragbar sind. Die heuristischen Verfahren dagegen können keine optimale Lösung garantieren. Es existieren einerseits Eröffnungsverfahren, die auf direktem Weg eine einzige Lösung erzielen und Suchverfahren, welche sich iterativ einer guten Lösung annähern (Zäpfel, Braune, 2005, S. 22f.; Müller-Merbach, 1970, S. 25; Domschke et al., 1993, S. 38 ff.). Zu unterscheiden sind dabei spezielle Suchverfahren für bestimmte Aufgabenstellungen und allgemeine Suchverfahren, sogenannte Metaheuristiken, die auf verschiedenste Aufgabenstellungen anwendbar sind (Zäpfel, Braune, 2005, S. 24 f.; Aarts, Lenstra, 1997, S. 4). Innerhalb der Metaheuristiken kann wiederum eine Einteilung in stochastische und deterministische Verfahren erfolgen (Schneider, 2001, S. 15 f.; Schwefel, 1977, S. 101). Deterministische Verfahren verwenden einen vorgegebenen Pfad, während stochastische Verfahren Zufallszahlen verwenden und somit die Entwicklung nicht vorhersehbar ist. Bekannteste Vertreter sind Genetische Algorithmen bzw. Evolutionsstrategien und Simulated Annealing. Sowohl die optimierenden als auch die heuristischen Verfahren sind dem Operations Research zuzuschreiben (Schrödel, 1992, S. 83 ff.; Zimmermann, 1990). In der letzten Zeit sind vor allem Verfahren der künstlichen Intelligenz weiterentwickelt worden (Fischer, 1999, S. 19). Hierbei sind besonders Agentensysteme und Neuronale Netze zu nennen. Allerdings ist die konkrete Einteilung der Verfahren (Abbildung 11) nicht unumstritten, da es schwierig ist, geeignete Ordnungskriterien zu definieren (Schultz et al., 1995).

# Verfahren der Maschinenbelegungsplanung

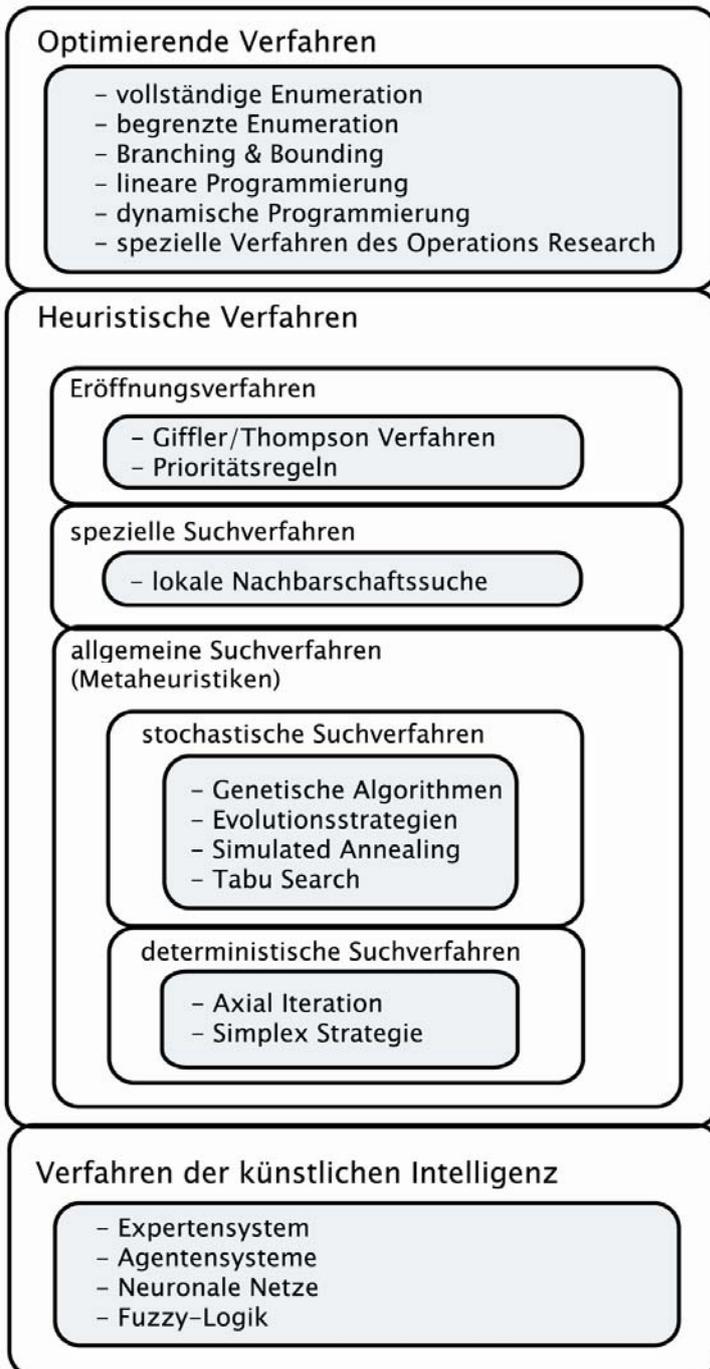


Abbildung 11: Einteilung der Verfahren zur Maschinenbelegung (angelehnt an Evers, 2002, S. 26)

Zudem muss unterschieden werden, ob die Planung statisch oder dynamisch erfolgt. Bei einer statischen Planung wird zu Beginn eines Zeitraums die Belegungsplanung vollständig durchgeführt und nicht mehr verändert, während bei der dynamischen Planung Änderungen

zur Laufzeit stattfinden. Teilweise wird sogar nur der nächste Auftrag ausgewählt. Es wird in diesem Zusammenhang auch häufig von Real-Time-Scheduling gesprochen.

Im Nachfolgenden wird eine Auswahl der einzelnen Verfahren näher erläutert.

### 3.4.1 Optimierende Verfahren

Mithilfe der optimierenden Verfahren wird garantiert die optimale Lösung berechnet. Diese Verfahren benötigen allerdings enorme Rechenzeiten und finden daher in der Praxis kaum Anwendung. Grundsätzlich gehen die meisten der optimierenden Verfahren von der vollständigen Enumeration aus, also dem Prüfen aller möglichen Lösungen (Hüttner, 1979, S. 21; Müller-Merbach, 1970, S. 27 ff.). Die vollständige Enumeration ist aufgrund des Rechenaufwands allerdings für die Maschinenbelegungsplanung nur von theoretischem Interesse (Schultz et al., 1995). Um den Rechenaufwand zu verringern, werden durch Aufteilen der Lösungen diejenigen nicht mehr weiterbetrachtet, deren Nichtoptimalität schon erkannt wurde. Die Vorgehensweise dabei unterscheidet sich zwischen den einzelnen Verfahren (Hüttner, 1979, S. 21; Evers, 2002, S. 26 f.; Herrmann, 1996, S. 30). Besonders zu nennen sind die begrenzte Enumeration (Hüttner, 1979, S. 23 ff.; Müller-Merbach, 1970, S. 31 ff.) und das Branching & Bounding (Hüttner, 1979, S. 22 f.; Schultz et al., 1995; Kim, 1993; Vasko et al., 1993). Neben den allgemeinen Verfahren existieren darüber hinaus auch Algorithmen, welche einzelne Spezialfälle optimal lösen. Es erfolgen hierfür Einschränkungen wie beispielsweise Anzahl der Maschinen, gleiche Liefertermine, gleiche Bearbeitungszeit aller Produkte. Eine Auswahl solcher speziellen Verfahren ist u. a. bei Brucker (Brucker, 2004), Pinedo (Pinedo, 1995), Conway (Conway et al., 1967) und Jahnke/Biskup (Jahnke, Biskup, 1999) zu finden.

### 3.4.2 Heuristische Verfahren

Die heuristischen Verfahren finden (entsprechend der Bedeutung des griechischen Wortes „heuriskeln“) Lösungen zu Problemen, bei denen exakte Lösungen nur schwer zu erreichen sind. Diese Verfahren können nicht garantieren, das Optimum zu erreichen und können auch keine Aussage darüber machen, wie weit die gefundene Lösung vom Optimum entfernt ist (Zäpfel, Braune, 2005, S. 21 f.; Müller-Merbach, 1970, S. 34 f.). Es sind verschiedene Ansätze entwickelt worden, deren Einteilung in Abbildung 11 dargestellt ist. Die Suchverfahren

unterscheiden sich hauptsächlich dadurch, ob sie für einen speziellen Anwendungsfall entwickelt worden sind oder ob sie für möglichst viele Optimierungsprobleme angewendet werden können. Solche allgemeinen Metaheuristiken sind dadurch geprägt, dass eine übergeordnete Strategie einen anderen problemspezifischen Algorithmus steuert und modifiziert, um eine bessere Lösung zu erzielen als der problemspezifische Ansatz (Zäpfel, Braune, 2005, S. 24 f.; Dorigo, 2006).

#### Giffler–Thompson Eröffnungsverfahren mit Prioritätsregeln

Das Verfahren von Giffler–Thompson erzeugt einen sogenannten aktiven Ablaufplan. „Ein Ablaufplan heißt aktiv, wenn es nicht möglich ist, den Beginn irgendeiner Arbeitsoperation vorzuverlegen (eventuell unter Vertauschung der Auftragsfolge), ohne den Beginn mindestens einer anderen Arbeitsoperation zu verzögern“ (Zäpfel, Braune, 2005, S. 29 f.). Die Bedeutung wird bei der Betrachtung der unterschiedlichen Arten von Ablaufplänen deutlich.

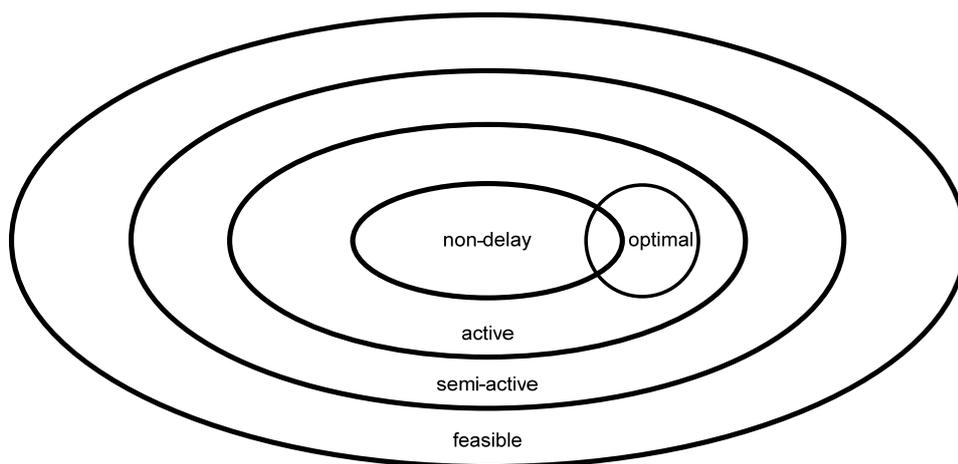


Abbildung 12: Arten von Ablaufplänen (Bierwirth, Mattfeld, 1999, S. 8)

Demnach gehören die optimalen Ablaufpläne zu den aktiven Ablaufplänen, wobei die Ablaufpläne nicht unbedingt auf allen Maschinen ohne Verzögerung (non–delay) durchgeführt werden müssen (Bierwirth, Mattfeld, 1999; Kurbel, 1978, S. 82 f.). Auf Basis dieser Überlegungen erzeugt das Verfahren beginnend mit den ersten Arbeitsoperationen einen aktiven Ablaufplan. In jedem Schritt werden die jeweiligen frühesten Start– bzw. Fertigstellungszeitpunkte der aktuell einplanbaren Arbeitsvorgänge bestimmt. Ein Konflikt tritt dann auf, wenn zu einem Zeitpunkt auf einer Maschine ein Arbeitsvorgang einplanbar ist und während dieses Zeitraums auch ein weiterer Arbeitsvorgang einplanbar wäre. In diesem Fall ist eine Rei–

henfolgeentscheidung erforderlich. Eine Lösung hierfür ist die Einführung von Prioritäten für die einzelnen Arbeitsvorgänge, nach der die Auswahl vorgenommen wird. Das Verfahren von Giffler–Thompson kann mit beliebigen Prioritätsregeln kombiniert werden (Zäpfel, Braune, 2005, S. 31 f.; Giffler, Thompson, 1960).

Es wurden in den letzten vier Jahrzehnten einige hundert Prioritätsregeln entwickelt. Die einzelnen Regeln können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden (Holthaus, 1996, S. 25 f.; Evers, 2002, S. 28):

- Zeitliche Veränderlichkeit (statisch – dynamisch)
- Umfang der einbezogenen Daten (lokal – global)
- Abhängigkeit von anderen Aufträgen (abhängig – unabhängig)

Nachfolgend ist eine Auflistung der bekanntesten Prioritätsregeln dargestellt, die allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, sondern vielmehr eine Auswahl darstellt (Zäpfel, Braune, 2005, S. 35 f.; Holthaus, 1996, S. 34; Wiendahl, 2005, S. 327; Kurbel, 1995, S. 174; REFA, 1991b, S. 63; Hackstein, 1989, S. 192 f.):

- KOZ–Regel (Kürzeste Operationszeit): Die höchste Priorität erhält der Auftrag mit der kürzesten Operationszeit.
- LOZ–Regel (Längste Operationszeit): Die höchste Priorität erhält der Auftrag mit der längsten Operationszeit.
- FIFO–Regel (First In First Out): Der erste Auftrag, der an der Maschine ankommt, erhält die höchste Priorität.
- SZ–Regel (Schlupfzeit): Der Auftrag, der die geringste Differenz zwischen Liefertermin und voraussichtlichem Bearbeitungsende hat, erhält die höchste Priorität.
- FLT–Regel (Frühester–Liefertermin): Die höchste Priorität erhält der Auftrag mit dem frühesten Liefertermin.
- ZUF–Regel (Zufall): Die Priorität wird zufällig zugeordnet.
- WT–Regel (Wert): Die höchste Priorität erhält der Auftrag, dessen Produktwert am höchsten ist.

Darüber hinaus können die einzelnen Prioritätsregeln auch miteinander kombiniert werden. Hierbei sind additive, multiplikative, alternative oder dominante Verknüpfungen möglich (Kistner, Steven, 1993, S. 151 f.; REFA, 1991b, S. 62; Hoss, 1965, S. 167 ff.). Die Kombination von Prioritätsregeln muss allerdings nicht zu einer besseren Zielerfüllung führen, sondern kann auch das Gegenteil zur Folge haben, wie Untersuchungen gezeigt haben (Haupt, 1989).

### Genetische Algorithmen/Evolutionsstrategien

Die biologische Evolutionstheorie inspirierte zur Entwicklung der Genetischen Algorithmen (Holland, 1975) und der Evolutionsstrategie (Rechenberg, 1973; Schwefel, 1977). Die Verfahren übertragen den Prozess der biologischen Evolution auf Optimierungsprobleme, in dem sie die Grundmechanismen: Selektion, Rekombination (Kreuzung) und Mutation künstlich nachbilden. Es werden diese Mechanismen iterativ auf die Lösungskandidaten (Individuen) angewendet. Dabei werden gleichzeitig immer mehrere Individuen betrachtet. Aus einer solchen Population wird immer wieder eine Folgepopulation erzeugt. Es wird dabei auch von Generation gesprochen. Bevor eine Kreuzung oder Mutation durchgeführt wird, erfolgt die Selektion. Bei diesem Vorgang wird festgelegt, welche Individuen aus der aktuellen Population als Elternindividuen für die Folgegeneration ausgewählt werden. Die Wahrscheinlichkeit der Auswahl hängt stark vom Fitnesswert (Lösungsqualität) ab. Es existieren verschiedene Selektionsregeln. Mithilfe der Kreuzung wird daraufhin durch Kombination von Teillösungen ausgewählter Individuen versucht, noch bessere Lösungen zu erhalten. Zusätzlich findet noch die Mutation statt, bei der ausgewählte Stellen geringfügig verändert werden. Hierdurch können Elemente, die in „schlechten“ Individuen versteckt waren und bei der Selektion verloren gegangen sind, zufällig wieder in die Population gelangen.

Die Unterschiede der beiden Verfahren liegen hauptsächlich in der Codierung der Informationen und in der Gewichtung von Mutations- und Rekombinationstechniken (Schneider, 2001, S. 22 f.; Claus, 1996, S. 53). Beide Verfahren sind stochastischer Natur.

Ein Kritikpunkt ist der Nachteil, dass der Suchraum der Verfahren deutlich größer als der Raum zulässiger Lösungen ist (Siedentopf, 1994, S. 38). Weiterhin stehen kaum geeignete Methoden zur Verfügung, um eine Anfangspopulation zu erzeugen. Der Vorteil liegt in der hohen Konvergenzgeschwindigkeit (Evers, 2002, S. 32).

Ein einfacher Ansatz, um Genetische Algorithmen oder Evolutionsstrategien auf die Maschinenbelegung anzuwenden, ist, die Prioritätsregeln bei jeder Iteration des Giffler–Thompson Verfahrens zu variieren (Zäpfel, Braune, 2005, S. 63).

### Simulated Annealing

Simulated Annealing von Kirkpatrick et al. (Kirkpatrick et al., 1983) und von Cerny (Cerny, 1985) ist unabhängig voneinander entwickelt. Die Grundidee des Verfahrens basiert auf dem thermodynamischen Prozess des Auskühlens von glühenden Metallen. Ein solches System nimmt mit der Zeit einen Zustand immer niedrigerer Gesamtenergie ein, wobei auch zwischenzeitlich Zustände mit höherer Energie möglich sind. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist allerdings gering. Die Möglichkeit der Akzeptanz von Zuständen mit höherer Energie ist der Motivationsfaktor für die Übertragung auf Optimierungsprobleme. Klassische Optimierungstechniken dagegen akzeptieren nur Verbesserungen, wodurch sie leicht in lokalen Minima stecken bleiben.

Bei dem Verfahren wird der Metropolis Algorithmus (Metropolis et al., 1953) für eine Folge von fallenden Temperaturwerten wiederholt angewendet. Der Metropolis Algorithmus gibt an, ob eine neue Lösung akzeptiert wird. Eine bessere Lösung wird auf jeden Fall akzeptiert, eine schlechtere Lösung nur bei einer temperaturabhängigen Wahrscheinlichkeit. Die nachfolgende Formel beschreibt dies. Sie basiert im Wesentlichen auf der Boltzmann–Verteilung, es wird zur Vereinfachung nur die Boltzmann–Konstante weggelassen.

$$P(\Delta C) = e^{\frac{-\Delta C}{T_k}}$$

Formel 3: Metropolis–Algorithmus (Metropolis et al., 1953)

Bei Beginn ist die Temperatur sehr hoch, wodurch der Prozess eher einer Zufallssuche ähnelt. Mit abnehmender Temperatur wird die Wahrscheinlichkeit immer geringer, dass schlechtere Lösungen akzeptiert werden. Die Erzeugung einer neuen Konfiguration erfolgt meist durch lokale Nachbarschaftssuche. Die Initialtemperatur und der Abkühlfaktor sind die entscheidenden Parameter des Simulated Annealings.

Das Verfahren kann anschaulich an einem vereinfachten Beispiel mit zwei Parametern (x, y) erläutert werden. Die Zielfunktion entspricht einer Ebene bzw. Gebirgslandschaft. Wird eine

Kugel auf dieses Gebirge fallen gelassen, so rollt sie in das nächste lokale Tal. Die Kugel ist allerdings Stößen ausgesetzt, die zu Beginn sehr stark sind und mit der Zeit schwächer werden. Die Kugel wird dadurch aus kleineren Tälern hinausbewegt, um somit nach und nach das globale Minimum zu finden (Wendt, 1995, S. 117).

#### Axial Iteration

Die Axial Iteration wird in der Literatur auch als Gauß-Seidel-Strategie oder achsenparallele Suche bezeichnet. Sie ist ein klassisches Hill-Climbing-Verfahren, welches wie ein blinder Bergsteiger den steilsten Anstieg in seiner Umgebung auswählt und diesen besteigt. Ausgehend von einem Startpunkt wird in positiver und negativer Richtung jeder Koordinatenachse ein Punkt gesucht, der eine Verbesserung darstellt. Es wird so lange in diese Richtung gelaufen, bis eine Verschlechterung eintritt. Das Verfahren konvergiert daher sehr schnell, ist aber auch nicht in der Lage, ein lokales Optimum wieder zu verlassen. Der Startpunkt spielt daher eine wichtige Rolle bei diesem Verfahren (Schneider, 2001, S. 20 f.; Schwefel, 1977, S. 50 ff.).

#### Simplex-Strategie

Die Simplex-Strategie basiert auf der Idee, eine geometrische Figur als Startpunkt zu verwenden. Die Figur besitzt  $n+1$  Ecken, wobei  $n$  die Anzahl der Variablen darstellt. Das Verfahren, welches keine Ähnlichkeit mit der namensähnlichen Simplex-Strategie hat, versucht daraufhin durch Spiegelung des bisher schlechtesten Punktes an dem Mittelpunkt der verbleibenden Ecken eine Verbesserung zu erzielen. Ist der neu entstandene Punkt der Schlechteste, wird die zweitschlechteste Ecke ausgewählt. Dieses Verfahren eignet sich besonders für relativ wenige Variablen. Bei einer größeren Anzahl kann es zu Überspringen von Optima kommen (Schneider, 2001, S. 29 f.; Schwefel, 1977, S. 68 ff.).

### 3.4.3 Verfahren der künstlichen Intelligenz

Bei den Verfahren der Künstlichen Intelligenz wird versucht, das menschliche Entscheidungsverhalten zu simulieren. Diese Verfahren befinden sich aber zurzeit hauptsächlich noch im Forschungsstadium (Evers, 2002, S. 25 f.). Zu nennen sind in diesem Bereich vor allem Agentensysteme (Corsten, Gössinger, 1997; Evers, 2002, S. 35; Frackenhohl, 2002, S. 53;

Zelewski, 1993, S. 6 ff.) und Neuronale Netze (Hopfield, 1982; Corsten, May, 1995; Schneider, 1993, S. 20; Evers, 2002, S. 36 f., Heuer, 1997).

### **3.5 Umweltorientierung in PPS-Systemen**

Aufbauend auf der Umweltorientierung in verschiedenen Betrieben (z. B. Betriebs- und Produktlebenszyklusbilanzen, Umweltzertifikate) haben sich auch neue Anforderungen an PPS-Systeme entwickelt. Es wird daher gefordert, dass die PPS-Systeme Umweltinformationen, wie detaillierte Stoff- und Energieströme, bereitstellen können. Bestehende PPS-Systeme können dies aber nicht leisten. Es sind daher in dem Projekt OPUS (Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz) Anforderungen an ein umweltorientiertes PPS-System entwickelt worden. Ein Resultat ist, dass die interne Datenmodellierung der PPS-Systeme mit Stücklisten und Arbeitsplänen nicht ausreichend ist. Es müssen flexiblere und vollständigere Strukturen eingesetzt werden, die Produkte, Prozesse und komplexe Netze abbilden können (Steinaecker, 1999).

Es wird davon ausgegangen, dass ein produktionsintegrierter Umweltschutz nicht nur durch den Einsatz von umwelt- und ressourcenschonenden Produktionstechnologien (Stoffe, Fertigungsverfahren, Arbeitsmethoden) erfolgen kann, sondern auch die inner- und überbetriebliche Auftragsabwicklung viele Möglichkeiten besitzt, die Belastung der Umwelt zu verringern. Die Umweltbelastung wird demnach auch durch die räumliche und zeitliche Anordnung der Arbeitsprozesse beeinflusst (Aghte, Rey, 1998; Schreiner, 1996, S. 134; Bullinger, 1997, S. 142 ff.). Es bestehen beispielsweise Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des zeitlichen Abgleichs von Reststoffanfall und -bedarf oder des verwendeten Ausgangsmaterials (Schmiedeteile statt Stangenmaterial) abhängig von der Losgröße (Bullinger, 1997, S. 63; Aghte, Rey, 1998).

## 4 Materialflusssimulation

### 4.1 Definition

Zur Analyse von dynamischen Aufgabenstellungen hat sich in den letzten Jahren die Simulation bewährt (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 1). Allgemein wird in der Informatik darunter „die Nachbildung von Vorgängen auf einer Rechenanlage auf der Basis von Modellen“ (Engesser, Claus, Schwill, 1993, S. 648) verstanden. Übertragen auf die Materialflusssimulation wird Simulation in der VDI Richtlinie 3633 wie folgt definiert:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633, 2000, S. 2).

Die grundsätzliche Vorgehensweise kann Abbildung 13 entnommen werden.

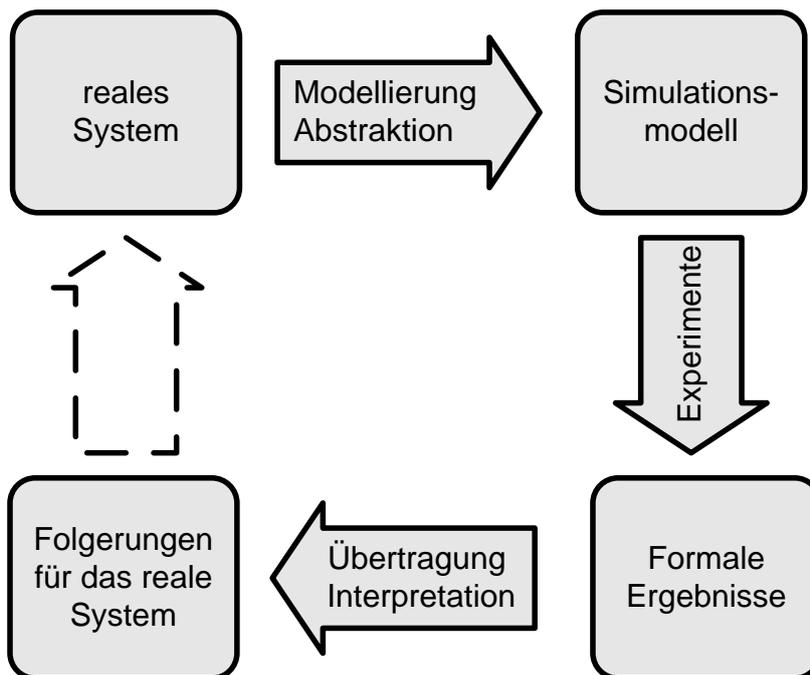


Abbildung 13: Vorgehensweise bei der Simulation (ASIM, 1987, S. 2)

Im Rahmen der obigen Definition stellt ein System eine gegenüber seiner Umwelt abgegrenzte Anordnung von Komponenten dar, die in Relation zueinanderstehen und durch Regeln und Attribute charakterisiert werden (VDI 3633, 2000, S. 3; DIN 19226). Ein Modell ist dadurch charakterisiert, dass es ein geplantes oder real existierendes System samt seiner

Prozesse vereinfacht nachbildet und dabei ein anderes Begriffs- oder Gegenstandssystem verwendet (VDI 3633, 2000, S. 3). Die vorhandenen Prozesse sind die in dem System vorhandenen Vorgänge, welche Materie, Energie oder Informationen verändern, transportieren oder speichern (DIN 19226).

Die Nachbildung eines Systems in einem Modell wird beeinflusst durch die rationale Wahrnehmung des Simulationsexperten, welche durch dessen Erfahrung und Wissen geprägt ist. Die Zusammenhänge bei diesem Prozess können durch die in Abbildung 14 dargestellte Objekt-Subjekt-Modell-Relation veranschaulicht werden. Ausgehend von dem betrachteten System (Objekt) entsteht im Kopf des Simulationsexperten (Subjekt) ein gedankliches Modell. Das Gedankenmodell wird dann in einem Softwarewerkzeug (Modell) abgebildet, an dem daraufhin die Experimente durchgeführt werden. Wird dieses Modell auch zur Steuerung des realen Systems verwendet, schließt sich der Kreis der OSM-Relation (Schneider, 2001, S. 36 f.; VDI 3633, 2000, S. 5 f.).

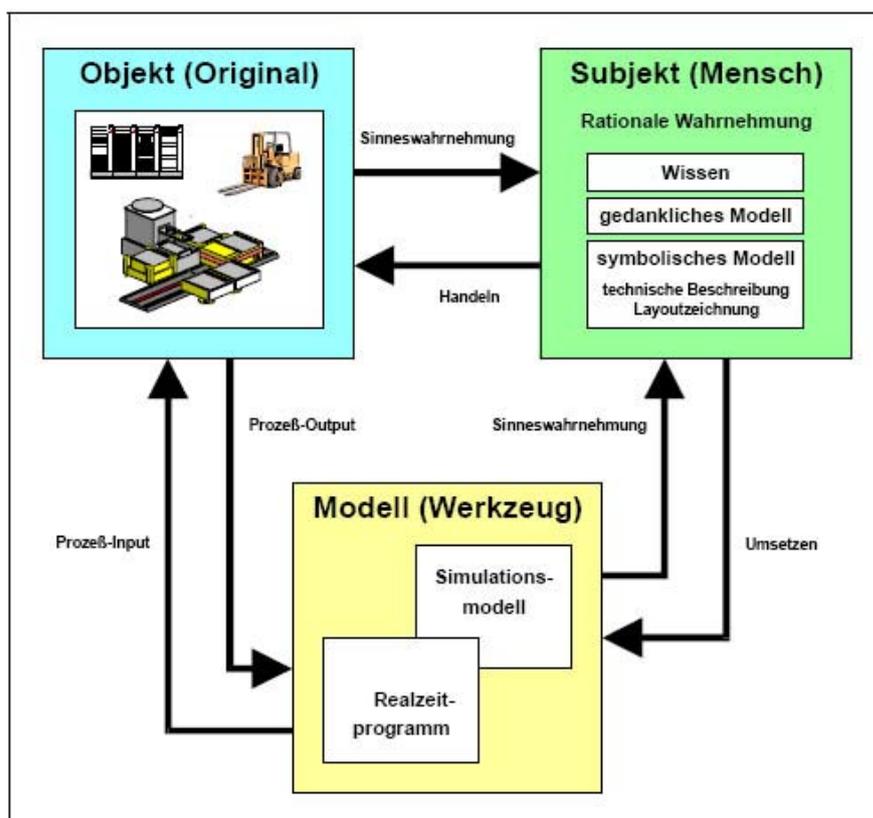


Abbildung 14: Objekt-Subjekt-Modell-Relation (Reinhardt, 1988, S. 16)

Die Simulation kommt besonders dann zum Einsatz, wenn (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 2; Mattern, Mehl, 1989; Wenzel, 1998, S. 1 f.):

- keine vergleichbaren Anwendungen vorhanden sind bzw. neue Gebiete erforscht werden;
- aufgrund der Komplexität analytische bzw. mathematische Methoden nicht mehr einsetzbar sind;
- Experimente am realen System zu kostenintensiv, zu gefährlich, zu aufwendig, zu langsam oder zu schnell sind;
- ein reales System noch nicht existiert.

Typische Zielrichtungen bei einer simulationsgestützten Untersuchung sind (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 2; Wenzel, 1998, S. 1 f.; Mattern, Mehl, 1989; VDI 3633, 2000, S. 1; Page et al., 1988, S. 2):

- Optimierung bzw. Verbesserung des Systemverhaltens
- Entscheidungshilfe beim Systementwurf
- Überprüfung von Theorien
- Validierung eines geplanten Systems
- Veranschaulichung komplexer Sachverhalte zur Verbesserung des Systemverständnisses

Der Einsatz der Simulation ist aber auch mit Nachteilen verbunden (Mattern, Mehl, 1989; Neelamkavil, 1987, S. 12 f.):

- Der Genauigkeitsgrad der Simulationsergebnisse mit der Realität ist nur schwer abzuschätzen.
- Simulationen sind teilweise sehr rechenzeitaufwendig.
- Ergebnisse können leicht fehlinterpretiert werden.
- Es können Ungenauigkeiten bei den Simulationsergebnissen entstehen, da keine exakte Abbildung der Realität erfolgt, sondern nur eine Abstraktion.

## **4.2 Einsatzgebiete**

Simulation wird in vielen Bereichen der Technik, Natur- und Wirtschaftswissenschaften eingesetzt (Mattern, Mehl, 1989). Innerhalb des Bereiches der Produktion und Logistik wird sie

vor allem zur Leistungsbemessung und als Funktionsnachweis verwendet, dabei findet ein durchgängiger Einsatz während Planung, Realisierung und Betrieb statt (Wenzel, 1998, S. 2; VDI 3633, 2000, S. 2). Vorreiter bei der Entwicklung und dem Einsatz der Simulationstechnik in Produktion und Logistik war vor allem die Automobilindustrie (Bayer, Collisi, Wenzel, 2002, S. 1).

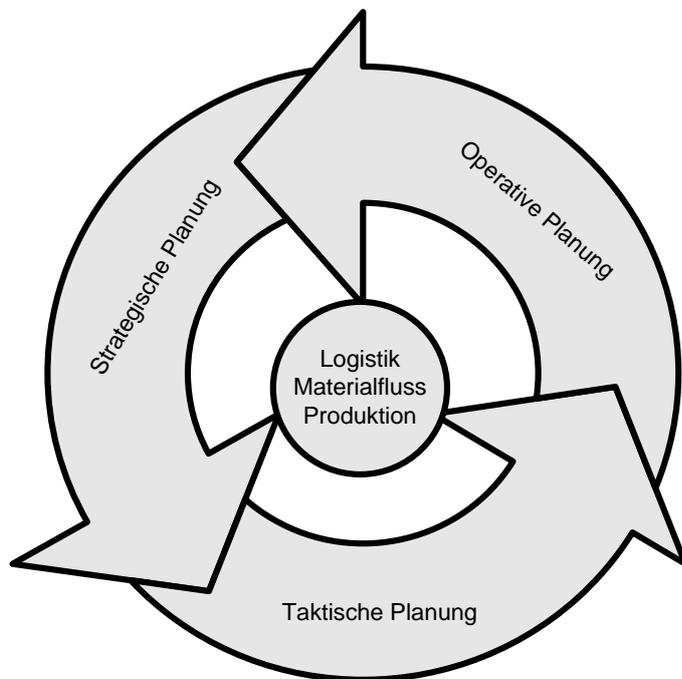


Abbildung 15: Anwendungsfelder der Simulation

In der Simulation wird ebenfalls von der strategischen, taktischen und operativen Ebene gesprochen (Abbildung 15), in der die Simulation eingesetzt wird. Auf der strategischen Ebene werden grundlegende und langfristige Entscheidungen, wie z. B. Standorte, Strukturen, Kapazitäten getroffen. Die taktische Planung ist eher mittelfristig ausgelegt. Hier werden konkretere Entscheidungen gefällt, wie z. B. Auswahl von Fördertechnik, Schichtmodellen. In der operativen Planung erfolgt eine Beachtung kurzfristiger Ereignisse des Betriebs, wie z. B. Auftragsmix, Störungen. Die einzelnen Ebenen gehen ineinander über und die Simulationsstudien sind meist nicht auf eine Ebene beschränkt (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 7 f.). Weiterhin unterscheiden sich auch die eingesetzten Simulationssysteme bzw. der Detaillierungsgrad in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung (Bley, Braun, Wuttke, 1999; Pensky, 2004, S. 3).

Im Hinblick auf die Produktionssteuerung eignet sich die Simulation als Hilfsmittel in allen drei Ebenen. In der strategischen Ebene werden grundlegende Fragestellungen untersucht (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 9 ff.):

- Auswahl eines Steuerungsverfahrens
- Detaillierungsgrad der Abbildung der Produktionsstruktur im PPS-System
- Grundlegende Regeln für die Werkstattsteuerung

Die taktische Ebene beschäftigt sich mit konkreteren Fragen der Erprobung und dem Test von Steuerungssoftware (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 19 f.):

- Einsatz einer bestimmten Auftrags- bzw. Arbeitsvorgangsterminierung
- Einsatz eines bestimmten Auftragsfreigabeverfahrens
- Einsatz einer bestimmten Prioritätsregel
- Variation von Parametern der Fertigungssteuerung

Auf der operativen Ebene werden konkrete Dispositionsalternativen auf Basis der aktuellen Maschinenbelegung und Auftragssituation untersucht. Hierbei ist die Simulation hauptsächlich als Entscheidungsunterstützung zu verstehen. Zweck ist es, die Zielerreichung in der Produktion zu erhöhen (VDI 3633, 2000, S. 5; Friederich, 1998, S. 53). In diesem Zusammenhang existieren unterschiedliche Ansätze, die von der Auswahl von Entscheidungsregeln bis hin zu simulationsbasierten Trainingssystemen reichen. Ein Überblick ist beispielsweise bei Friederich (Friederich, 1998, S. 54 ff.) zu finden. Grundsätzlich wird dabei über eine Rückkopplung der Ergebnisse der Simulation auf eine Verbesserung der Fertigungssteuerung abgezielt (Zell, 1992, S. 187).

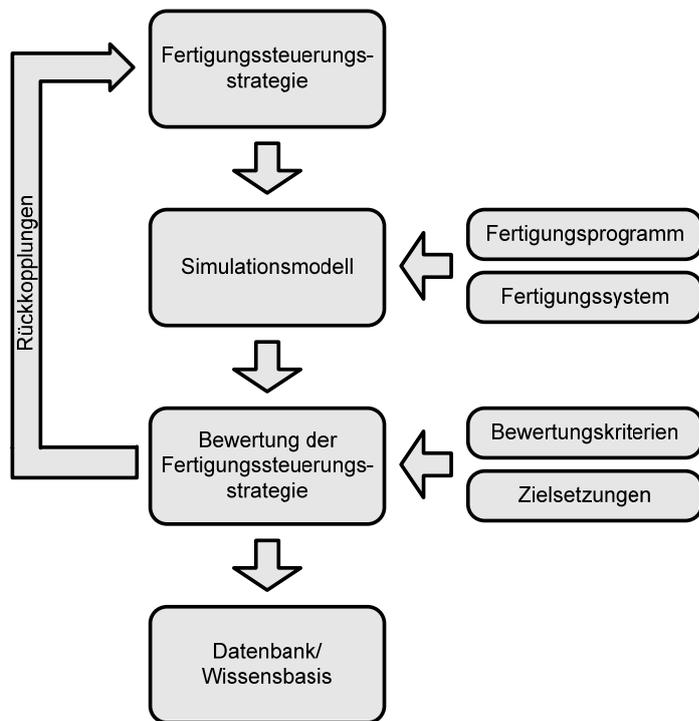


Abbildung 16: Simulation als Instrument zur Unterstützung der Fertigungssteuerung (angelehnt an Zell, 1992, S. 39; Friederich, 1998, S. 59)

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulation in der Konzeptphase eingesetzt, wodurch die Entwicklung und der Vergleich unterschiedlicher Steuerstrategien in Bezug auf die jeweiligen Zielgrößen mithilfe der Simulation untersucht werden können (Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993, S. 218).

### 4.3 Methode und Konzept

Bei der Modellierung wird ausgehend von dem realen oder geplanten System zunächst aus einem Gedankenmodell ein symbolisches Modell erzeugt, welches daraufhin in ein Softwaremodell transformiert wird (VDI 3633, 2000, S. 14 f.). Das Modell besitzt dabei folgende Eigenschaften (VDI 3633, 2000, S. 14; Wenzel, 1998, S. 33): Experimentierbar (Experimentierfähigkeit), Dynamisch (Zeitverhalten), Symbolisch (Beschreibungsmittel), Digital (Beschreibungsart), Deterministisch oder Stochastisch (Zufallsverhalten), Kontinuierlich oder Diskret (Simulationsmethode).

In einem Simulationsmodell wird die Zeit des realen Systems über die Simulationszeit abgebildet. Mit Voranschreiten der Zeit wird der Zustand des Modells verändert. Es existieren unterschiedliche Methoden zur Abbildung der Zeit. Es sind Simulationswerkzeuge vorhan-

den, welche die Abbildung der Simulationszeit, die Zustandsänderungen im Modell sowie den Aufbau und die Verwaltung des Modells unterstützen (Wenzel, 1998, S. 34). Nach Wenzel (Wenzel, 1998, S. 34) werden die Simulationsmodelle über:

1. Simulationsmethode und
2. Modellierungskonzept oder auch Strukturkonzept

charakterisiert. Die Simulationsmethode legt dabei das Zeitverhalten fest (Mattern, Mehl, 1989) und das Modellierungskonzept definiert das Regelwerk zur Strukturierung und Modellierung (Wenzel, 1998, S. 34 f.).

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, eine kontinuierliche oder eine diskrete Simulationsmethode zu verwenden. Die kontinuierliche Simulation verwendet gekoppelte Differentialgleichungen zur Beschreibung der Zeit und der Zustandsvariablen. Die diskrete Simulation dagegen diskretisiert die Zeitachse und Ereignisse führen zu Zustandsänderungen (Wenzel, 1998, S. 36; Mattern, Mehl, 1989). Nachfolgend ist eine Klassifizierung der Simulationsmethoden dargestellt (Abbildung 17).

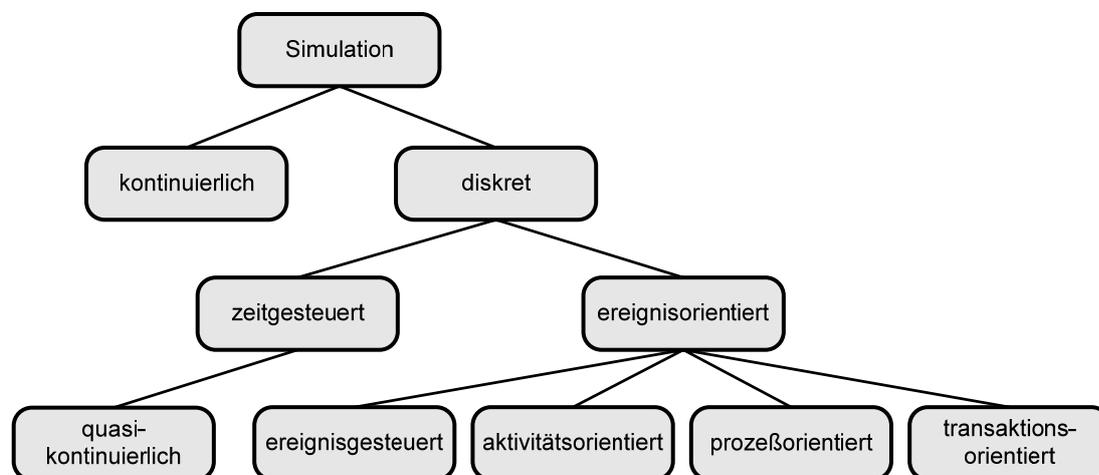


Abbildung 17: Klassifikation der Simulationsmethoden (Mattern, Mehl, 1989, S. 200)

Für die Materialflusssimulation hat sich die diskrete ereignisorientierte Simulation etabliert (Bley, Braun, Wuttke, 1999), weshalb hier verstärkt auf diese Simulationsmethode eingegangen wird. Bei dieser Simulationsmethode finden die Zustandsänderungen sprunghaft zu diskreten Zeitpunkten statt, welche durch Ereignisse ausgelöst werden, die keine Simulationszeit verbrauchen (Mattern, Mehl, 1989).

Ein Ereignis (event) wird wie folgt definiert: „an event is defined as an instantaneous occurrence that may change the state of the system“ (Law, Kelton, 1991, S. 6).

Zudem werden die Begriffe Prozesse (process) und Aktivitäten (activities) verwendet (Wenzel, 1998, S. 37). Weitere Aspekte sind bei Fishman (Fishman, 1973), Hooper (Hooper, 1986; Hooper, Reilly, 1982), Kreuzer (Kreuzer, 1986), Krüger (Krüger, 1975) und Wenzel (Wenzel, 1998) zu finden.

Bei der diskreten ereignisorientierten Simulation muss nach Auftreten eines Ereignisses feststehen, welches Ereignis als Nächstes eintreten soll. Häufig stehen aber bereits mehrere Folgeereignisse fest (Mattern, Mehl, 1989). In der nachfolgenden Abbildung ist der Ablauf beispielhaft dargestellt.

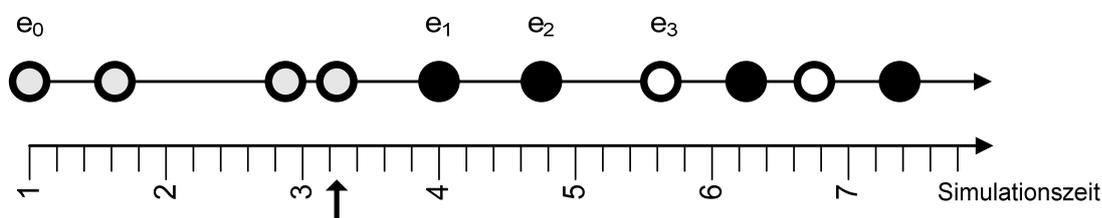


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung des Ablaufs der ereignisorientierten diskreten Simulation (Mattern, Mehl, 1989, S. 201)

Zum aktuellen Zeitpunkt haben bereits die grau dargestellten Ereignisse stattgefunden. Diese Ereignisse haben zur Einplanung der schwarz hinterlegten Ereignisse geführt. Durch diese Ereignisse können weitere, zum aktuellen Zeitpunkt noch unbekannte Ereignisse (weiß) hinzugefügt werden. Beim Eintreten eines Ereignisses wird die diesem Ereignis zugehörige Routine innerhalb des Prozesses aufgerufen, die zu einer Zustandsänderung und der Einplanung weiterer Ereignisse führen kann. Die Simulationszeit wird immer auf die Eintrittszeit des nächsten eingeplanten Ereignisses gesetzt, wodurch ereignislose Zeiträume übersprungen werden. Die eingeplanten Ereignisse werden in einem Simulationssystem üblicherweise in einer Ereignisliste (Ereigniskalender) verwaltet. Diese Ereignisliste ist meist nach der Eintrittszeit sortiert (Mattern, Mehl, 1989). Nachfolgend ist beispielhaft eine Ereignisliste dargestellt (Abbildung 19).

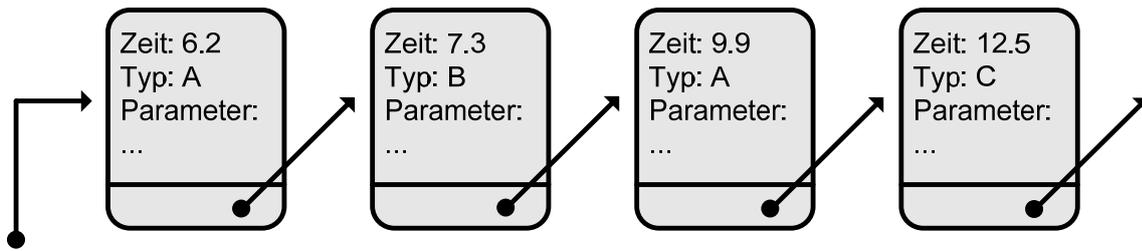


Abbildung 19: Beispiel einer Ereignisliste (Mattern, Mehl, 1989, S. 202)

Neben den unterschiedlichen Simulationmethoden basieren die Modelle wie schon angesprochen auch auf verschiedenen Modellierungskonzepten (Abbildung 20).

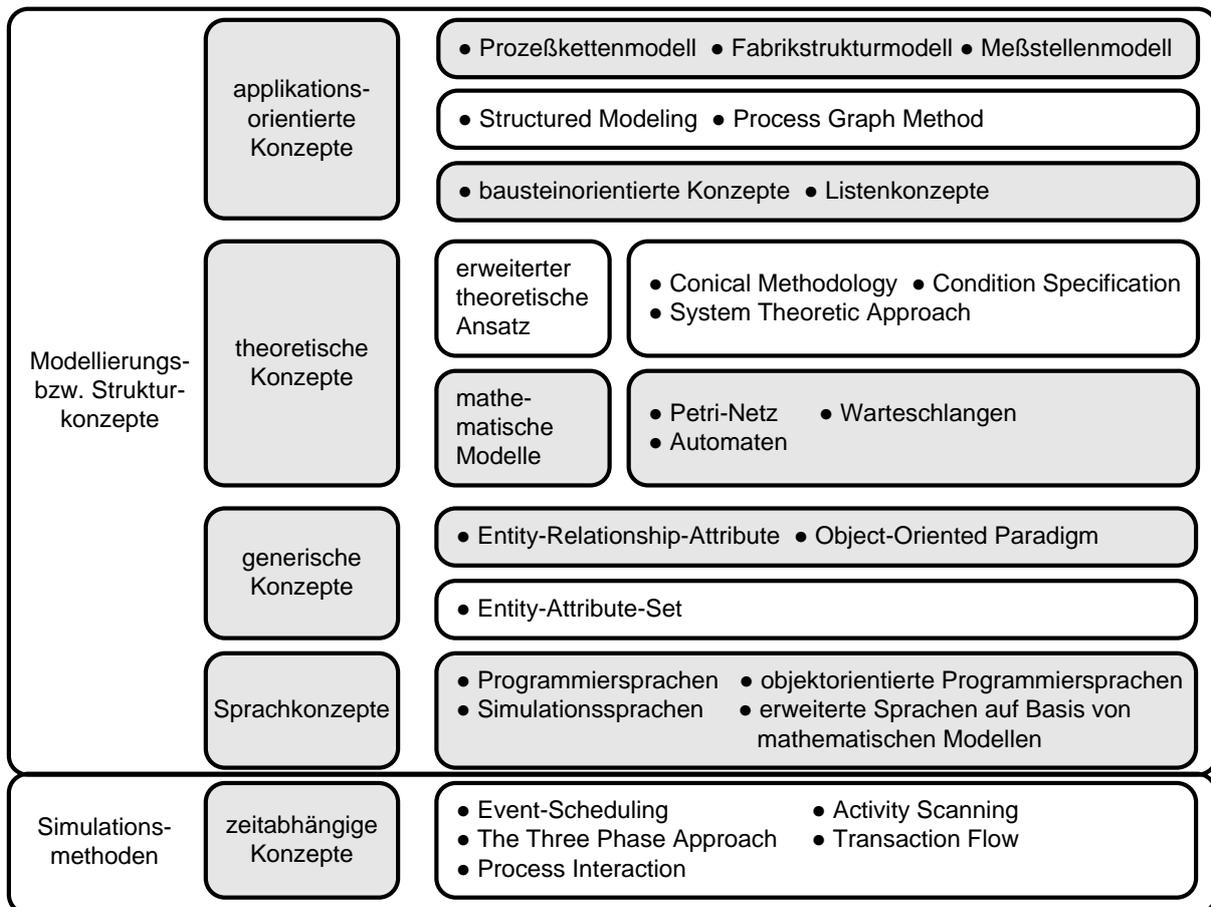


Abbildung 20: Überblick Modellierungskonzepte (Wenzel, 1998, S. 38)

In dieser Arbeit wird nur auf die in der Materialflusssimulation häufig anzutreffenden applikationsorientierten Konzepte eingegangen. Zu den anderen Konzepten sei auf Wenzel (Wenzel, 1998, S. 39 ff.) verwiesen.

Bei den applikationsorientierten Konzepten sind vor allem die Bausteinkonzepte zu nennen. Bausteinorientierte Simulatoren besitzen auf ein bestimmtes Anwendungsfeld beschränkte

vordefinierte Elemente. Diese Elemente repräsentieren meist reale Systemkomponenten mit ihrer jeweiligen Funktionalität (Bley, Braun, Wuttke, 1999; Wenzel, 1998, S. 42). Neben der ablauforientierten bzw. funktionsorientierten Sichtweise (Fertigen, Montieren, Prüfen) hat sich vor allem die aufbauorientierte bzw. topologische Sichtweise (Förderstrecke, Lager, Maschine) etabliert (Wenzel, 1998, S. 42). Eine Unterscheidung der Bausteine kann in nachstehende Gruppen erfolgen (Bley, Braun, Wuttke, 1999):

- Bewegte Elemente: Produkte, Transporthilfsmittel,
- Stationäre Elemente: Arbeitsstationen, Puffer, Aufzüge,
- Organisatorische Elemente: Pausen, Störungen, Arbeitspläne.

Hierdurch ist der Modellierungsprozess einfacher und wirtschaftlicher (Bley, Braun, Wuttke, 1999).

## 5 Thermische Gebäudesimulation

### 5.1 Definition

Gerade in den letzten Jahren wird die thermische Gebäudesimulation verstärkt eingesetzt, um das thermische und energetische Verhalten von Gebäuden und Anlagen genauer zu berechnen. Während in den 60er und 70er Jahren die Planung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen nur das Ziel eines möglichst hohen Komforts hatte und somit zu überdimensionierten Anlagen mit hohem Energieverbrauch führte, hat der Kostendruck zu einem Umdenken hinsichtlich genauerer Dimensionierung und geringerem Energieverbrauch geführt. Diese Anforderungen und die vorhandenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen technischen Anlagen und dem Gebäude verlangen eine Gebäude- und Anlagensimulation (VDI 6020, 2001, S. 2).

Nach der VDI Richtlinie 6020 wird zwischen der Thermisch-energetische Gebäudesimulation (TEG) und der Thermisch-energetische Anlagensimulation (TEA) unterschieden.

„Unter einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation [...] wird die stundenweise Berechnung der Raumreaktion (Last oder Temperatur) unter Berücksichtigung aller Einflüsse (Aktionen) wie Außenklima, Innenlasten, Verkehrs- und Betriebszeiten etc. verstanden. In der Regel ist eine solche Simulation mit den Wetterdaten eines Testreferenzjahres (TRY) durchzuführen“ (VDI 6020, 2001, S. 5).

Hierbei ist eine stundenweise Berechnung nicht zwangsläufig vorgegeben. Je nach Anwendungsfall können auch kleinere bzw. größere Zeitschrittweiten sinnvoll sein.

Die thermisch-energetische Anlagensimulation beschäftigt sich mit dem Verhalten der heiz- oder raumluftechnischen Anlage aufgrund der durchgeführten Gebäudesimulation (VDI 6020, 2001, S. 5) und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Bei der thermischen Gebäudesimulation sind statische und dynamische Verfahren zu unterscheiden (Gummerer et al., 2000a, S. 1; Knabe et al., 1999, S. 2). Während statische Programme Energiebilanzen mit Hilfe von Faktoren bzw. Kennzahlen erstellen, verwenden dynamische Programme mathematische und physikalische Modelle. Statische Programme sind weit verbreitet, können aber nur zur Beantwortung einfacher Aufgabenstellungen verwendet

werden. Die dynamischen Programme dagegen können auch für komplexe Systeme eingesetzt werden (Gummerer et al., 2000a, S. 1). Obwohl die Programme zwar bereits großteilig in den 70er Jahren entwickelt wurden, werden sie erst vereinzelt eingesetzt (Knabe et al., 1999, S. 1 f.).

Besonders ist bei der thermischen Gebäudesimulation zu beachten, dass das Nutzerprofil eine unbekannte Größe der Berechnung darstellt. In der Simulation wird von Standard-Nutzern ausgegangen, wodurch die Ergebnisse um bis zu 100 % abweichen können. Das Fehlerpotenzial durch die Abschätzung des Nutzerverhaltens ist somit größer als durch die programmspezifischen Lösungsansätze (Gummerer et al., 2000b, S. 56).

## 5.2 Einsatzgebiete

„Das Anwendungsspektrum reicht vom Einfamilienhaus bis zum repräsentativen Bürogebäude mit Glasfassade und Atrium. Mit der Simulation können verschiedenste Aspekte mit dem Ziel der energetischen Optimierung untersucht werden – von der einfachen Lastberechnung für Heizung, Lüftung und Kühlung über spezielle Untersuchungen wie z. B. der sommerlichen Erwärmung bis hin zu Lebenszyklusanalysen baulich und technisch komplexer Gebäude. Zudem bietet sich die heutige Simulationstechnik zunehmend als Instrument und Planungsumgebung für das kooperative, integrale Planen an“ (Knabe et al., 1999, S. 1).

Die thermische Gebäudesimulation kann beispielsweise für folgende Aufgaben eingesetzt werden (Gummerer et al., 2000b, S. 1; Knabe et al., 1999, S. 2):

- Berechnung von Raumklima und Energieverbrauch,
- Ermittlung solarer Energiegewinne bzw. sommerlicher Erwärmung,
- Planung, Beurteilung und Optimierung von Gebäudetechnik,
- Planung, Beurteilung und Optimierung von architektonischen Entwürfen hinsichtlich der energetischen Auswirkungen,
- Entwurf, Optimierung und Test von Regelungs- und Gebäudemanagementsystemen,
- Optimierung der Tageslichtversorgung und Ausleuchtung der Raumressourcen passend zum Nutzungsprofil,

- Einsatz im laufenden Betrieb zur Fehlererkennung und Fehlerdiagnose bzw. zur vorausschauenden Betriebsweise,
- Entwicklung neuer Anlagenkomponenten und (Regel-) Systeme.

Grundsätzlich ist bei dem Einsatz zu unterscheiden, welche Art von Gebäude untersucht werden soll (Gummerer et al., 2000a, S. 2):

- Wohngebäude,
- Bürogebäude,
- Gebäude mit hallenähnlicher Struktur (z. B. Sport-, Veranstaltungszentren, Industriehallen).

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der Gebäudesimulation wird deutlich, dass es nicht sinnvoll ist, jedes Einfamilienhaus zu berechnen. Der Einsatz ist besonders bei größeren Bauvorhaben sowie bei extremen oder vollkommen neuen architektonischen Lösungen berechtigt (Gummerer et al., 2000b, S. 3).

Die thermische Gebäudesimulation kann mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad je nach Aufbau des Simulators in allen Phasen von Entwurf und Planung eingesetzt werden (Knabe et al., 1999, S. 1). Dies sind u. a. (Gummerer et al., 2000a, S. 20):

- Vorentwurf,
- Entwurf,
- Einreichung,
- Ausführungsplanung und
- Ausschreibungsunterlagen.

### **5.3 Methode**

Die thermische Gebäudesimulation ist geprägt durch die hohe Komplexität des Systems „Gebäude und Gebäudetechnik“ in Verbindung mit den jeweiligen physikalischen Verfahren der einzelnen Teilsysteme. Die mathematisch-physikalischen Modelle der Teilsysteme haben sich größtenteils bewährt (Feist, 1994, S. 19). Nachfolgend sind die Teilmodelle aufgeführt, die zu berechnen und zu verknüpfen sind (Feist, 1994, S. 21; VDI 6020, 2001, S. 10 ff.):

- Instationäre Wärmeleitung in der Raumumfassung (Fourier Gleichung)
- Strömung von Luft im Raum bzw. konvektiver Wärmeübergang an Oberflächen (Navier-Stokes Gleichungen)
- Langwelliger Strahlungsaustausch (Plancksches Gesetz)
- Reflexion, Transmission und Absorption von Solarstrahlung
- Regelung der Heizung
- Wärmequellen im Raum
- Infiltration und Ventilation

Die Randbedingungen und damit zeitlich unabhängigen Größen sind (Feist, 1994, S. 21; VDI 6020, 2001, S. 11):

- Beschreibung der Gebäudegeometrie (z. B. Maße der Räume, Raumkopplungen)
- Beschreibung der bauphysikalischen Daten (z. B. Stoffdaten der Wände und Fenster)
- Klimadaten des jeweiligen Standortes (z. B. Umgebungstemperatur, solare Strahlung)

Die einzelnen Teilmodelle und deren Zusammenhänge sind in Abbildung 21 veranschaulicht.

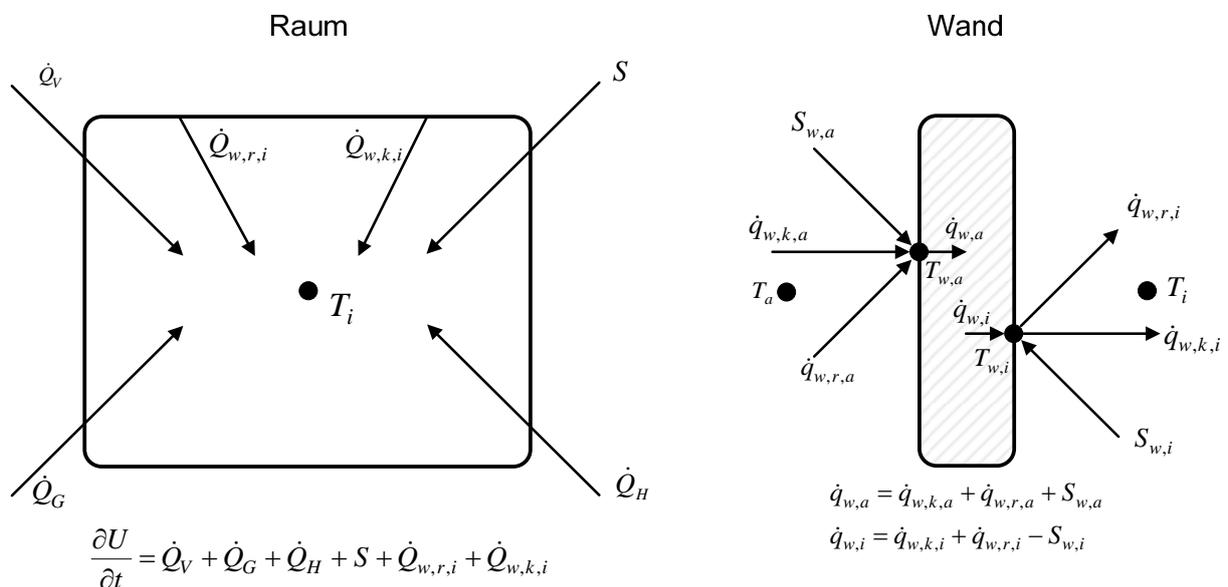


Abbildung 21: Wärmebilanz von Raum und Wand

Die Lösung der oben genannten Grundgleichungen ist allerdings auch für ein einzelnes Teilsystem mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden, da die Grundgleichungen häufig selbst

sehr komplex sind und besonders die Randbedingungen (z. B. Gebäudegeometrie) dazu führen, dass eine analytische Lösung nicht möglich ist. Schon hierbei ist eine numerische Lösung notwendig. Bei der Kopplung der einzelnen Grundgleichungen ist sogar eine numerische Lösung nicht mehr mit vertretbarem Aufwand zu finden. Es müssen daher Vereinfachungen in den Teilsystemen verwendet werden, um die Komplexität und somit auch den Aufwand zu reduzieren. Eine Abbildung des Gesamtsystems ist allerdings notwendig. Es sollte vielmehr ein geringerer Detaillierungsgrad bei den einzelnen Teilsystemen realisiert werden, ohne die Wechselwirkungen untereinander zu vernachlässigen. Für Detailanalysen kann nach der Gesamtuntersuchung mit den berechneten Randbedingungen eine Einzelkomponente näher betrachtet werden (Feist, 1994, S. 19 ff.).

In diesem Zusammenhang kann von einer kontinuierlichen Simulation gesprochen werden, bei der sich der Zustand des Modells stetig mit der Zeit verändert (Mattern, Mehl, 1989). Das Gebäude wird als Menge gekoppelter Differentialgleichungen betrachtet, deren freie Variable die Zeit ist (Mattern, Mehl, 1989; Gummerer et al., 2000b, S. 28). Die eingesetzten Verfahren können nach der Art und Weise der dynamisch instationären Berechnung unterteilt werden. Etabliert haben sich vor allem folgende Verfahren (Gummerer et al., 2000b, S. 59 ff.):

- Finite-Elemente-Verfahren (FEM)

Das Verfahren wurde im Bereich der Festkörpermechanik entwickelt. Das Integrationsgebiet wird dabei in sich nicht überschneidende geometrisch gleiche Elemente unterteilt. Das Gesamtsystem wird als Netz und alle Eckpunkte als Knoten bezeichnet. Die Berechnung erfolgt über Ansatzfunktionen der finiten Elemente unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen. Daraufhin findet eine numerische Integration statt.

- Finite-Differenzen-Verfahren

Es wird wie bei dem FEM eine Diskretisierung durchgeführt. Daraufhin werden allerdings die Differentialgleichungen direkt in die Gitterpunkte eingesetzt. In festen Zeitintervallen findet daraufhin eine Reihentwicklung statt, die nach dem n-ten Glied abgebrochen wird. Die verbleibende Gleichung stellt nun die Entwicklung zwischen zwei Zeitpunkten dar.

- Finite-Volumen-Verfahren

Auch hier findet zunächst eine Diskretisierung statt. Die Elemente entsprechen aber klei-

nen Volumeneinheiten. Es werden allerdings keine Differenzen, sondern Erhaltungsgleichungen verwendet.

- Harmonische Verfahren

Die Grundlage für dieses Verfahren bilden Zustandsänderungen mit periodischer Wiederkehr, wobei von einem eingeschwungenen Zustand ausgegangen wird. Die einzelnen Eingangskomponenten werden in sogenannte Fourier Komponenten zerlegt, über die mithilfe einer Transferfunktion das Verhalten dargestellt werden kann. Nicht lineare Prozesse sind mit diesem Verfahren nicht abzubilden.

- Response Verfahren

Bei diesem Verfahren werden die zeitlich abhängigen Größen über eine Serie aufeinanderfolgender Impulse dargestellt.

Hauptsächlich haben sich bei den Softwaresystemen Finite-Differenzen-Verfahren und Response-Verfahren etabliert (Gummerer et al., 2000b, S. 28). Nachfolgend werden die wichtigsten physikalischen Grundlagen für die oben aufgeführten Teilmodelle erläutert.

#### Instationäre Wärmeleitung in der Raumumfassung

Das zeitliche Verhalten des Temperaturfeldes  $T(x, y, z, t)$  in der Raumumfassung wird durch die Fouriersche Differentialgleichung beschrieben.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{q} = \text{div}(\lambda \text{grad } T)$$

Formel 4: Fouriersche Wärmeleitungsgleichung (Feist, 1994, S. 86)

Nur in Ausnahmefällen ist die obige Gleichung analytisch lösbar, es werden daher häufig numerische Verfahren verwendet. Allerdings erfordert auch eine numerische Lösung für ein ganzes Gebäude aufgrund der nötigen räumlichen und zeitlichen Diskretisierung einen sehr hohen Rechenaufwand und erscheint daher wenig sinnvoll. Das Gebäude wird zu diesem Zweck in Bauteile zerlegt, die als Wand bezeichnet werden, unabhängig davon, ob es sich um eine Wand, ein Dachbauteil, einen Boden oder ein Fenster handelt. Zudem wird davon ausgegangen, dass der Aufbau tangential zur Hülle homogen ist und die Eigenschaften sich nur

normal zur Hülle ändern. Somit lässt sich die Wärmeleitung als eindimensionale dynamische Aufgabe behandeln (Feist, 1994, S. 86 ff.).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Formel 5: Eindimensionale, dynamische Wärmeleitungsgleichung (Feist, 1994, S. 131)

Der Aufwand zur Lösung dieser Formel ist numerisch leicht beherrschbar. Allerdings kann an den Anschlüssen zwischen den Bauteilen (Wärmebrücken) die Approximation sehr schlecht werden, wodurch an diesen Stellen die Lösung der mehrdimensionalen Wärmeleitungsgleichung notwendig ist (Feist, 1994, S. 88).

#### Konvektiver Wärmeübergang an Oberflächen

Der Wärmestrom des konvektiven Wärmeübergangs wird nach dem Newtonschen Wärmeübergangsgesetz wie folgt berechnet.

$$\dot{Q} = \alpha_k (T_W - T_L) A$$

Formel 6: Konvektiver Wärmeübergang (Glück, 1997, S. 55; VDI 6020, 2001, S. 12)

Bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten ist zu unterscheiden, ob der Wärmeübergang im Raum oder an den Außenwänden untersucht wird. Im Raum kann grundsätzlich von freier Konvektion ausgegangen werden, während an den Außenwänden weitere Faktoren (z. B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Beschaffenheit und Lage der Oberfläche, Feuchtigkeit) den Wärmeübergang beeinflussen und somit auch teilweise eine erzwungene Konvektion vorliegt. Die Bestimmung ist daher deutlich erschwert (Feist, 1994, S. 279; Glück, 1997, S. 54 f.).

Theoretische Untersuchungen zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten basieren auf den Gleichungen von Navier-Stokes. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes werden aber häufig Ansätze aus der Ähnlichkeitstheorie verwendet, deren Basis experimentelle Untersuchungen sind. Als Ähnlichkeitszahlen werden in diesem Zusammenhang die Nusselt-Zahl, die Rayleigh-Zahl, die Grashof-Zahl und die Prandtl-Zahl verwendet (Feist, 1994, S. 158 f.; Glück, 1997, S. 57 ff.).

### Langwelliger Strahlungsaustausch

Ein warmer Körper gibt abhängig von seiner Temperatur sowie der Größe und Beschaffenheit seiner Oberfläche elektromagnetische Strahlung ab. Dieser Energiestrom wird von einem Körper mit anderer Temperatur teilweise absorbiert. Die physikalische Grundlage hierfür ist das Plancksche Gesetz. Bei Auftreffen einer Strahlung auf einen Körper findet eine Reflexion, Transmission und Absorption statt. Der Energieinhalt wächst dabei mit der vierten Potenz der Temperatur (Gummerer et al., 2000b, S. 23 f.). Bei den Außenoberflächen der Gebäudehülle findet ein Strahlungsaustausch mit den Flächen der Umgebung und dem Himmel statt (Feist, 1994, S. 288).

### Reflexion, Transmission und Absorption von Solarstrahlung

Neben der langwelligigen Strahlung findet zudem auch ein kurzwelliger Strahlungsaustausch (Solarstrahlung) statt. Hierbei sind zu unterscheiden (VDI 6020, 2001, S. 16):

- Strahlungsaustausch an außenliegenden Bauteilen,
- Strahlungsaustausch durch transparente Bauteile,
- Strahlungsaustausch mit innenliegenden nichttransparenten Bauteilen.

Der Wert der absorbierten Solarstrahlung bzw. des Strahlungsdurchgangs hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils sowie dem direkten und diffusen Strahlungsanteil ab (VDI 6020, 2001, S. 16).

### Regelung der Heizung

Bei der Ermittlung des Heizwärmebedarfs bzw. der Temperatur wird von einer idealen Heizung ausgegangen. Diese ideale Heizung wird durch eine ideal geregelte Warmluftheizung mit folgenden Eigenschaften repräsentiert (Feist, 1994, S. 304):

- Regelgröße ist die Raumlufttemperatur.
- Stellgröße ist die Wärmezufuhr unmittelbar an die Raumluft.
- Die Regelung ist absolut trägheitslos.
- Die Regelung stellt zu jedem Zeitpunkt exakt die vorgegebene Solltemperatur ein (ideale Regelung).

Es entstehen hierdurch einige, teilweise bedeutende Unterschiede zur Realität (Feist, 1994, S. 305):

- Die Heizwärme wird meist nicht ausschließlich der Raumluft zugeführt, sondern es existieren auch Strahlungsanteile.
- Die Wärmezufuhr ist nicht trägheitslos (z. B. durch Wärmekapazität des Heizkörpers).
- Die Regelung arbeitet nicht ideal (Hysterese, Zweipunktregelung).

#### Wärmequellen im Raum

In Gebäuden mit geringem Heizenergiebedarf stellen die internen Wärmequellen einen entscheidenden Wärmbeitrag dar. Bei Industriegebäuden ist die Wärmeabgabe von Maschinen und Anlagen nicht unerheblich. Es müssen daher die Quantität, der zeitliche Anfall und der Ort dieser Quellen genau bestimmt werden. Zudem muss auch die Art der Wärmeabgabe (Konvektion und Strahlung) bestimmt werden. Hierin liegt ein hoher Aufwand, da je nach Objekt dies sehr unterschiedlich sein kann (Feist, 1994, S. 298).

#### Infiltration und Ventilation

Durch die Öffnungen in dem Gebäude bzw. durch das Lüftungssystem findet ein Luftaustausch mit der Außenluft statt. Da ein Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft existiert, ist damit auch ein Energiestrom verbunden (Feist, 1994, S. 239).

Dieser Energiestrom kann wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} c (T_{zu} - T_i)$$

Formel 7: Lüftungswärmeverlust (VDI 6020, 2001, S. 12)

## 6 Stoff- und Energiefluss von Maschinen

### 6.1 Ökobilanzierung / Ganzheitliche Bilanzierung

In den letzten Jahrzehnten haben sich die Umweltbelastungen und der steigende Rohstoffverbrauch zu einer bedeutenden Aufgabe der Gesellschaft entwickelt. Es wurde klar, dass Ökonomie und Ökologie nicht mehr losgelöst voneinander betrachtet werden konnten, sondern ein nachhaltiges und zukunftsverträgliches Wirtschaften sowie ein effizienter und sparsamer Umgang mit Ressourcen erforderlich sind (Eyerer, 1996, S. 1; Eberle, 2000, S. 8). In diesem Zusammenhang sind verschiedenste Methoden entwickelt worden, um eine systematische Erfassung der Umweltrelevanz von Produkten und Prozessen zu ermöglichen. Mittlerweile existiert eine internationale Standardisierung der Ökobilanzierung. In Abbildung 22 sind die wichtigsten Entwicklungsschritte aufgeführt. Für eine ausführlichere Beschreibung sei auf Eyerer (Eyerer, 1996, S. 4 ff.) und Eberle (Eberle, 2000, S. 9 f.) verwiesen.

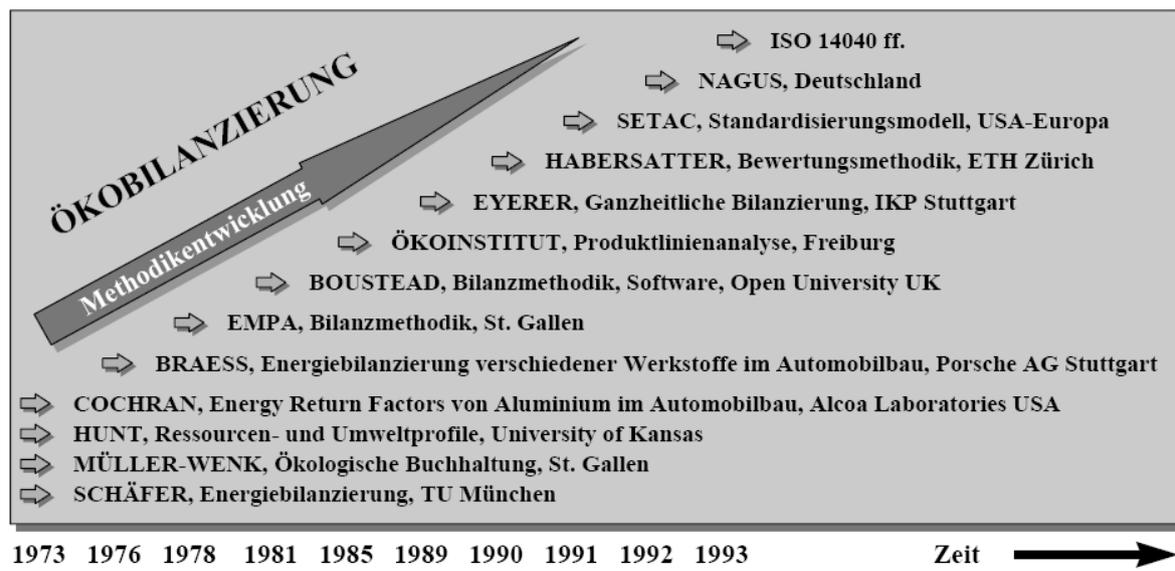


Abbildung 22: Historische Entwicklung der Ökobilanzierungsmethodik (angelehnt an Eyerer, 1996, S. 4)

Eine Ökobilanz ist nach ISO EN DIN 14040 definiert als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (ISO 14040, 2006, S. 9). Die Ganzheitliche Bilanzierung erweitert den Gedanken der Ökobilanzierung um die Dimensionen Wirtschaft und Technik und

wird definiert „als ein Instrumentarium zur Erhebung, Dokumentation und Aufbereitung umweltlicher Parameter von Produkten, Verfahren, Systemen oder Dienstleistungen auf der Basis technischer und wirtschaftlicher Pflichtenhefte“ (Eyerer, 1996, S. 2).

In diesem Zusammenhang werden auch häufig die Begriffe Life Cycle Assessment und Life Cycle Analysis (LCA) verwendet (Eberle, 2000, S. 11; Eyerer, 1996, S. 6). Die Werkzeuge der Ökobilanzierung bzw. der Ganzheitlichen Bilanzierung werden in mehreren Bereichen eingesetzt. Sowohl in der Planung, Optimierung, Schwachstellenanalyse als auch im Marketing werden sie verwendet (Baitz et al., 2001). Entscheidungen zur Werkstoffauswahl, Verfahrenstechnik sowie dem Recycling bei der Produktentwicklung sind allerdings das Haupteinsatzgebiet (Eyerer, 1996, S. 2; Eberle, 2000, S. 10).

Es findet generell eine Betrachtung des gesamten Lebenswegs statt. Die Teilschritte eines Produktlebenszykluses sind (Eyerer, 1996, S. 6):

- Abbau von Rohstoffen,
- Herstellung und Verarbeitung von Halbzeugen und Produkten,
- Nutzung der Produkte,
- Wieder- und Weiterverwertung (Recycling),
- Entsorgung.

Folgende Parameter sind dabei zu beachten (Eyerer, 1996, S. 6):

- Verbrauch materieller Ressourcen,
- Verbrauch von Energieträgern,
- Belastungen der Luft durch atmosphärische Emissionen,
- Stoffliche Belastungen des Wassers,
- Belastungen des Bodens durch Abfälle und direkte Emissionen.

Die Vorgehensweise der Bilanzierung gliedert sich dabei in vier Arbeitsschritte, die sich gegenseitig bedingen und beeinflussen (Roth, 2001, S. 5; ISO 14040, 2006, S. 4):

- Zieldefinition,
- Sachbilanz,

- Wirkungsabschätzung,
- Interpretation der Ergebnisse.

Im Rahmen der Zieldefinition werden Untersuchungsrahmen, Zweck der Studie, sowie die Systemgrenzen definiert. In der anschließenden Sachbilanz findet eine Aufsummierung der Input- und Outputflüsse über den gesamten Lebensweg des Produktes statt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Sachbilanz werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung die potenziellen Umweltwirkungen ermittelt. Dabei findet eine Zuordnung zu Wirkungskategorien (z. B. Treibhauspotenzial, Eutrophierungspotenzial) statt. Im letzten Schritt findet eine Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf die zu Beginn festgelegten Ziele statt (ISO 14040, 2006, S. 17 ff.). Diese kurze Darstellung der Methode der Ökobilanzierung bzw. der Ganzheitlichen Bilanzierung soll nur einen Überblick über die Methodik sowie die Einsatzgebiete geben, soweit es für die Fragestellungen dieser Arbeit relevant ist. Eine ausführliche Darstellung kann beispielsweise bei Eyerer (Eyerer, 1996) bzw. in der ISO-Reihe 14040 ff. (ISO 14040, 2006) gefunden werden.

In Zusammenhang mit der Ermittlung von Stoff- und Energieströmen von Maschinen ist nur der Lebensabschnitt der Produktion von Interesse. Weiterhin muss auch keine Wirkungsabschätzung durchgeführt werden. Vielmehr ist die in der Sachbilanz stattfindende Aggregation der Input- und Outputströme der einzelnen Fertigungsprozesse zu verwenden. Es handelt sich somit um eine Sachbilanzierung der Fertigungsprozesse. Als Nachteil der Methodik ist die retrospektive Betrachtungsweise zu nennen, da häufig erst nach Produktentwicklung eine Überprüfung stattfindet (Schiefer, 2001, S. 8).

Für die Sachbilanzierung von Fertigungsprozessen sind verschiedene Ansätze entwickelt worden. Im Besonderen hat in den 80er Jahren häufig eine Betrachtung des Energieeinsatzes stattgefunden. Ein Überblick ist bei Binding (Binding, 1988, S. 17 ff.) zu finden. Hervorzuheben sind vor allem die Untersuchungen von Degner (Degner, 1986) und Wolfram (Wolfram, 1986; Wolfram, 1990). Sie führten Untersuchungen zum Sekundär- und Primärenergieaufwand in der Metallindustrie durch. Dabei wurde zwischen Produktionsverbrauch und Nebenverbrauch unterschieden. Zum Produktionsverbrauch gehört die Energieaufwendung zur Durchführung des Hauptprozesses (z. B. Werkzeugmaschine bei der spanenden Fertigung). Er wird über die Wirkenergie, Grund- und Leerlaufleistung der Maschine sowie über die Fer-

tigungszeiten bestimmt. Die Daten liegen hauptsächlich als masse-, stückzahl- oder fertigungszeitbezogene Kenngrößen dar. Der Nebenverbrauch berücksichtigt alle sonstigen Energieaufwendungen, wie beispielsweise Heizung und Beleuchtung des Fabrikgebäudes (Wolfram, 1990). Die von Degner und Wolfram erarbeiteten Daten sind allerdings nicht mehr auf aktuelle Produktionsstätten zu übertragen (Schiefer, 2001, S. 12).

Ebenso wie bei Degner und Wolfram liegen auch bei Ökobilanzsoftwaresystemen vorwiegend für Fertigungsprozesse nur Energiedaten vor, die meist massebezogene Kenngrößen sind (Schiefer, 2001, S. 13).

## **6.2 Modellansätze für den Kunststoffspritzguss**

In diesem Abschnitt werden einige Modellansätze für das Fertigungsverfahren Kunststoffspritzguss vorgestellt. Im ersten Schritt wird zum besseren Verständnis der Fertigungsprozess erläutert.

Das Verfahren des Kunststoffspritzgusses kann in drei Phasen unterteilt werden:

- Plastifizieren,
- Einspritzen und Nachdrücken,
- Abkühlen und Entformen.

Es ist hierbei zu beachten, dass Phasen teilweise gleichzeitig verlaufen. In Abbildung 23 ist der gesamte Prozess grafisch dargestellt.

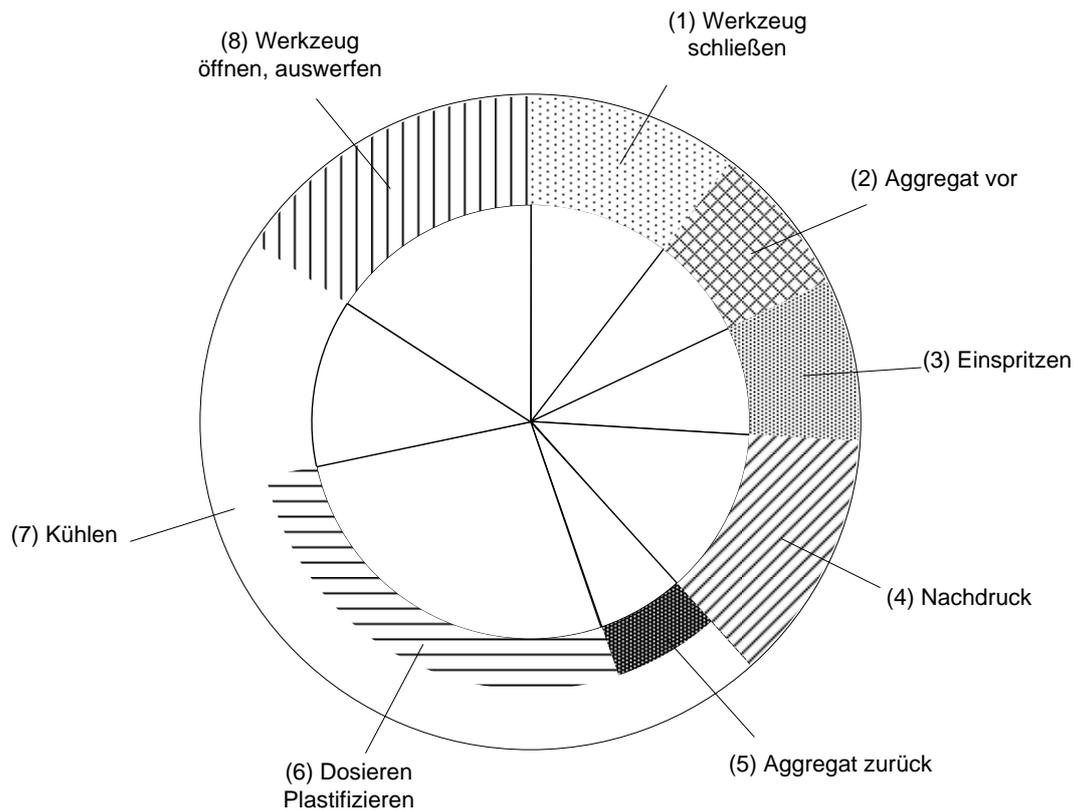


Abbildung 23: Kreisdiagramm des Spritzgusszyklus (Michaeli, 1999, S. 110)

Nach Schließen des Werkzeugs (1) wird das Spritzaggregat vorgefahren (2), wodurch ein Einspritzen in das Werkzeug möglich ist. Bei dem Einspritzvorgang (3) wird das vorher plastifizierte Granulat mit Druck in das Werkzeug gepresst. Anschließend wird zur Erhöhung der Qualität ein Nachdruck (4) aufrechterhalten. Nach Abschluss dieser Phase wird das Spritzaggregat zurückgefahren (5), um anschließend neues Kunststoffgranulat in der Schnecke durch Reibung aufzuschmelzen. Zur Erhaltung einer gleichmäßigen Temperatur und um zusätzliche benötigte Wärme einzubringen findet außerdem eine Beheizung durch außen aufgebraute Heizbänder statt. Ab dem Zurückfahren des Spritzaggregats wird zeitgleich das Spritzgussbauteil innerhalb des Werkzeugs gekühlt (7). Anschließend öffnet das Werkzeug und das Spritzgießteil wird ausgeworfen (8).

Der Energieverbrauch einer Spritzgussmaschine bei dem oben genannten Ablauf ist mit unterschiedlichen Parametereinstellungen in Abbildung 24 dargestellt.

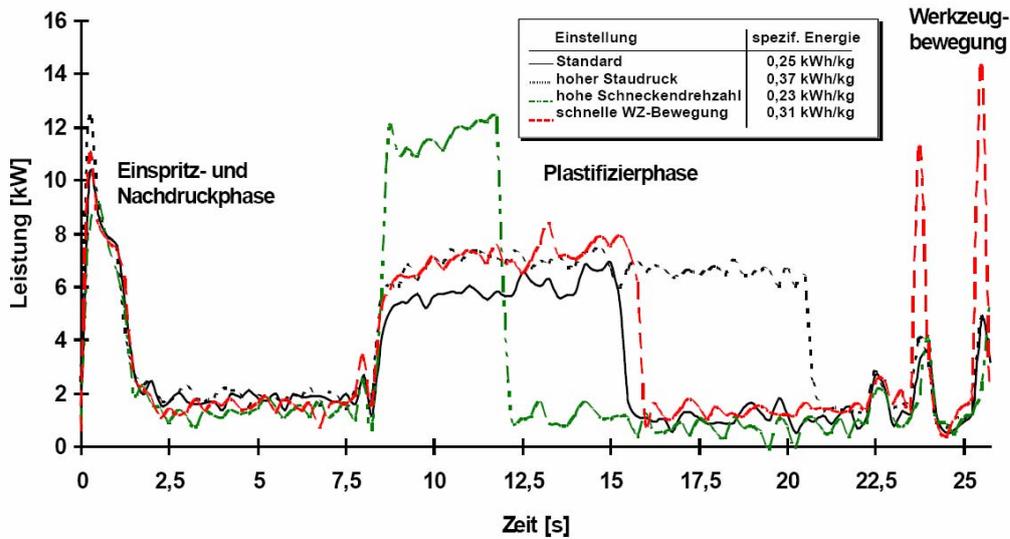


Abbildung 24: Leistungs- und spezifischer Strombedarf einer Spritzgussmaschine über einen Zyklus bei verschiedenen Parametereinstellungen (Wortberg et al., 1997, S. 5)

Zu erkennen ist, dass der Leistungsbedarf über die Zeit sehr unterschiedlich ist und zudem auch sehr stark bei unterschiedlichen Parametersätzen variiert. Darüber hinaus hat die verwendete Technologie der eingesetzten Maschine (hydraulisch – elektrisch) und das Verhältnis von Bauteilgewicht zu Maschinengröße (Maschinenauslastung) einen erheblichen Einfluss, wie in Abbildung 25 zu sehen ist.

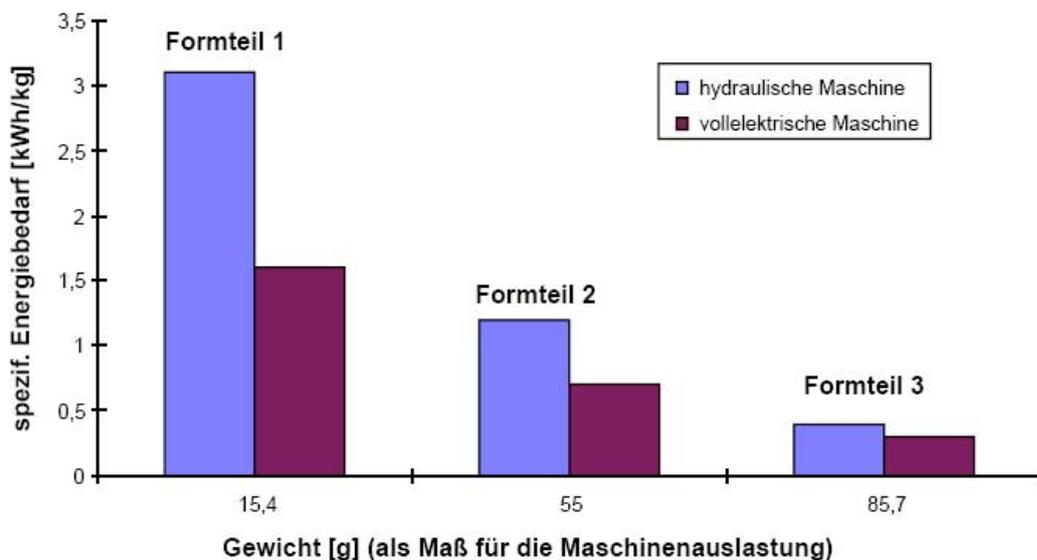


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Maschinenantrieb und Auslastung von Spritzgießmaschinen bei dem spezifischen Strombedarf (Wortberg et al., 1997, S. 6)

Der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Antriebskonzepten ist abhängig von den Wirkungsgraden der einzelnen Elemente. Die geringere Anzahl an Wirkelementen bei elektrischen Systemen führt zu einem besseren Gesamtwirkungsgrad und auch einer geringeren Bandbreite. In Untersuchungen wurde für hydraulische Maschinen eine Bandbreite des Wirkungsgrads von 0,33 bis 0,8 festgestellt, während elektrische Maschinen eine Bandbreite von 0,77 – 0,91 besitzen (Koch, 2004).

Aufgrund dieser Bandbreite der Wirkungsgrade und dem Einfluss der Maschinenauslastung und Parametereinstellung fällt der spezifische Energieverbrauch in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich aus. Nachfolgend sind beispielhaft einige Kennzahlen aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht des spezifischen Energieverbrauchs bei verschiedenen Untersuchungen

Quelle	spezifischer Energieverbrauch [kWh/kg]
Wortberg et al., 1997	ca. 0,23 – 3,0
Koch, 2004	ca. 0,5 – 1,7
Schmidt-Pletschka, Milles, 2005	ca. 1,6 – 2,8
EU-Recipe, 2005	Mittelwert 3,1

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 392 „Entwicklung umweltgerechter Produkte – Methoden, Arbeitsmittel, Instrumente“ ist eine Methode zur Sachbilanzierung von Fertigungsprozessen insbesondere für den Kunststoffspritzguss entwickelt worden. Es wird davon ausgegangen, dass die Input- und Outputströme des Prozesses über physikalische und technische Zusammenhänge bestimmt werden können. Die Inputs und Outputs die von der Maschine bedingt werden, basieren auf maschinenspezifischen Parametern. Alle anderen In- und Outputs beispielsweise von der Prozessperipherie werden über fabrikspezifische Parameter bestimmt (Abele et al., 2005, S. 52 f.).

Der Energieverbrauch setzt sich aus nachfolgenden Komponenten zusammen (Abele et al., 2005, S. 53):

- aktive Energie  $E_{th}$
- zusätzlicher Energieverbrauch der Maschine  $E_{additional}$
- Energieverbrauch der Prozessperipherie  $E_{periphery}$

Die aktive Energie wird abhängig von physikalischen Gesetzen oder empirischen, technologischen Zusammenhängen bestimmt. Sie repräsentiert den niedrigsten Energieverbrauch des Prozesses (Abele et al., 2005, S. 53). Für den Spritzgussprozess wird die aktive Energie über den mittleren Energieverbrauch und die Zykluszeit berechnet (Abele et al., 2005, S. 89).

$$E_{th} = t_{cycle} \cdot \sum P_{mean}$$

Formel 8: Berechnung aktive Energie Spritzgussprozess (Abele et al., 2005, S. 89)

Die Bestimmung des mittleren Energieverbrauchs erfolgt nach folgendem Schema (Abbildung 26).

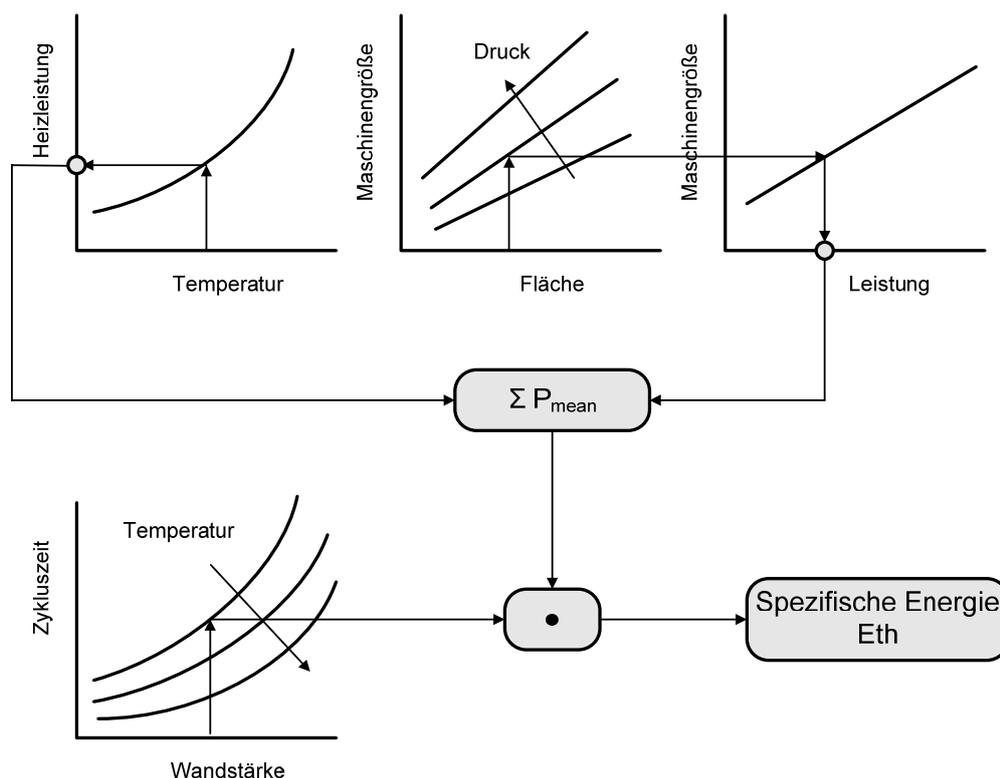


Abbildung 26: Verfahren zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs beim Kunststoffspritzguss (Abele et al., 2005, S. 88)

Der zusätzliche Energiebedarf der Maschine wird über die Grundleistung ( $P_{basic}$ ), die Leerlaufleistung ( $P_{idle}$ ), die Grundzeit ( $t_b$ ) und die Nutzungszeit ( $t_u$ ) bestimmt.

$$E_{additional} = P_{idle} \cdot t_b + P_{basic} \cdot (t_U - t_b)$$

Formel 9: Berechnung zusätzlicher Energiebedarf (Abele et al., 2005, S. 53)

Der Energiebedarf der Prozessperipherie wird kalkuliert über den mittleren Energiebedarf der einzelnen Verbraucher ( $P_i$ ) und die Nutzungszeit ( $t_U$ ).

$$E_{periphery,el} = \sum_i P_i \cdot t_U$$

Formel 10: Berechnung Energiebedarf Prozessperipherie (Abele et al., 2005, S. 53)

Neben der oben aufgeführten Methodik ist bei Lampl (Lampl, 1994) eine Berechnung des Energieverbrauchs über die physikalischen Zusammenhänge aufgeführt, bei der daraufhin über einen Wirkungsgrad der Realenergieverbrauch ermittelt wird. Der Ansatz unterscheidet vier Energieanteile (Lampl, 1994):

- Energie zum Plastifizieren des Kunststoffes
- Energie zur Formteilbildung (Einspritzen, Nachdrücken)
- Bewegungsenergie der Schließeinheit (Öffnen, Schließen, Auswerfen)
- Bewegungsenergie der Spritzeinheit (Düsenbewegung)

Die Plastifizierenergie berechnet sich aus der Aufschmelzenergie, der Pumpenenergie der Schnecke und dem mechanischen Reibungsverlust der Schnecke im Plastifizierzylinder (Lampl, 1994).

$$E_{PL} = m \cdot \Delta H + p_{ST} \cdot V + W_R$$

Formel 11: Plastifizierenergie (Lampl, 1994, S: 18)

Bei der Berechnung der Einspritzenergie werden der Füllwiderstand im Werkzeug und der Maschinendüse sowie Reibungsverluste im Schneckenzyylinder und Spritzzyylinder berücksichtigt (Lampl, 1994).

$$E_{SP} = \int A_Z \cdot p_E(t) \cdot ds$$

Formel 12: Einspritzenergie (Lampl, 1994, S. 18)

Die erforderliche Energie, die zum Öffnen und Schließen des Werkzeugs benötigt wird, hängt vom verwendeten System ab. Die hier dargestellte Formel ist allerdings nur für ein hydraulisches System mit Kniehebel anzuwenden. Sie berücksichtigt die Energie zum Beschleunigen und Abbremsen, die Energie zum Schließkraftaufbau sowie die Reibungsverluste beim Öffnen und Schließen (Lampl, 1994).

$$E_{s,\dot{o}} = A_{sz} \int p_s(t) \cdot d_s$$

Formel 13: Energie zum Öffnen und Schließen des Werkzeugs (Lampl, 1994, S. 19)

Das Auswerfen, die Düsenbewegung und die Nachdruckphase werden in dieser theoretischen Berechnung vernachlässigt, da der Energieverbrauch in diesen Phasen gering ist (Lampl, 1994).

Neben dem Energieverbrauch für den Spritzgussprozess ist auch die durch Konvektion und Strahlung abgegebene Wärmemenge von Interesse. Hierbei ist die Wärmeabgabe an den Kühlkreislauf und in die Halle zu unterscheiden. Für diese Aufteilung existieren verschiedene Angaben. Nach Gonser (Gonser, 2000, S. 11) wird 50 % der entstehenden Abwärme über das Kühlsystem abgeleitet. Hingegen geht Pauldrach (Pauldrach, 1981) davon aus, dass 70 % der Abwärme durch das Kühlwasser abgeführt werden und 30% Strahlungswärme sind. Bei einer Untersuchung von Extrusionsmaschinen hat Schwarze (Schwarze, 1996) festgestellt, dass 27 % Verluste durch Konvektion und 9 % Verluste durch Strahlung sind. Zudem gibt es bei Zöllner (Zöllner, 1997, S. 26 ff.) Ansätze zur physikalischen Berechnung der Wärmebilanz an dem Spritzgusswerkzeug, welches einen Teil der Wärmeabgabe darstellt.

Weiterhin sind gesundheitsschädliche Emissionen zu betrachten, die einen Lüftungsbedarf zur Folge haben. In Untersuchungen von Kühl (Kühl et al., 1995) und Marti (Marti et al., 2003) wurden die Emissionen bei der Kunststoffverarbeitung untersucht. In den meisten Fällen sind die Emissionen unterhalb der Nachweisgrenze. Lediglich bei der Verarbeitung von Polyoxymethylen (POM) findet eine Emission von gesundheitsschädlichem Formaldehyd statt. Es ist bei den Untersuchungen zu beachten, dass, wenn überhaupt, nur Gesamtmengen der jeweiligen Emissionen angegeben sind und kein zeitliches Verlaufprofil vorliegt.

## 7 Kennzahlen für die Produktion

### 7.1 Kostenrechnung

Nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip wird als Zielgröße für die Produktionsplanung und -steuerung die Reduzierung von Kosten herangezogen (s. Kapitel 3.3). Kosten sind definiert als „[...] der in Geldeinheiten bewertete Verzehr an Gütern (Materialverbrauch, Abschreibungen usw.) und Dienstleistungen (Löhne, Sozialkosten usw.) zur Erstellung und zum Absatz der betrieblichen Erzeugnisse bzw. von Produktionsfaktoren, Fremdleistungen sowie öffentlichen Abgaben, soweit sie zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft dienen“ (Warnecke et al., 1996, S. 24).

Zur Durchführung der Kostenrechnung existieren verschiedene Systeme, wobei diese nach Sachumfang und Zeitbezug unterschieden werden. Abbildung 27 gibt einen Überblick über die Gliederung der Kostenrechnungssysteme.

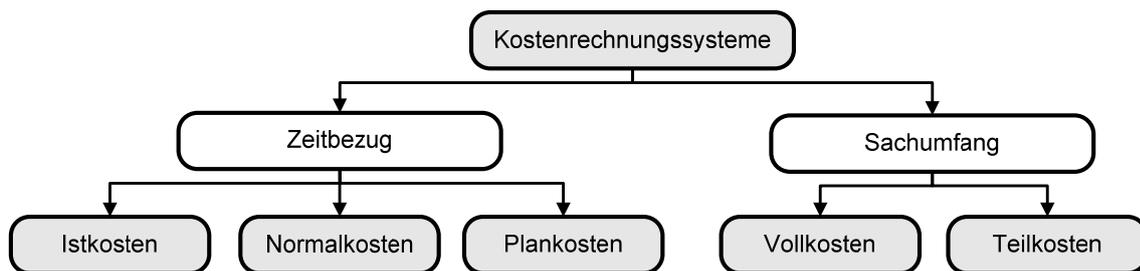


Abbildung 27: Gliederung der Kostenrechnungssysteme (angelehnt an Warnecke et al., 1996, S. 38)

Hummel und Männel definieren die Vollkosten- und Teilkostenrechnung wie folgt: „Für den erstgenannten Systemtyp und dessen verschiedene Ausprägungsformen ist kennzeichnend, daß jeweils sämtliche Kostenarten, die im Betrieb anfallen, auf die relevanten Kalkulationsobjekte weiterverrechnet, daß also für alle Kalkulationsobjekte stets die ‚vollen‘ Kosten bestimmt werden“ (Hummel, Männel, 1983, S. 19). „In den Systemen der Teilkostenrechnung werden den verschiedenen Kalkulationsobjekten [...] nur Teile der betrieblichen Gesamtkosten zugerechnet, und zwar [...] meist prinzipiell nur jene Kosten, die sich direkt für die betreffenden Kalkulationsobjekte erfassen lassen“ (Hummel, Männel, 1983, S. 19 f.).

Die Istkostenrechnung wird vergangenheitsbezogen am Ende einer Rechnungsperiode durchgeführt und erfasst die tatsächlich angefallenen Kosten über die angefallenen Verbrauchsmengen, multipliziert mit den jeweiligen Istpreisen (Zimmermann, 1996, S. 7). Die Normalkostenrechnung verwendet die durchschnittlichen Istkosten der Vergangenheit. Somit werden Unregelmäßigkeiten nicht berücksichtigt (Zimmermann, 1996, S. 8). Zur Ermittlung von wirklichen Plan- und Sollkosten wird die Plankostenrechnung verwendet. Dieses Verfahren basiert auf Planpreisen und Planverbrauchsmengen (Zimmermann, 1996, S. 8).

Neben den verschiedenen Systemen der Kostenrechnung findet ebenfalls eine Unterteilung in verschiedene Teilgebiete und somit auch in unterschiedliche Aufgaben statt. Die Teilgebiete sind (Warnecke et al., 1996, S. 39; Baier, 2002, S. 41 f.):

- Kostenartenrechnung

Welche Kosten sind angefallen?

Alle Kosten innerhalb eines Zeitraums werden erfasst und nach Kategorien (z. B. Materialkosten, Arbeitskosten, Betriebsmittelkosten) gegliedert.

- Kostenstellenrechnung

Wo sind die Kosten angefallen?

Die nicht direkt dem Erzeugnis (Kostenträger) zurechenbaren Kosten (Gemeinkosten) werden verursachungsgerecht den Kostenstellen zugeordnet. Eine Kostenstelle ist dabei ein nach bestimmten Kriterien festgelegter Bereich.

- Kostenträgerrechnung

Für welche Produktart sind die Kosten angefallen?

Es werden die entstandenen Kosten dem Produkt bzw. Projekt zugeordnet.

Für eine detaillierte und umfangreichere Darstellung der verschiedenen Systeme und Teilgebiete der Kostenrechnung sei beispielsweise auf Hummel, Männel (Hummel, Männel, 1983), Warnecke (Warnecke et al., 1996) und Zimmermann (Zimmermann, 1996) verwiesen.

Die Vorgehensweise der Kostenrechnung ist in Abbildung 28 dargestellt.

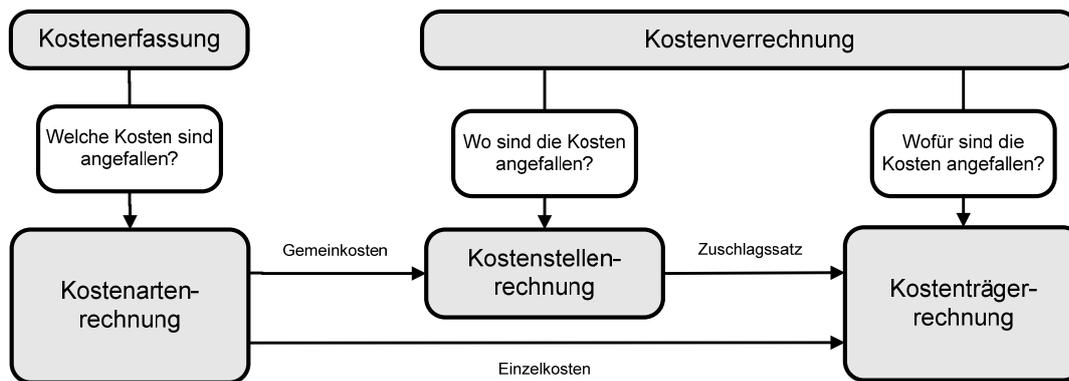


Abbildung 28: Vorgehensweise der Kostenrechnung (Baier, 2002, S. 42)

In den letzten Jahren haben sich die Kostenstrukturen in Unternehmen verändert. Direkte Kosten sind im Verhältnis zurückgegangen und Gemeinkosten haben deutlich zugenommen (Warnecke et al., 1996, S. 232). Hierdurch rückt die Aufgabe der Zuordnung der Gemeinkosten auf die Kostenträger zunehmend in den Vordergrund. Die Prozesskostenrechnung nach Horváth, die auf das in den achtziger Jahren in den USA entwickelte „Activity Based Costing“ aufbaut, hat sich für diese Aufgabe etabliert (Baier, 2002, S. 54). Die Prozesskostenrechnung sieht das Unternehmen als Summe von Aktivitäten und orientiert sich an der Ablauforganisation und nicht wie die traditionelle Kostenrechnung an der Aufbauorganisation (Nadig, 2000, S. 304). Die einem Prozess zuordenbaren Kosten (Prozesskosten) werden über einen ausgewählten Kostentreiber (Cost Driver) einem Produkt zugeordnet. Der Kostentreiber stellt dabei den Haupteinflussfaktor der Kostenentstehung des jeweiligen Prozesses dar. So können beispielsweise die Kosten für die Aktivität bzw. den Prozess „Maschinen rüsten“ über den Kostentreiber Rüstvorgänge oder Rüststunden verteilt werden. Die Auswahl des jeweiligen Kostentreibers ist dabei von entscheidender Bedeutung und ist individuell für jeden Prozess und jedes Unternehmen zu bestimmen (Horváth, 1996, S. 532 ff.).

## 7.2 Durchlaufzeit

Die Ersatzzielgröße Durchlaufzeit wird verwendet, um die Logistikleistung darzustellen. Es ist zu beachten, dass der Bearbeitungszeitanteil an der Durchlaufzeit in vielen Fällen nur 10 % beträgt. Die Liegezeiten verursachen den größten Anteil (Wiendahl, 2005, S. 262). Die Durchlaufzeit eines Auftrags setzt sich aus mehreren einzelnen Durchlaufelementen zusammen. Ein Durchlaufelement bei einer mehrstufigen Fertigung setzt sich aus einer nach der Bearbeitung an einer Arbeitsstation möglichen Liegezeit, dem daraufhin stattfindenden

Transport und bei einer vorhandenen Warteschlange vor der nächsten Arbeitsstation einer weiteren Liegezeit sowie dem vor der Bearbeitung möglichen Rüstvorgang und der eigentlichen Bearbeitung zusammen (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 21). In Abbildung 29 sind die Zusammenhänge noch einmal veranschaulicht.

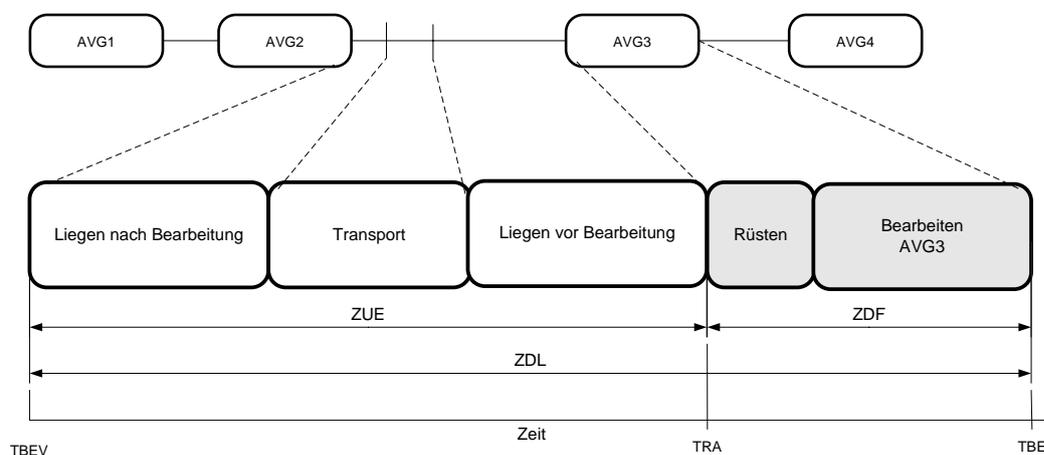


Abbildung 29: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 22)

„Demnach ist die Durchlaufzeit für einen Arbeitsvorgang als die Zeitspanne festgelegt, die ein Auftrag von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges bzw. vom Einstoßzeitpunkt des Auftrages (beim ersten Arbeitsvorgang) bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges selbst benötigt“ (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 21).

$$ZDL = TBE - TBEV$$

Formel 14: Durchlaufzeit (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 21)

Zur Ermittlung der Durchlaufzeit für einen gesamten Auftrag werden die Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge aufsummiert. Die mittlere ungewichtete Durchlaufzeit berechnet sich als Quotient der Summe der Einzeldurchlaufzeiten und der Anzahl der abgefertigten Aufträge bzw. Artikel (Wiendahl, 2005, S. 268 f.).

### 7.3 Bestand

Das Durchlaufdiagramm ermöglicht, das Systemverhalten zeitlich exakt zu beschreiben und die vorhandenen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen zu verdeutlichen

(Wiendahl, 2005, S. 267 f.). Abbildung 30 zeigt beispielhaft ein solches Durchlaufdiagramm. Es sind die Zu- und Abgänge sowie die mittlere Leistung und der Verlauf des Bestands dargestellt.

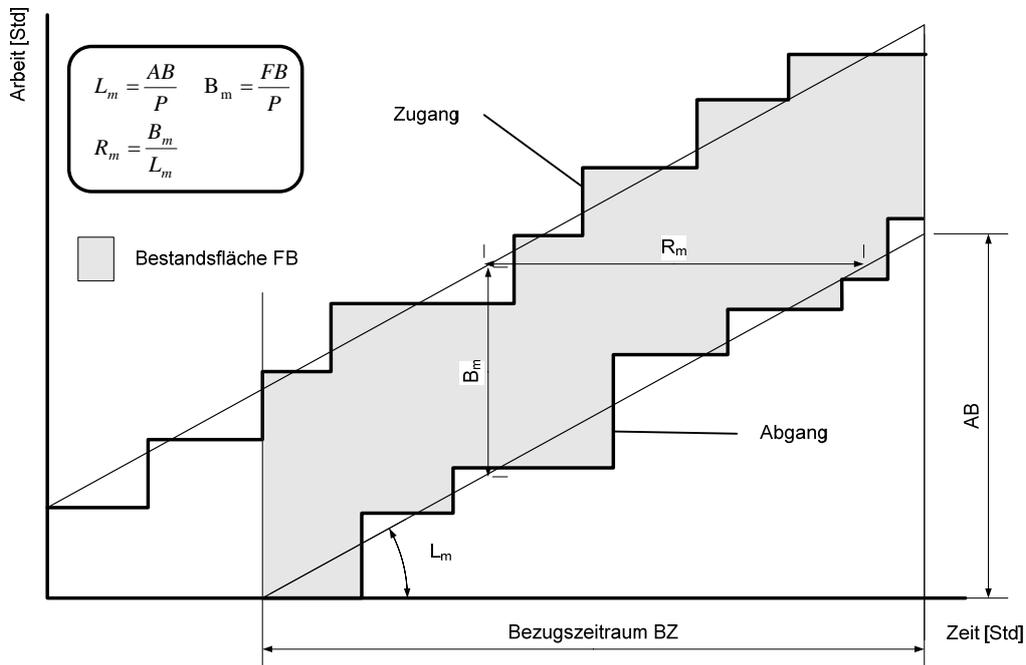


Abbildung 30: Bestand, Reichweite und Leistung im Durchlaufdiagramm (Wiendahl, 2005, S. 268)

Der Bestand ist demnach der vertikale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27). Allgemein kann der mittlere Bestand mit nachfolgender Formel berechnet werden:

$$B_m = \frac{\int_{t_0}^{t_1} ZU(t) dt - \int_{t_0}^{t_1} AB(t) dt}{t_1 - t_0}$$

Formel 15: Bestand (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27)

## 7.4 Auslastung

„Die Auslastung eines Systems wird definiert als das Verhältnis der mittleren Leistung und der möglichen Leistung“ (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27).

$$AU_m = \frac{L_m}{L_{\max}} \cdot 100$$

Formel 16: Auslastung (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27)

Die dabei verwendete mittlere Leistung wird wie folgt definiert:

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{BZ}$$

Formel 17: Mittlere Leistung (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 26)

In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass die maximal mögliche Leistung nicht der Arbeitszeit innerhalb eines Bezugszeitraums entspricht, sondern zudem durch beispielsweise durch Störungen und Wartungen reduziert wird (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 67).

## 7.5 Termintreue

Zur Beschreibung der Termintreue existieren verschiedene Ansätze, so definiert die VDI-Richtlinie „4400 – Logistikkennzahlen für die Produktion“ vier Kennzahlen (VDI 4400, 2000):

- Liefertreue,
- Liefertermintreue,
- Liefermengentreue,
- Mittlere Lieferterminabweichung.

Aus diesen Kennzahlen wird hier die Liefertermintreue näher betrachtet, da bei der Untersuchung von Verfahren der Produktionssteuerung die Einhaltung des Liefertermins im Vordergrund steht. Die Liefertermintreue ist definiert als der Prozentsatz der termingerecht gefertigten Produktionsaufträge im Verhältnis zur Anzahl der Produktionsaufträge (VDI 4400, 2000).

$$LTT = \frac{ATP}{AP} \cdot 100$$

Formel 18: Liefertermintreue (VDI 4400, 2000, S. 14)

## 8 Aufbau des Simulationssystems

### 8.1 Anforderungen

Die Hauptaufgabe, für die das Simulationssystem eingesetzt werden soll, ist die Untersuchung und Entwicklung von Algorithmen für eine energieeffiziente Produktionssteuerung. Die Bewertung der jeweiligen Algorithmen soll sowohl über den Energiebedarf als auch über die in der Produktion anfallenden Kosten und logistischen Zielgrößen erfolgen. Darüber hinaus soll das Instrument auch genutzt werden können, um eine genauere Dimensionierung der technischen Gebäudeausrüstung zu erzielen.

Aufbauend auf dem logistischen Zielsystem nach Wiendahl (Kapitel 3.3) soll die Produktion neben den dort genannten Ersatzzielgrößen auch nach den jeweilig anfallenden Herstellkosten beurteilt werden. Die durch die Produktionssteuerung beeinflussbaren Kosten sind (Kapitel 3.3):

- Einrichtungs- und Rüstkosten,
- Leer- und Stillstandskosten,
- Lagerhaltungskosten,
- Kosten durch Nichteinhaltung von Lieferterminen,
- Kosten durch die Vermeidung absehbarer Terminüberschreitungen.

Darüber hinaus sind bei der Erweiterung des Zielsystems um die Energieeffizienz auch die Energiekosten und der Energieverbrauch zu berücksichtigen. Bei den Energiekosten sind die Betriebskosten für Heizungs- und Klimatechnik, sowie der mengenabhängige Arbeitspreis für den Strombedarf von Maschinen und Anlagen unter Berücksichtigung eines stunden- und tagesabhängigen Strompreises enthalten. Weiterhin soll auch der spitzenlastabhängige Leistungspreis des Strombedarfs ermittelt werden können.

Das Simulationssystem soll demnach folgende Ergebnisse bereitstellen:

Logistikbezogene Ergebnisse:

- Auslastung aller Produktionsmaschinen (zudem Zeitanteil der technischen Störungen, der logistischen Störungen (Mangel, Stau) und dem Rüstaufwand)

- Minimaler, maximaler und mittlerer Bestand der Anlage
- Minimale, maximale und mittlere Durchlaufzeit der jeweiligen Artikel
- Prozentualer Anteil der zum Liefertermin verfügbaren Artikel (Liefertreue)

Kostenbezogene Ergebnisse:

- Kosten für den Energieverbrauch der Heizungs- und Klimatechnik
- Kosten für den mengenabhängigen Arbeitspreis für den Strombedarf der Produktionsmaschinen (unter Berücksichtigung von tages- und tageszeitabhängigen Strompreisen)
- Kosten für den spitzenlastabhängigen Leistungspreis des Strombedarfs der Produktionsmaschinen
- Einrichtungs- und Rüstkosten
- Lagerhaltungskosten
- Kosten für Nichteinhaltung von Lieferterminen
- Kosten durch die Vermeidung absehbarer Terminüberschreitungen

Energiebezogene Ergebnisse:

- Energieverbrauch der Heiztechnik
- Energieverbrauch der Klimatechnik
- Spitzenlast der Produktionsmaschinen
- Energieverbrauch der Produktionsmaschinen

Zur Realisierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen (Kapitel 2) ist es sinnvoll, folgende Parameter zur Bestimmung der Maschinenbelegung miteinzubeziehen:

- Aktuelle Hallentemperatur
- Aktuelle Lüftungsrate
- Aktuelle Schadstoffkonzentration (je Schadstoff)

Ausgehend von den Anforderungen an die während der Simulation erzeugten Kennzahlen bzw. Größen ergeben sich folgende Anforderungen an das Simulationssystem.

Zur Berechnung des Energieverbrauchs der Heizungs- und Klimatechnik muss ein thermisches Gebäudemodell wie in Kapitel 5 beschrieben erzeugt werden. Das thermische Gebäudemodell muss dabei die Heizungs- und Klimatechnik nachbilden, sowie eine von der Konzentration und dem jeweiligen Grenzwert abhängige Lüftung realisieren. Zudem müssen alle Wärmegewinne und Wärmeverluste berücksichtigt werden. Es werden daher zeitlich aufgelöste Stoff- und Energieströme der Produktionsmaschinen benötigt. Nur so sind die internen Wärmegewinne zu bestimmen und die jeweiligen Konzentrationsberechnungen innerhalb der Fabrikhalle durchzuführen. Hierfür muss entweder jeder Maschine ein von dem jeweiligen Produkt abhängiges Energie- und Stoffstromprofil hinterlegt werden oder das Simulationssystem muss das Profil auf Basis von Parametern berechnen. Diese für jeden Bearbeitungszeitraum vorliegenden Energie- und Stoffstromprofile führen verknüpft mit einer Materialflusssimulation zu einem zeitlich aufgelösten Stoff- und Energieflussprofil der gesamten Anlage. Die Materialflusssimulation legt dabei die Start- und Endzeitpunkte für jede Maschine sowie das produzierende Produkt fest und gibt diese an die Berechnung der Energie- und Stoffstromprofile weiter. Das daraus zusammengefügte Gesamtprofil ist Eingangsgröße der thermischen Gebäudesimulation. Die dabei berechneten Größen, wie beispielsweise Raumtemperatur, Energieverbrauch, Luftwechselrate müssen, um eine davon abhängige, dynamische (real-time) Produktionssteuerung zu realisieren, wieder an die Ebene der Materialflusssimulation zurückgegeben werden. Hierdurch ist eine Online-Kopplung der einzelnen Simulatoren nötig. In Abbildung 31 sind die Simulatoren und die Zusammenhänge noch einmal dargestellt.

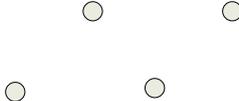
Simulator	Datenbasis	Ergebnis	
Gebäude- simulator	Gebäudegeometrie, Bauphysikalische Daten, Klimadaten		Heizenergiebedarf
Stoff- und Energiefluss	Energie-, Emissions- und Wärmeprofile		Gesamtenergieprofile (aggregiert)
			Energieprofile einzelner Maschinen
Materialfluss- simulator	Bearbeitungszeiten, Aufträge, Störungen		Start- und Endzeitpunkte

Abbildung 31: Aufbau und Ebenen des Simulationssystems

Im Folgenden werden die Anforderungen an jeden einzelnen Simulator beschrieben, sowie deren Realisierung dargestellt. Zudem wird die Kopplung der Simulatoren näher erläutert.

## 8.2 Materialflusssimulation

Zur Abbildung der Materialflüsse in der Produktionsanlage soll, wie allgemein üblich, ein ereignisdiskreter, bausteinorientierter Simulator eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Gesamtsystem werden folgende besondere Ansprüche an die Materialflusssimulation gestellt:

- Die Bereitstellung der Kennzahlen sowie die Weitergabe der Start- und Endzeitpunkte für die Materialflusssimulation erfordert eine detaillierte Abbildung der einzelnen Maschinen und Anlagen. Der Abstraktionsgrad ist in diesem Fall sehr gering.
- Die Online-Kopplung mit den anderen Simulationssystemen erfordert entweder eine vorhandene Schnittstelle oder die Möglichkeit der Programmierung mithilfe einer üblichen Programmiersprache (z. B. C++, Java).

Diese Ansprüche können aktuell von verschiedenen kommerziell verfügbaren Simulationssystemen, wie z. B. Plant Simulation (UGS, 2007), Quest (Delmia, 2007), Enterprise Dynamics

(Incontrol, 2007), erfüllt werden. Zudem erfüllt auch der an der Universität Kassel entwickelte Simulator SIMFLEX/3D diese Anforderungen. Da das grundsätzliche Konzept simulatorunabhängig entwickelt werden soll, ist die Auswahl des Simulationssystems nicht von besonderer Bedeutung. Aufgrund der Tatsache, dass das Simulationssystem SIMFLEX/3D leicht verfügbar ist und zudem auch der Quellcode zur Verfügung steht, wird für die prototypische Entwicklung SIMFLEX/3D ausgewählt und im Folgenden vorgestellt.

Der Simulator SIMFLEX und sein Konzept wurden erstmals 1977 auf der GI-Tagung in München vorgestellt. Er war schon zu diesem Zeitpunkt ein prozessorientierter, grafisch-interaktiver Simulator, bei dem auf Basis eines Bausteinkastens modelliert wurde. Jeder Baustein beinhaltete die grafische Erscheinung sowie alle technischen und strategischen Parameter (Reinhardt, 1977).

In dieser Arbeit wird SIMFLEX in der Version SIMFLEX/3D verwendet, welche in der objektorientierten Programmiersprache C++ implementiert ist. Zudem besitzt er eine 3-dimensionale Darstellung und Animation des Modells mit OpenGL. Das grundlegende Konzept basiert weiterhin auf der ereignisdiskreten, bausteinorientierten Simulation (Schneider, 2001, S. 95 f.).

Das Simulationssystem besteht aus drei Softwarewerkzeugen, dem Grafischen-Statistischen-Logistischen System (GSL), dem Grafischen Topologieentwurfssystem (GTS) und dem Grafischen Bausteinerstellungssystem (GBS). Mit dem GBS können neue Bausteine für die Bausteinbibliothek entworfen werden, welche von dem GTS dazu genutzt werden, das jeweilige Materialflusssystem zu modellieren. Die Experimente werden daraufhin mit dem GSL durchgeführt. Während des Modellexperiments ist es dem Benutzer möglich, den Modellzustand bzw. Bausteinzustand zu beobachten. Die Betrachtungsweise ist dabei prozessorientiert.

Die Ereignisabarbeitung erfolgt bei SIMFLEX/3D über einen Ereigniskalender in Form einer geordneten Liste mit Ereignisnotizen und Kalenderoperationen zum Einplanen und Fortschalten von Ereignissen. Eine der Ereignisnotiz zugeordnete Ereignisprozedur führt zu Veränderungen des Modellzustands und plant Folgeereignisse ein. Jeder Zustand ist dabei von einem Anfangs- und einem Ende-Ereignis begrenzt.

### 8.3 Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen

Bei der Stoff- und Energieflusssimulation müssen nachfolgende Parameter je Maschine und Produkt dargestellt werden.

- Elektrische Leistungsaufnahme
- Wärmeabgabe (Strahlung, Konvektion)
- Emissionen (je Substanz)

Diese Parameter sind abhängig vom jeweiligen Produkt in Kombination mit der jeweiligen Maschine anzugeben. Neben der Gesamtmenge je Bearbeitungsschritt ist auch der zeitliche Verlauf von Interesse und besonders zur Berechnung von Spitzenwerten bei der Leistungsaufnahme unerlässlich.

Die in Kapitel 6.2 dargestellten Unterschiede bei den massebezogenen Kenngrößen verdeutlichen, dass eine Verwendung dieser Daten im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Die daraufhin vorgestellte Berechnungsmethodik nach Lampl (Lampl, 1994) basiert auf vielen Parametern, die nicht an der Maschine eingestellt (z. B. Drücke in den Hydraulikzylindern, Reibarbeit), sondern nur während des Betriebs gemessen werden können. Darüber hinaus kann nur bedingt über die Aufteilung in die einzelnen Phasen eine zeitliche Auflösung angegeben werden. Die Berechnungsmethodik eignet sich daher ebenfalls nicht zur Vorherberechnung des Energieverbrauchs.

Aktuell wird daher an der Universität Kassel an einem Modell gearbeitet, welches aufbauend auf physikalischen Zusammenhängen und empirischen Messungen einen Leistungsverlauf berechnet. Das Modell (Abbildung 32) benötigt als Eingangsgrößen Informationen über das Produkt (z. B. Volumen, Fläche, Werkstoff), die Maschine (z. B. Antriebsart, Größe), die Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur) und die eingestellten Steuerungsparameter (z. B. Staudruck, Fahrgeschwindigkeiten, Nachdrückzeiten).

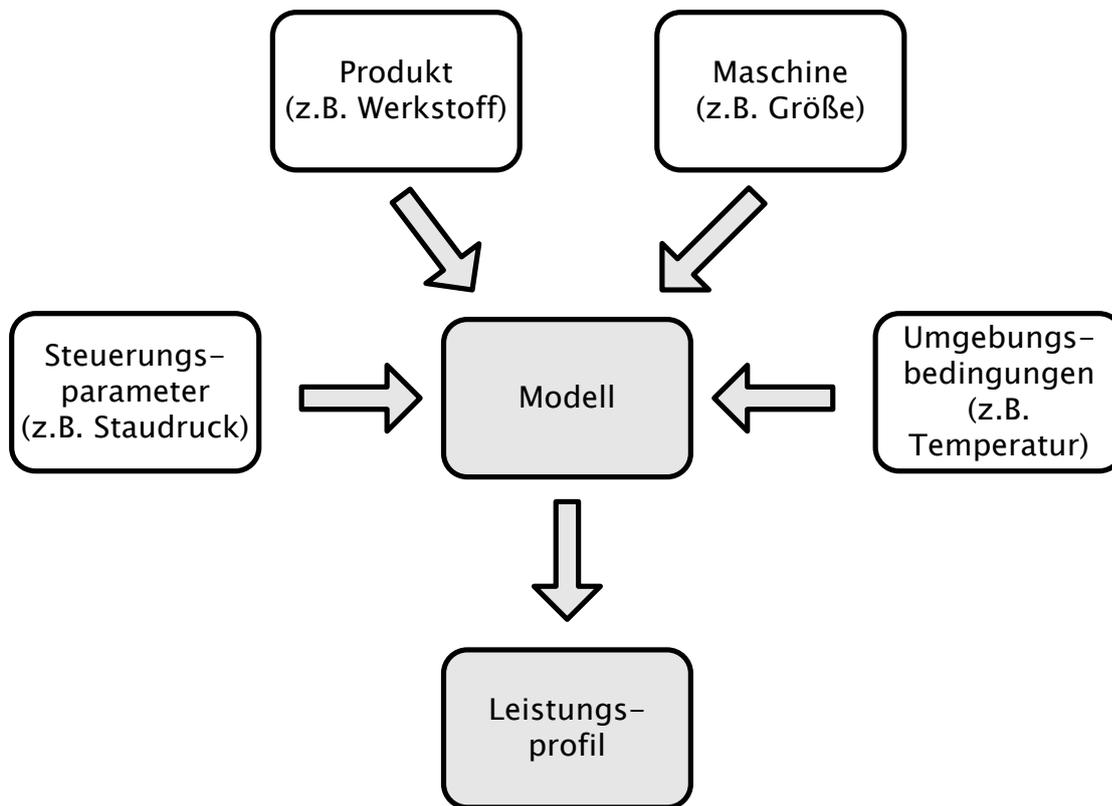


Abbildung 32: Modell zur Berechnung des Leistungsprofils

Diese Arbeiten sind allerdings noch nicht abgeschlossen und berücksichtigen zudem nicht die Wärmeabgabe und die Emissionen. Es wird daher in dieser Arbeit auf Messwerte, die im Rahmen von Industrieprojekten ermittelt worden sind, zurückgegriffen.

Ausgehend von der realen Energieverbrauchskurve findet eine Approximation und Zerlegung in stückweise lineare Funktionen statt. Ebenso werden für die Wärmestrahlung und Konvektion sowie die Emissionen linearisierte Darstellungen auf Basis von Literatur- bzw. Messwerten durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um den Rechenaufwand und die Datenmenge bei der Simulation zu reduzieren. Der Integralwert sowie die Spitzenwerte sollen dabei den realen Werten entsprechen. In Abbildung 33 ist beispielhaft eine solche Linearisierung dargestellt.

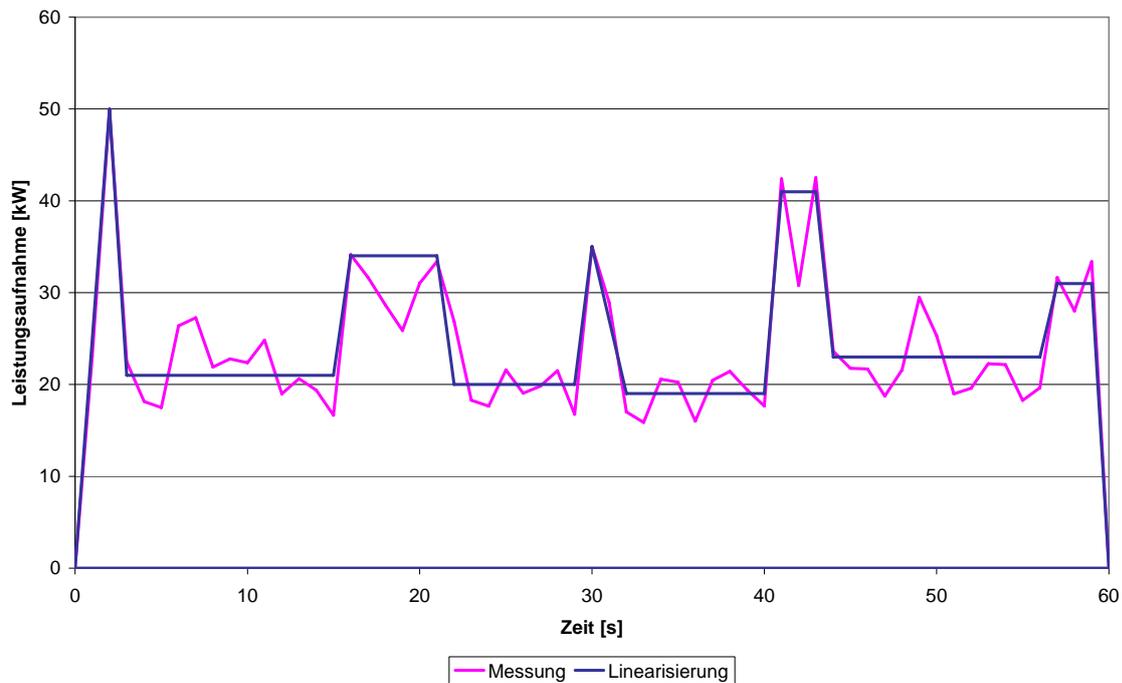


Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der Linearisierung der Leistungsaufnahme

Als Eingangsdaten werden demnach stückweise lineare Funktionen verwendet, die abhängig von Produkt und Maschine die Verlaufskurven für Leistungsaufnahme, Strahlung, Konvektion und die jeweiligen Emissionen angeben. In Verbindung mit den Bearbeitungsstart- und -endzeitpunkten werden die jeweiligen Gesamtverläufe berechnet und an die thermische Gebäudesimulation weitergegeben.

Jedes Startereignis führt zu einer Speicherung dieses Zeitpunktes. Erst bei dem zugehörigen Endereignis findet eine Berechnung der Verlaufs- und Integralwerte statt. Die Verlaufswerte werden jeweils an den Start- und Endzeitpunkten aller linearen Teilfunktionen berechnet. Die Zwischenräume werden linear interpoliert, was zu keinen Abweichungen führt, da die Teilfunktionen ebenfalls linear sind. Die berechneten Integralwerte werden in den vorgegebenen Zeitschritten an die thermische Gebäudesimulation weitergeleitet. Hierbei müssen für alle zu diesem Zeitpunkt aktiven Maschinen auch die Teilintegrale berechnet werden.

## 8.4 Thermische Gebäudesimulation

Bei der thermischen Gebäudesimulation wird auf eine dynamische Simulation zurückgegriffen. Ausgehend von den inneren Wärmelasten sowie den Emissionen aus der Stoff- und Energieflusssimulation soll die benötigte Heiz- bzw. Kühlenergie berechnet werden. Das Lüf-

tungssystem soll dabei so gesteuert werden, dass keine Überschreitung der vorgegebenen maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) erfolgt. Folgende Anforderungen ergeben sich:

- Eine bibliotheksbasierte Modellierung der Gebäudegeometrie und der bauphysikalischen Daten sollte möglich sein, da hierdurch der Modellierungsaufwand reduziert wird.
- Die Online-Kopplung mit den anderen Simulationssystemen erfordert entweder eine vorhandene Schnittstelle oder die Möglichkeit der Programmierung mithilfe einer üblichen Programmiersprache (z. B. C++, Java).
- Die Verwendung unterschiedlicher Klimadatensätze zur Untersuchung verschiedener Standorte sollte einfach durchzuführen sein.
- Um das System auch für eine Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung zu verwenden, sollte eine detaillierte Abbildung der technischen Gebäudeausrüstung möglich sein.

Da auch hier eine von dem Simulator unabhängige Entwicklung erfolgen soll, ist die Auswahl des Simulators nicht entscheidend. Aufgrund der großen Verbreitung und der Zusammenarbeit zwischen der Universität Kassel und der Transsolar GmbH wird das Softwaresystem TRNSYS für die prototypische Umsetzung gewählt, welches im Folgenden näher dargestellt wird.

TRNSYS wurde ursprünglich an der Universität von Wisconsin und der Universität von Colorado entwickelt und ist seit 1975 kommerziell verfügbar. Mittlerweile liegt TRNSYS in der Version TRNSYS 16 vor und wird von einer Gruppe von Institutionen und Unternehmen weiterentwickelt (TRNSYS, 2006).

TRNSYS ist ein modular aufgebauter Simulator, welcher eine Bibliothek mit verschiedenen energietechnischen Komponenten enthält. TRNSYS ist in der Programmiersprache FORTRAN geschrieben und liegt zu großen Teilen auch als Quellcode vor (Gummerer et al., 2000b, S. 50). Darüber hinaus besteht seit Version 15 auch die Möglichkeit, eigene Komponenten in unterschiedlichen Programmiersprachen (z. B. C++) zu entwickeln (Transsolar, 2004). Hierdurch ist es ebenfalls möglich, die notwendige Kopplung zu realisieren.

TRNSYS besteht aus verschiedenen Programmmodulen (Transsolar, 2004):

- TRNSYS Studio – Benutzerinterface zum Aufbau des Simulationsmodells

- TRNEXE – Simulator zur Durchführung der eigentlichen Simulation
- TRNBUILD – Grafisches Benutzerinterface zur Modellierung des Gebäudes
- TRNEDIT – Editor zur Bearbeitung der TRNSYS spezifischen Dateien

Grundsätzlich besteht ein TRNSYS Modell aus einzelnen Komponenten (TYPE), die über Parameter, Eingänge und Ausgänge beschrieben werden. Während über die Parameter die Komponente spezifiziert wird, stellen die Ein- und Ausgänge die Verbindung zu anderen Komponenten dar. Ein- und Ausgänge können beispielsweise Massenströme oder Temperaturen sein (Transsolar, 2004).

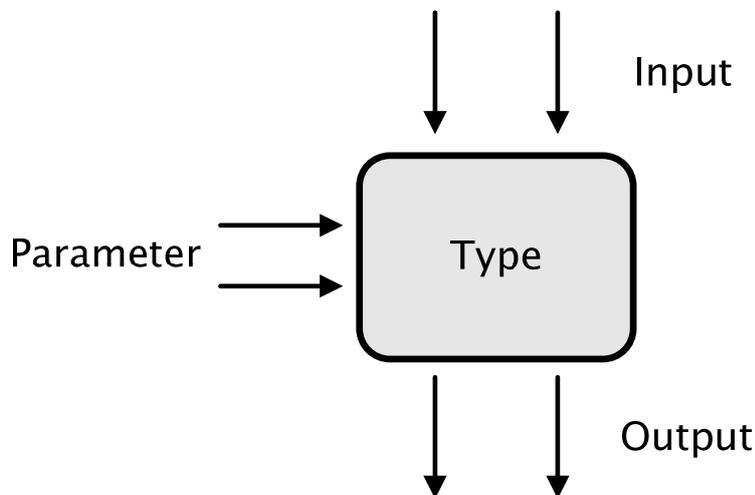


Abbildung 34: Komponente in TRNSYS

Unter anderem existieren nachfolgende Komponenten (Transsolar, 2004):

- Wetterdatenleser
- Mehrzonen-Gebäudemodell
- Strahlungsumrechner
- Feuchteumrechner
- Drucker

Der TYPE 56 von TRNSYS dient der thermischen Berechnung von mehreren miteinander energetisch gekoppelten Räumen (Zonen). Der Baustein basiert auf der Bilanzierung der Energieströme in den thermischen Zonen des Gebäudes. Das hierfür angewendete mathematische Modell ist im Handbuch von TRNSYS (Transsolar, 2004) sowie bei Felsmann (Felsmann,

2001, S. 2 ff.), Merz (Merz, 2002, S. 47 ff.) und Perschk (Perschk, 1999, S. 5 ff.) näher erläutert.

## **8.5 Kopplung Materialflusssimulation – Stoff- und Energiefluss von Maschinen – Gebäudesimulation**

Zur Realisierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung unter Berücksichtigung der aktuellen Außen- bzw. Hallentemperatur, der Lüftungsrate und der jeweiligen Schadstoffkonzentration müssen diese Daten zu jedem Zeitpunkt dem Produktionsplanungs- und -steuerungssystem vorliegen. Dies ist nur über eine Online-Kopplung der einzelnen Simulationssysteme möglich. Zu beachten ist hierbei, dass eine ereignisdiskrete Simulation mit einer kontinuierlichen Simulation gekoppelt werden muss.

Die Kopplung der Simulationssysteme muss im Allgemeinen eine technische bzw. syntaktische, eine semantische und eine pragmatische Integration unterstützen. Unter der technischen Integration werden vor allem die Zeitsynchronisation und die Datenformate verstanden. Die semantische Kopplung umfasst die Bedeutung der Daten eines Modells im Kontext des jeweiligen anderen Modells. Die Ebene der pragmatischen Kopplung setzt die Daten und Modelle in Verbindung mit der eigentlichen Planungsaufgabe (Wenzel et al., 2003, S. 4 f.; Wenzel et al., 2005).

Grundsätzlich existieren verschiedene Verfahren zur Verteilung von Softwareanwendungen, welche auch für die Kopplung von Simulationssystemen geeignet sind:

- High Level Architecture (HLA)

HLA wurde vom amerikanischen Department of Defense für die Kopplung von militärischen Simulatoren entwickelt (DOD, 2006). Bei HLA erfolgt die verteilte Simulation über die sogenannte Runtime Infrastructure (RTI). Jeder Prozess muss bei der RTI angemeldet werden und die Kommunikation zwischen den Prozessen erfolgt dann über diese RTI. Die Vorteile von HLA bestehen in der einfachen Wiederverwendbarkeit von Komponenten und der Interoperabilität. Nachteilig ist aber die längere Simulationszeit, da die gesamte Kommunikation über die RTI erfolgt (Koegst et al., 2000, S. 6). Die weite Verbreitung von HLA hat auch dazu geführt, dass bereits Realisierungen im Bereich der Fertigungssimula-

tion erfolgt sind (Baier, 2002; Schumann, Blümel, 1998; Straßburger, 2003; Verzano, Reinhardt, 2003).

- Common Object Request Broker Architecture (CORBA)

Die CORBA Technologie ist eine der am häufigsten verwendeten Architekturen für verteilte Anwendungen. Sie ist eine von der Object Management Group (OMG) entwickelte, objektorientierte Middleware, die plattformübergreifende Protokolle und Dienste spezifiziert (OMG, 2004). Auch mit dieser Architektur hat es bereits Realisierungen im Bereich der Simulationstechnik gegeben (Adamski, Hiller, 1998).

Neben den genannten Technologien sind auch verschiedene anwendungsspezifische Verfahren zur Verteilung bzw. Kopplung von Simulationssystemen entwickelt worden. Es handelt sich hierbei um Spezialanwendungen, die keinen umfassenden und standardisierten Ansatz beinhalten (Pensky, 2004, S. 6 ff.).

Die hier vorgesehene prototypische Realisierung der Kopplung legt ihren Fokus auf die technische bzw. syntaktische Integration. Es wird von einer direkten Kopplung der vorgesehenen Simulationssysteme ausgegangen, wodurch im ersten Schritt die semantische und pragmatische Ebene durch die spezifische Anpassung realisiert wird. Bei der technischen Realisierung besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die oben genannten standardisierten Verfahren HLA oder CORBA zu verwenden. Weiterhin kann eine anwendungsspezifische Implementierung auf Basis des Netzwerkprotokolls TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) erfolgen.

Bei dem zu entwickelnden Simulationssystem ist für die Kopplung kein Zeitmechanismus zur Synchronisation notwendig. Bei der Kopplung der Logistiksimulation mit der Stoff- und Energieflusssimulation erfolgt eine direkte Weiterleitung der Ereignisse. Es besteht bei dieser Kopplung grundsätzlich die Möglichkeit, dass die Berechnung parallel verläuft, der Rechenaufwand der Stoff- und Energieflusssimulation ist aber verhältnismäßig gering, wodurch hier eine blockierende bzw. wartende Kopplung erfolgen kann. Die Stoff- und Energieflusssimulation besitzt hier keinen eigenen Zeitmechanismus, sondern wird von der Logistiksimulation gesteuert. Die Kopplung zu der thermischen Gebäudesimulation erfolgt zu bestimmten Zeitschritten und die benötigte Rechenzeit ist als gering zu betrachten. In diesem Fall kann e-

benfalls auf einen Zeitmechanismus verzichtet und eine blockierende Kopplung verwendet werden.

Aufbauend auf dem Ansatz, dass kein Zeitmechanismus zur Kopplung benötigt wird, erscheint es wenig sinnvoll, HLA zu verwenden, da dieses Verfahren sich besonders durch seine Zeitsynchronisation auszeichnet und einen zu großen Aufwand in der Implementierung darstellt. Auch die Verwendung von CORBA führt zu einem zu großen Überbau in Form von Steuerungsebenen für die Kopplung. Aus diesem Grund ist die prototypische Kopplung durch eine anwendungsspezifische Neuentwicklung auf Basis von TCP/IP realisiert worden. Abbildung 35 veranschaulicht das Verfahren.

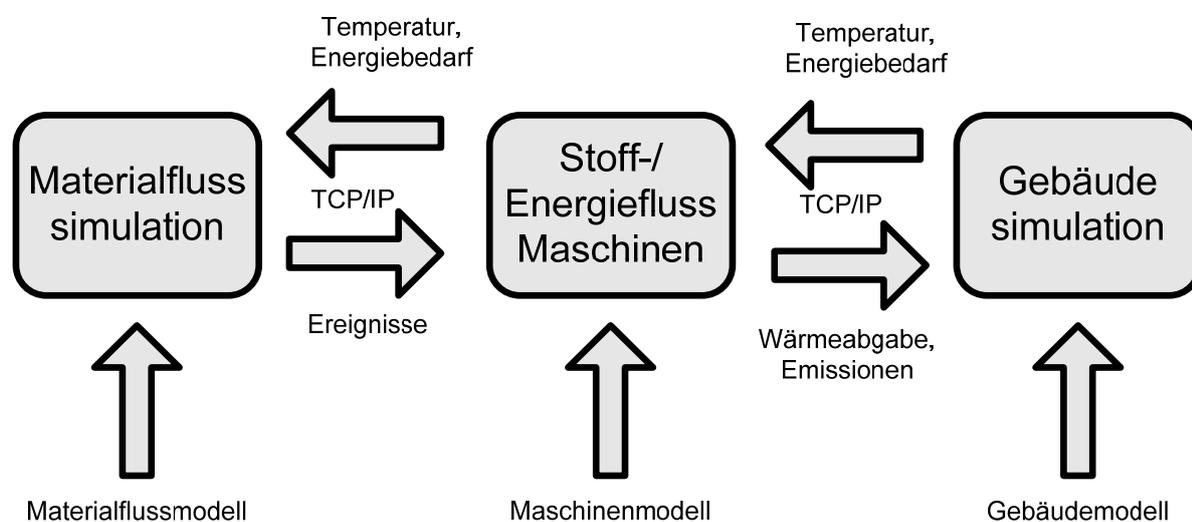


Abbildung 35: Kopplung der Simulationsebenen (Hesselbach, Junge, 2005a, S. 43)

Für die Kopplung an die thermische Gebäudesimulation wurde in TRNSYS eine eigene Komponente entwickelt, welche die Kopplung realisiert. Nach der Initialisierung durchläuft das TRNSYS Modell diese Komponente und wartet auf die vorgeschaltete Stoff- und Energieflusssimulation. Nach Übermittlung der Wärmeabgabe (Strahlung, Konvektion) und der entstandenen Emissionen findet rückwirkend die Simulation des in der Logistiksimulation bereits vergangenen Zeitraumes statt. Die vorgeschalteten Simulatoren warten während der Berechnung. Ist die Simulation für den aktuellen Zeitschritt erfolgt, werden die Ergebnisse an die anderen Simulationssysteme weitergegeben und TRNSYS geht wieder in einen Wartemodus. Nachfolgend ist das zeitliche Verhalten des gesamten Simulationssystems noch einmal dargestellt.

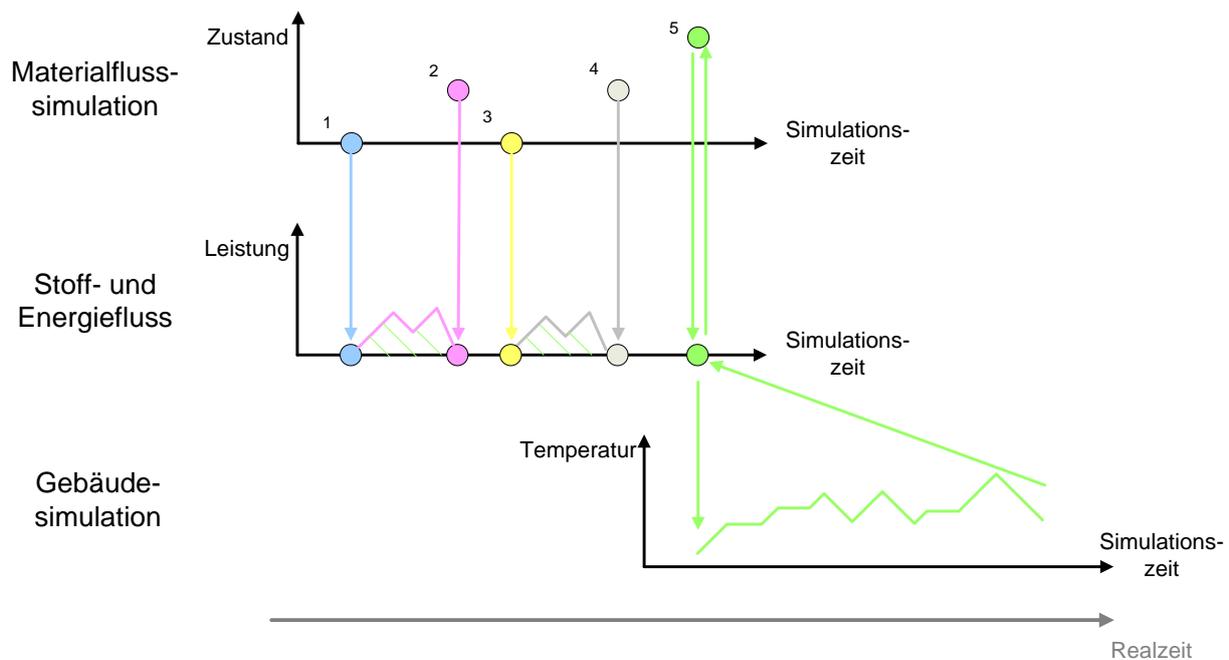


Abbildung 36: Ablaufverhalten des Simulationssystems

In Abbildung 36 sind die drei Simulationsebenen aufgeführt, indem jeweils auf einem Zeitstrahl das Verhalten über die Simulationszeit dargestellt ist. Zudem ist der zeitliche Ablauf in der realen Zeit über verschiedene Farben visualisiert. Im ersten Schritt (1) findet ein ANFANG-ARBEITEN Ereignis in der Materialflusssimulation statt. Dieses wird an das Modul Stoff- und Energiefluss weitergeleitet, das nur den Zeitpunkt speichert. Daraufhin (2) tritt ein ENDE-ARBEITEN Ereignis auf, welches auf der Ebene des Stoff- und Energiefluss' rückwirkend zur Berechnung der Leistung führt. Dieser Prozess wiederholt sich ein weiteres Mal (3 und 4). Im nächsten Schritt (5) erfolgt ein TRNSYS-Zeitschritt Ereignis. Dies führt zur Berechnung der Integrale der Wärmemengen und Emissionen, die an TRNSYS weitergeleitet werden und dort beginnt die Simulation des Temperaturverhaltens für den vergangenen Zeitraum.

Mit dem dargestellten Simulationssystem können die Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung durchgeführt werden.

## 8.6 Test der Kopplung

Zur Sicherstellung der Funktionsweise des Simulationssystems ist ein Test der Software notwendig. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Komponenten (Simulatoren) getestet und fehlerfrei sind. Es ist demnach die Kopplung bzw. die Integration der einzelnen Komponenten zu testen. Beim Einsatz des Simulationssystems müssen dann die mit den Si-

Komponenten zu testen. Beim Einsatz des Simulationssystems müssen dann die mit den Simulatoren erstellten Modelle, sowie das gekoppelte Gesamtmodell verifiziert und validiert werden. Die Verifikation und Validierung des verwendeten Beispiels wird in Kapitel 10.3 erläutert.

Bei dem Test des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten sind vor allem die Schnittstellen der einzelnen Komponenten und die Parameterübergabe zu testen. Folgende Fehler können beispielsweise auftreten:

- Die Übergabe der Daten findet nicht statt.
- Die übergebenen Daten sind syntaktisch falsch.
- Die übergebenen Daten werden verschieden interpretiert.
- Die übergebenen Daten liegen zum falschen Zeitpunkt vor.

Bei einem Test müssen daher die Daten während des Einsatzes der Software beobachtet werden.

Das entwickelte Simulationssystem wurde für das Testen der Schnittstellen schrittweise zusammengesetzt. Es wurde demnach im ersten Schritt die Übertragung der Daten zwischen Materialflusssimulation und der Komponente für den Stoff- und Energiefluss der Maschinen betrachtet. Zur Sicherstellung, dass die Daten übergeben werden und die Übergabe korrekt ist, wurden die zu übertragenden Daten in der Materialflusssimulation und die empfangenen Daten bei dem Stoff- und Energieflussmodul in Dateien geschrieben und miteinander verglichen. Der Vergleich zeigte keine Unterschiede. Um die Interpretation der Daten und die zeitliche Synchronisation sicherzustellen, sind Debug-Methoden und Ausschriebe verwendet worden. Darüberhinaus wurde mit einer Testkomponente der gesamte Bereich der möglichen zu übertragenden Daten an die empfangende Komponente gesendet und die Abarbeitung bzw. Interpretation ebenfalls mit Debug-Methoden und Ausschrieben gepüft. Ebenso wurde mit der Kopplung zwischen Stoff- und Energiefluss der Maschinen und der thermischen Gebäudesimulation verfahren.

# 9 Entwicklung von energieeffizienten Produktionssteuerungskonzepten

## 9.1 Grundlegende Ansätze

Die Entwicklung und Optimierung der Konzepte der Produktionssteuerung findet in dieser Arbeit am Beispiel des Kunststoffspritzgusses statt. Die Herstellung von Kunststoffspritzgussteilen ist ein einstufiger Prozess mit parallelen Maschinen, der zudem in der Regel durch die im nachfolgenden morphologischen Kasten (Abbildung 37) dargestellten Eigenschaften (grau hinterlegt) charakterisiert ist.

Merkmale der Auftragsabwicklung		Merkmalsausprägung der Auftragsabwicklung			
1	Art der Auftragsauslösung	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen	Kundenanonyme Vorproduktion/ kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager
2	Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten
3	Erzeugnisstruktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	Geringteilige Erzeugnisse	
4	Ermittlung Erzeugnis-/Komponentenbedarf	Deterministisch auf Erzeugnisebene	Teilweise deterministisch/ teilweise heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Erzeugnisebene
5	Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert	Teilweise auftragsorientiert/ teilweise periodenorientiert	periodenorientiert	
6	Beschaffungsart	Weitestgehend Fremdbezug	Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend	
7	Bevorratung	Kaum Bevorratung von Bedarfpositionen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen
8	Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
9	Organisationsform	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Gruppen-/Linienfertigung	Fließfertigung
10	Fertigungsstruktur	Fertigung mit geringer Tiefe	Fertigung mit mittlerer Tiefe	Fertigung mit großer Tiefe	
11	Kundenänderungseinflüsse	Viele Änderungseinflüsse	Gelegentliche Änderungseinflüsse	Wenige Änderungseinflüsse	

Abbildung 37: Kunststoffspritzgussbetrieb im morphologischen Kasten (vgl. Kapitel 3.2)

Diese Ausprägungen haben Einfluss auf die Anzahl der möglichen Permutationen und beeinflussen die möglichen Konzepte zur Produktionssteuerung.

Für eine energieeffiziente Produktionssteuerung stehen folgende Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegungsplanung zur Verfügung:

- Zuordnung Auftrag zu Maschine,
- Reihenfolge der Aufträge auf der Maschine,
- Variation der Losgröße,
- Terminierung (Vorwärts/Rückwärts).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine statische oder dynamische (Real-Time-Scheduling) Planung durchzuführen. Besonders bei der dynamischen Planung ergeben sich aufgrund bestimmter Rahmenbedingungen noch die Möglichkeiten, Lose abzubrechen bzw. zu unterbrechen oder in die Prozesse durch Parametervariation einzugreifen, um somit Taktzeiten oder Stoff- und Energieflüsse (z. B. Leistungsaufnahme) zu verändern. Die angesprochene Art der zusätzlichen Eingriffe wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

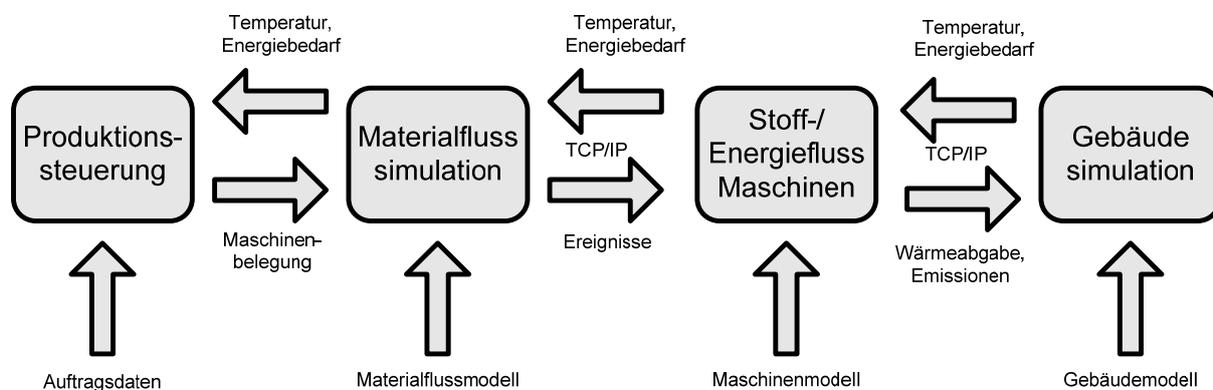


Abbildung 38: Simulationssystem mit Produktionssteuerungskomponente

Die Produktionssteuerung ist ein eigenes Modul in Form einer DLL (Abbildung 38). Bei Simulationsstart erzeugt das Produktionssteuerungsmodul, ausgehend von den Auftragsdaten und den für die Verfahren benötigten Parametern, eine Zuordnung zu den Maschinen und eine Reihenfolge der Aufträge innerhalb der Maschinen. Zudem ist es möglich die Auftragsauswahl zur Laufzeit durchzuführen. In diesem Fall legt das Produktionssteuerungsmodul nach Beendigung eines Auftrags den nächsten Auftrag auf Basis der aktuellen Situation fest.

Im Folgenden werden drei Ansätze für eine energieeffiziente Produktionssteuerung vorgestellt. Bei der Beschreibung wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Außentemperatur niedriger als die vorgegebene Hallentemperatur ist (Heizfall). Bei einer im Vergleich zur Hallentemperatur höheren Außentemperatur (Kühlfall) können die Ansätze umgekehrt werden.

## 9.2 Ansatz Temperaturtrend

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass emissionsreiche Produkte möglichst zu dem Zeitpunkt gefertigt werden, bei dem die Außentemperatur hoch ist. Grundsätzlich ist es nicht möglich, vorauszusagen, wann welche Außentemperatur zu erwarten ist. Allerdings sind einfache Temperaturtrends, wie etwa steigend oder fallend, für einen Planungszeitraum von etwa einer Woche anzugeben. Diese Annahme kann dazu genutzt werden, dass bei einem fallenden Temperaturtrend die Einplanung der Produkte nach dem Emissionsfaktor, mit dem höchsten Wert zuerst, erfolgt. Der Emissionsfaktor ist in diesem Zusammenhang nicht die absolute Emissionsmenge, sondern das Verhältnis aus Emissionsmenge und maximaler Arbeitsplatzkonzentration für den jeweiligen Schadstoff. Im Gegenzug erfolgt bei einem steigenden Temperaturtrend die Reihenfolge der Einplanung beginnend mit dem niedrigsten Emissionsfaktor. Zusätzlich wird bei einem steigenden Temperaturtrend eine Rückwärtsterminierung durchgeführt, um möglichst in Zeiträumen mit hohen Außentemperaturen zu produzieren. Bei fallendem Temperaturtrend erfolgt dagegen eine Vorwärtsterminierung. Das Verfahren wird nachfolgend an einem Beispiel (Abbildung 39) noch einmal näher betrachtet.

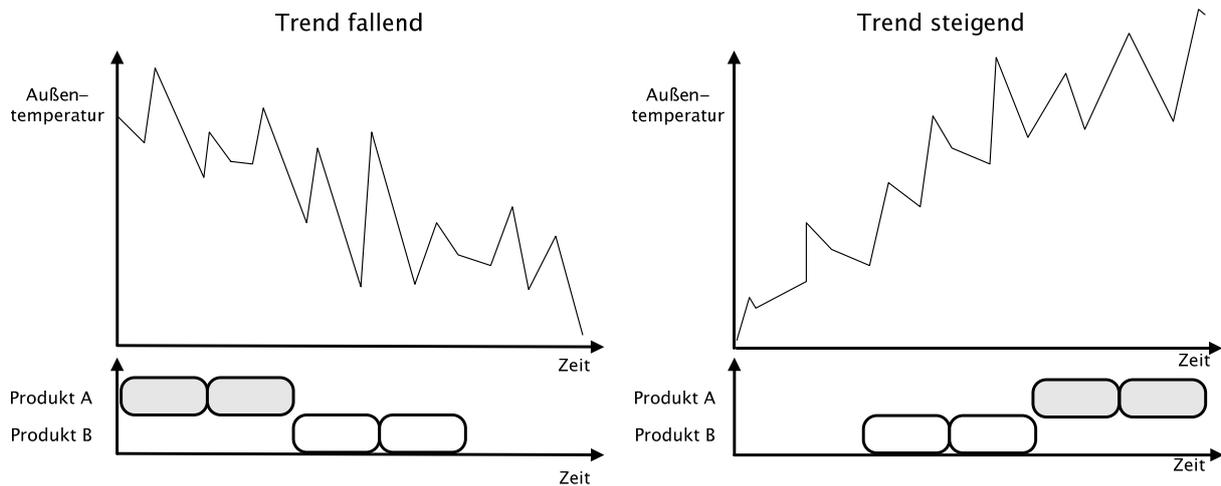


Abbildung 39: Beispieldarstellung des Ansatzes Temperaturtrend

In dem dargestellten Beispiel symbolisieren die grau dargestellten Kästen Aufträge mit emissionsreichen Produkten, die weißen Kästen dagegen Aufträge mit emissionsarmen Produkten. Die Länge der Kästen entspricht der Bearbeitungsdauer.

### 9.3 Ansatz Unterscheidung Tag / Nacht

Unter der Annahme, dass in der Nacht geringere Temperaturen als am Tag zu erwarten sind, kann eine Planung erfolgen, die am Tag verstärkt emissionsreiche Produkte einplant. Im ersten Schritt gilt es hierbei allerdings zu entscheiden, welche Produkte als emissionsreich bzw. emissionsarm eingestuft werden sollen. Eine einfache Möglichkeit hierfür ist die Berechnung des mittleren Emissionsfaktors aller zu fertigenden Produkte für den vorgesehenen Planungszeitraum. Nach Aufteilung der Produkte in die Kategorien emissionsreich und emissionsarm muss daraufhin die Festlegung des Zeitfensters, das Tag bzw. Nacht, repräsentiert erfolgen. Die Berechnung erfolgt über die Bearbeitungsdauer aller emissionsreichen Produkte dividiert durch die im Planungszeitraum vorhandenen Arbeitstage. Dieses Zeitfenster wird daraufhin um den Zeitpunkt, an dem typischerweise die Tageshöchsttemperatur erreicht wird, gelegt. Nach Festlegung dieser Rahmenbedingungen kann daraufhin die eigentliche Belegungsplanung erfolgen. In diesem Zusammenhang findet auch eine Losgrößenanpassung entsprechend der Größe des Zeitfensters statt. Das Vorgehen wird ebenfalls noch einmal an einem Beispiel (Abbildung 40) veranschaulicht.

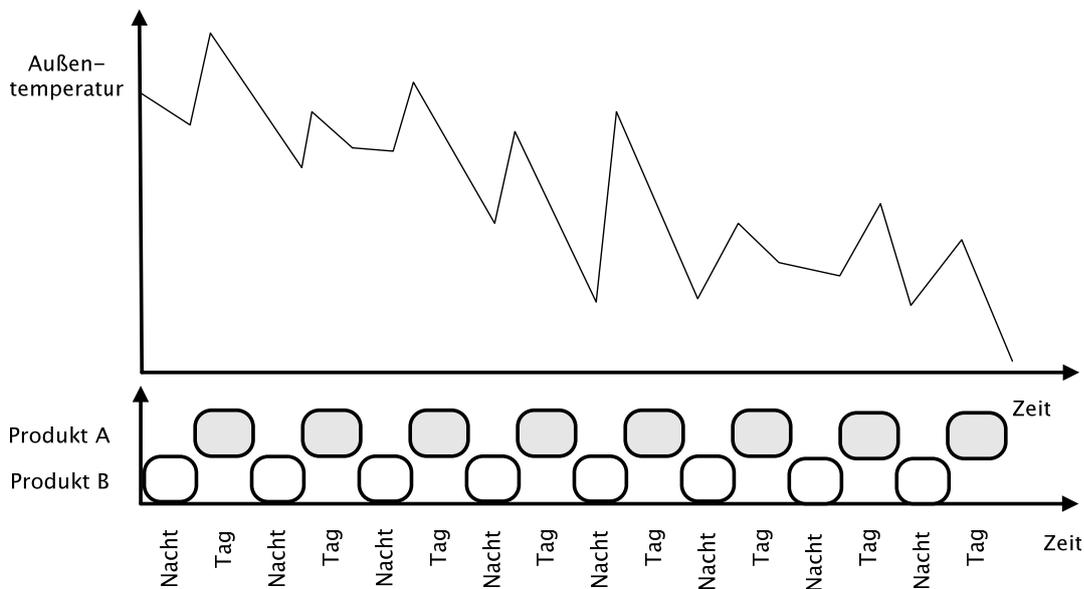


Abbildung 40: Beispieldarstellung des Ansatzes Tag/Nacht

In diesem Beispiel symbolisiert ebenfalls die Farbe grau einen emissionsreichen Auftrag und die Farbe weiß einen emissionsarmen Auftrag. Zu erkennen ist zudem, dass versucht wird, eine gleichmäßige Losgröße zu erzielen, die das jeweilige Tages- bzw. Nachtzeitfenster optimal ausnutzt.

## 9.4 Ansatz Lüftungswärmeverluste

Die Lüftungswärmeverluste stellen üblicherweise den höchsten Anteil der Wärmeverluste dar. Sie werden direkt von den entstehenden gesundheitsschädlichen Emissionen beeinflusst, da die Luftwechselrate bzw. der Luftvolumenstrom abhängig von Konzentration und Emissionen eingestellt wird. Die hierdurch entstandenen Lüftungswärmeverluste können sich nach folgender Formel berechnen.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q} = \beta \cdot \rho \cdot V_{Raum} \cdot c_p \cdot (T_{zu} - T_i)$$

Formel 19: Lüftungswärmeverluste

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass im Betrieb der Anlage die Lüftungswärmeverluste nur von der Luftwechselrate  $\beta$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  abhängen. Die Luftwechselrate kann zudem abhängig von der Schadstoffemission und dem MAK-Wert berechnet werden.

$$\beta = \frac{K}{MAK \cdot V_{Raum}}$$

Formel 20: Berechnung der Luftwechselrate (Rötscher, 1982, S. 9)

Es liegt daher nahe, die Temperaturdifferenz und die Lüftungsrate bei der Planung zu berücksichtigen. Aufgrund der Tatsache, dass die Außentemperatur nur bedingt vorhersagbar ist, ist eine solche Berücksichtigung nur bei einer dynamischen Planung realisierbar. Ausgehend von dem Gedanken einer prioritätsregelbasierten Steuerung kann die Priorität über das Produkt aus Luftwechselrate und Temperaturdifferenz ermittelt werden. Diese Vereinfachung ist möglich, da die realen Lüftungswärmeverluste proportional zu diesem Wert sind. In diesem Fall kann aber nicht einfach das Los ausgewählt werden, das die niedrigste Priorität hat, da hierdurch, ähnlich wie beim Ansatz Temperaturtrend, die emissionsärmsten Lose zuerst ausgewählt werden. Um eine gleichmäßige Aufteilung zu erreichen, wird ein Vorgabewert definiert, mit dem die jeweilige Priorität verglichen wird. Es wird daraufhin das Los ausgewählt, das die niedrigste Abweichung von dem Vorgabewert besitzt.

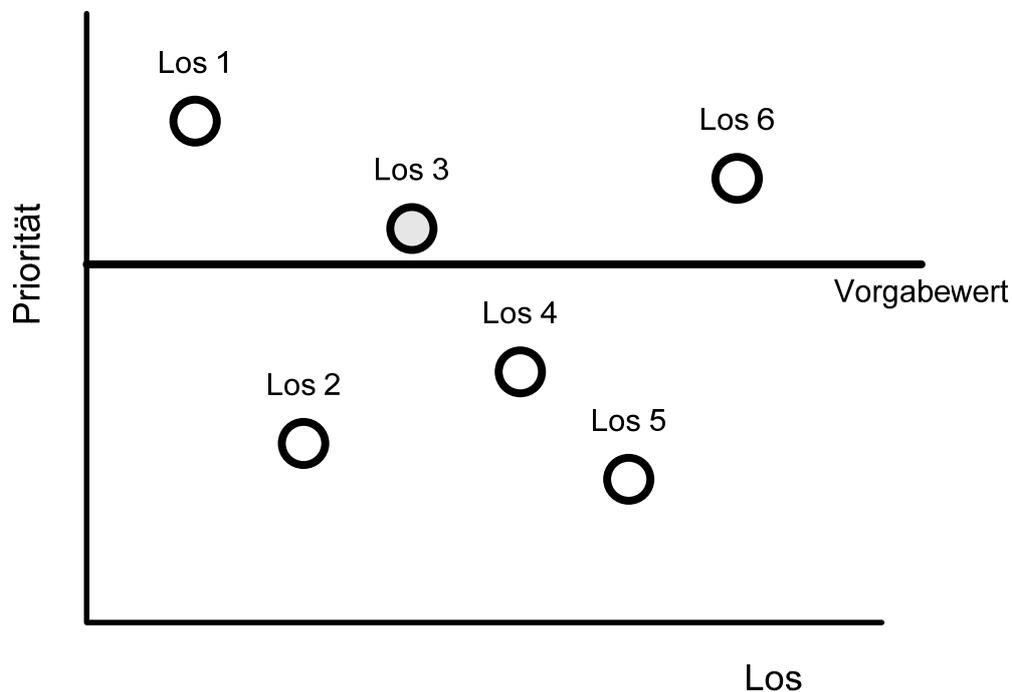


Abbildung 41: Beispieldarstellung der Losauswahl mit Vorgabewert

In Abbildung 41 ist die Losauswahl mit Vorgabewert an einem Beispiel dargestellt. Es stehen sechs Lose zu Auswahl, für die jeweils die Priorität bestimmt wurde. Die y-Achse symboli-

siert dabei die Priorität. In dem Beispiel besitzt Los 3 die geringste Abweichung zwischen Priorität und Vorgabewert und wird daher ausgewählt.

Bei dieser Vorgehensweise werden allerdings nur die Zuordnung zu den Maschinen und die Reihenfolge innerhalb der Maschinen bestimmt. Das Potenzial, welches durch die Terminierung vorhanden ist, bleibt ungenutzt. Dies kann allerdings durch Verwendung eines Grenzwerts statt des Vorgabewerts erreicht werden. Es wird grundsätzlich von einer Vorwärtsterminierung ausgegangen, wodurch die Aufträge so früh wie möglich ausgeführt werden. Durch die Definition des Grenzwertes können auch Verschiebungen nach hinten realisiert werden. Es werden, solange die Möglichkeit des Verschiebens besteht, nur Lose eingeplant, deren Priorität niedriger als der Grenzwert ist. Eine Verschiebung ist möglich, wenn die noch zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit (Kapazität) größer ist als die Summe der Bearbeitungszeiten aller noch zu fertigenden Lose.

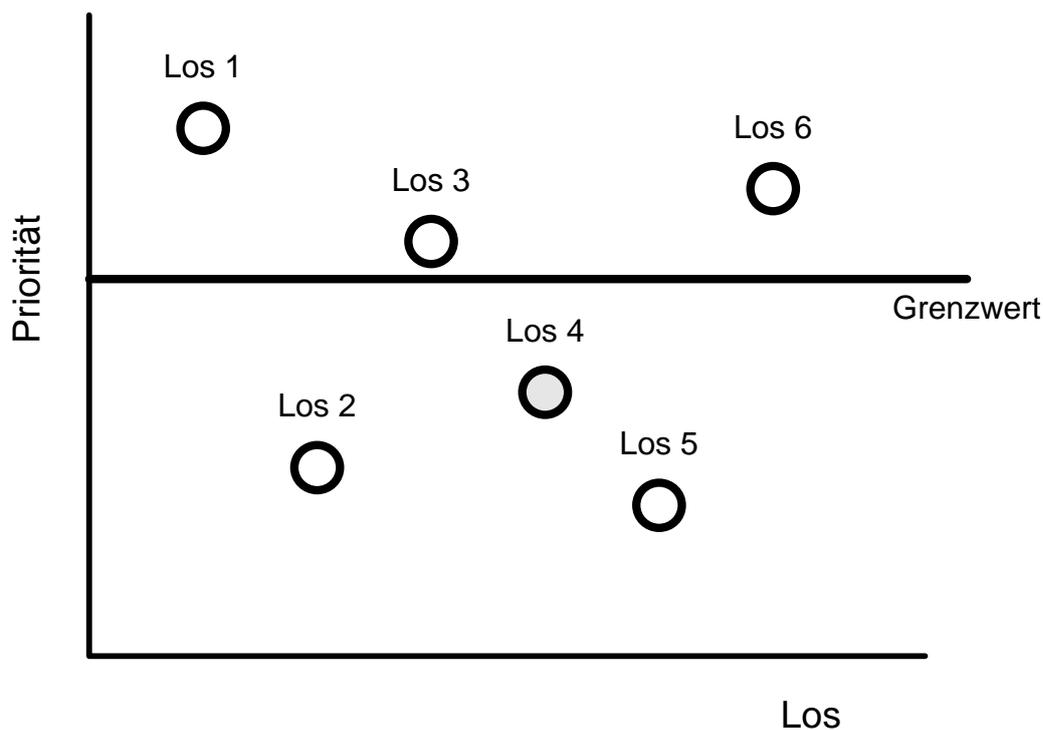


Abbildung 42: Beispieldarstellung der Losauswahl mit Grenzwert

In Abbildung 42 ist die Losauswahl mit Grenzwert an dem gleichen Beispiel wie oben noch einmal dargestellt. Los 3 hat zwar weiterhin die geringste Abweichung zu dem Grenzwert, liegt allerdings oberhalb von ihm und wird daher nicht ausgesucht. Stattdessen wird Los 4

ausgewählt, da es von den Losen, die eine niedrigere Priorität als der Grenzwert besitzen, die geringste Abweichung zum Grenzwert hat.

Sind keine Lose vorhanden, deren Priorität niedriger als der Grenzwert ist, findet ein Verschieben bzw. Warten für eine vorgegebene Zeit statt. Daraufhin werden erneut die Prioritäten bestimmt. Ist keine Verschiebung mehr möglich, wird das Los mit der niedrigsten Priorität unabhängig vom Grenzwert eingeplant. Das Verfahren wird nachfolgend an einem Beispiel (Abbildung 43) erläutert.

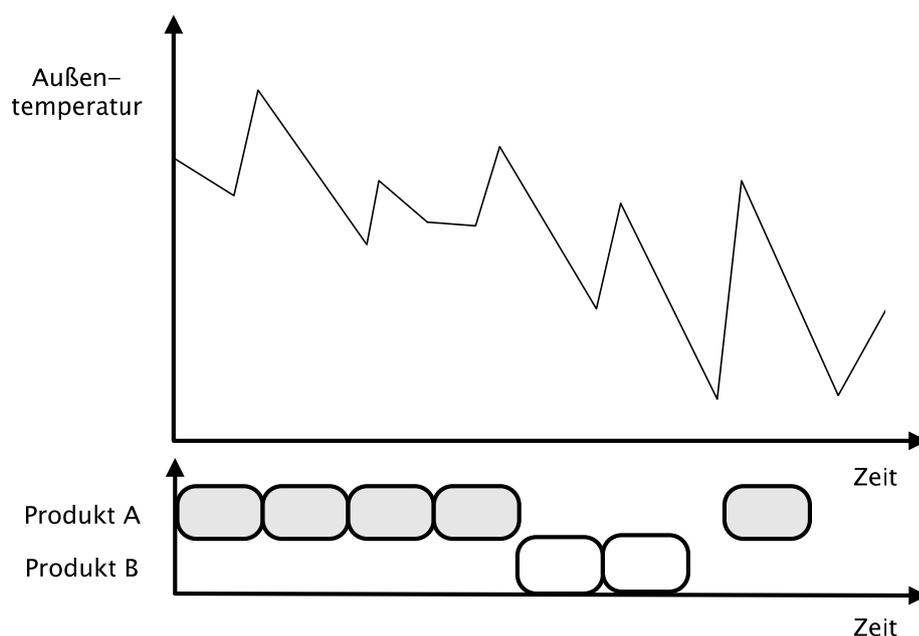


Abbildung 43: Beispieldarstellung des Ansatzes Lüftungswärmeverluste

In diesem Beispiel sind wieder emissionsreiche Aufträge grau und emissionsarme weiß markiert. Es ist zu sehen, dass zu Beginn der Grenzwert auch bei einem emissionsreichen Auftrag unterschritten werden kann, aufgrund der hohen Außentemperatur. Nach der Bearbeitung von vier Aufträgen ist dies nicht mehr der Fall, wodurch emissionsarme Aufträge ausgewählt werden. Daraufhin ist nur noch ein emissionsreicher Auftrag verblieben. Da der Grenzwert überschritten wird, wird zunächst gewartet. Nach kurzer Zeit ist allerdings eine höhere Außentemperatur vorhanden, wodurch das emissionsreiche Produkt gewählt werden kann.

Der Grenzwert und die Losgröße sind bei diesem Verfahren die entscheidenden Parameter. Die Bestimmung dieser Parameter sollte daher mit Optimierungsmethoden durchgeführt werden.

## 9.5 Parameteroptimierung

Bei dem oben aufgeführten Ansatz Lüftungswärmeverluste sind die Parameter für den Grenzwert und die Losgröße zu ermitteln. Hierfür bietet es sich an, allgemeine Suchverfahren (Metaheuristiken) wie etwa Evolutionsstrategien oder Simulated Annealing zu verwenden. Mit diesem Verfahren kann, wie schon erwähnt, zwar kein Optimum garantiert, aber doch gute Näherungslösungen ohne Aussage über die Qualität der Lösung, erzielt werden.

Für die Parameteroptimierung wird das entwickelte Simulationssystem um eine Optimierungsumgebung erweitert. Auf dem Markt existieren verschiedene Systeme, welche unterschiedlichste Suchverfahren einsetzen. Darüber hinaus existieren Ansätze, welche einen kooperativen Einsatz der unterschiedlichen Suchverfahren verfolgen. Zu nennen sind hier beispielsweise die kommerziell verfügbaren Systeme ISSOP (Dualis GmbH) und der WITNESS OPTIMIZER (Lanner Group). In dieser Arbeit wird die an der Universität Kassel entwickelte Optimierungsumgebung OptiS (Schneider, 2001) eingesetzt.

Bei OptiS stehen für die Optimierung folgende Verfahren zur Auswahl (Schneider, 2001, S. 17):

- Evolutionsstrategien,
- Simulated Annealing,
- Axial Iteration,
- Simplex Strategie,
- Zufallszahlen.

Die Kooperation der Verfahren wird über eine sogenannte Kooperationsschwelle realisiert. Die jeweilig aktuell erzielte Lösung wird immer mit der bis dahin besten Lösung verglichen. Ist die aktuelle Lösung schlechter als über die Kooperationsschwelle zugelassen, erfolgt ein Neustart des Verfahrens mit der besten Lösung als Startwert (Schneider, 2001, S. 53 ff.). Darüber hinaus ist mit OptiS eine Verteilung der durchzuführenden Experimente auf ver-

schiedene Computer möglich, wodurch es möglich ist, den Zeitaufwand deutlich zu reduzieren (Schneider, 2001, S. 58 ff.). Nachfolgend ist die Integration der Optimierungsumgebung in das Simulationssystem dargestellt (Abbildung 44).

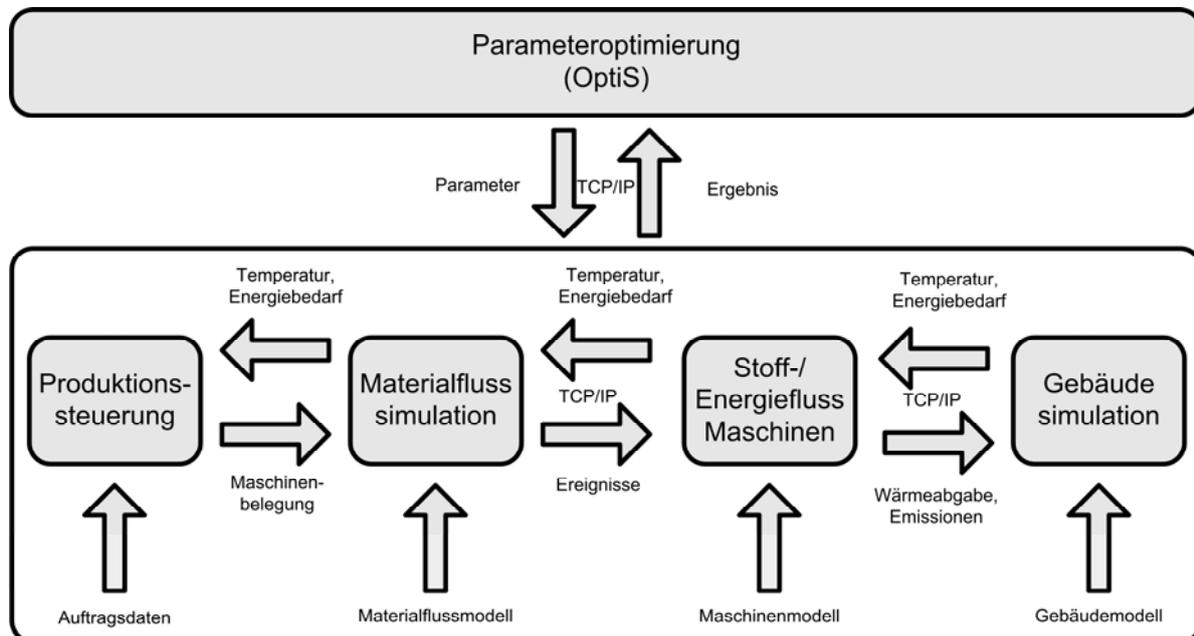


Abbildung 44: Integration der Optimierungsumgebung in das Simulationssystem

Die Optimierungsumgebung ermittelt auf Basis des jeweiligen Verfahrens einen Parametersatz und sendet diesen an einen verfügbaren Client, der daraufhin die Simulation startet. Nach Fertigstellung der Simulation sendet der Client die vorher definierte Zielgröße (z. B. Energieverbrauch) an die Optimierungsumgebung zurück, woraufhin ein neuer Parametersatz berechnet und wiederum versendet wird.

Es ist allerdings in diesem Zusammenhang zu beachten, dass bei dem hier vorgesehenen Ansatz die Temperatur als nicht vorhersagbare Größe enthalten ist. Die Ergebnisse einer Optimierung können daher von dem real besten Parameter abweichen. Allerdings kann über verschiedene Vergleichsläufe jedoch eine gute Näherung für die jeweiligen Parameter gefunden werden. Zudem hilft die Verwendung der Optimierungsmethoden dabei, ein erhöhtes Systemverständnis in Bezug auf die Wechselwirkungen zu erhalten, wodurch eine von der Optimierung losgelöste Bestimmung der Parameter möglich ist.

## **10 Anwendung an einer Beispielanlage**

### **10.1 Beschreibung Beispielanlage**

Das entwickelte Simulationssystem und die vorgestellten Ansätze für eine energieeffiziente Produktionssteuerung werden an einer Beispielanlage hinsichtlich ihrer Möglichkeiten untersucht. Die Beispielanlage basiert nicht auf einer realen Produktionsanlage, da nur so eine grundlegende Untersuchung frei von Einschränkungen durchgeführt werden kann.

Bei dem ausgewählten Beispiel handelt es sich um eine Produktionsanlage für Kunststoff-spritzgussteile. Es stehen fünf baugleiche Spritzgussmaschinen zur Verfügung. Die Bauteile durchlaufen nach der Herstellung einen Prüfprozess und werden anschließend bis zu ihrer Auslieferung eingelagert. Die einzelnen Prozesse sind dabei über eine Fördertechnik automatisch verkettet. Es werden vier verschiedene Produkte hergestellt, von denen jeweils zwei aus Polyoxymethylen (POM) und jeweils zwei aus Polypropylen (PP) bestehen. Die Zykluszeit für alle Artikel beträgt 60 Sekunden. Die Anlage wird in drei Schichten und sieben Tage pro Woche betrieben. Die Auslieferung erfolgt einmal wöchentlich und die Gesamtuntersuchungszeit beträgt vier Wochen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilmodelle, deren Aufbau und Grundlagen sowie die verwendeten Kennzahlen dargestellt.

### **10.2 Modellerstellung**

#### **10.2.1 Materialflussmodell**

Die Materialflüsse des Modells sind mit dem Materialflusssimulator SIMFLEX/3D dargestellt. Die Spritzgussmaschinen und die Prüfanlage sind mit dem Baustein Maschine nachgebildet. Die Fördertechnik basiert auf Stauförderern und Weichen.

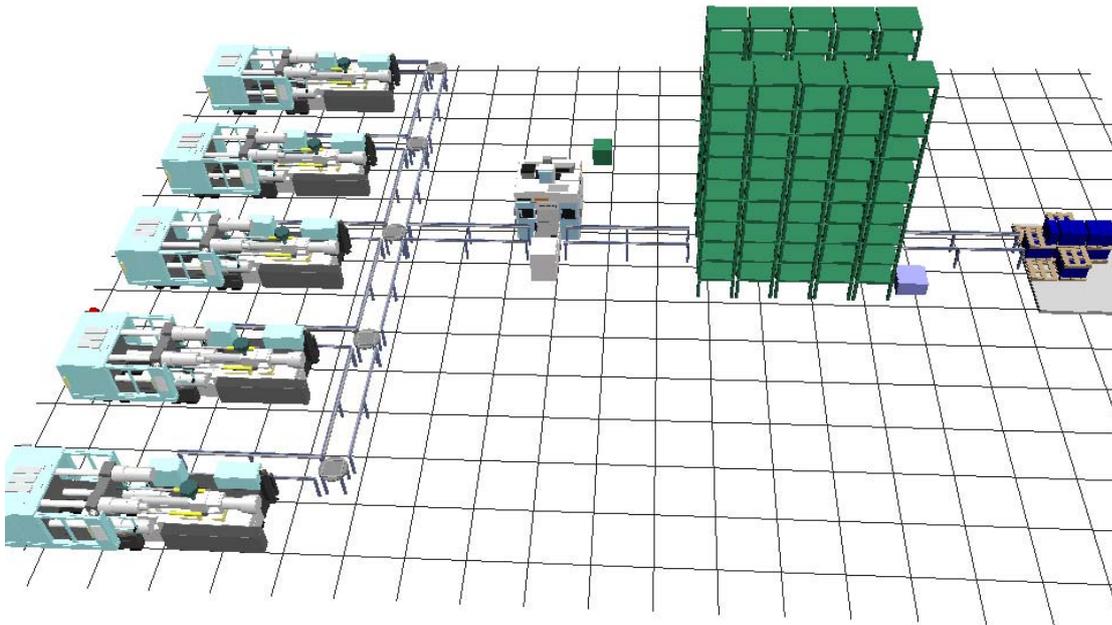


Abbildung 45: Beispielanlage in SIMFLEX/3D

Jeder Maschine ist ein stochastisches Störverhalten hinterlegt. Die mittlere Zeit zwischen zwei Fehlern (MTBF) beträgt 100 Minuten und die mittlere Reparaturzeit (MTTR) beträgt 10 Minuten. Es ergibt sich somit eine rechnerische Verfügbarkeit jeder Maschine von 90,91 %. Das Umrüsten der Maschinen zwischen den einzelnen Artikeln ist über eine Rüstmatrix abgebildet. Alle Rüstzeiten sind mit einer Stunde angenommen.

Das Abrufverhalten bzw. die Auslieferung ist über einen Steuerbaustein nachgebildet. Jeden siebten Tag werden die vorgesehenen Artikel aus dem Lager bestellt. Sind die entsprechenden Mengen nicht vorhanden, werden diese, sobald sie verfügbar sind, nachgeliefert.

Die herzustellenden Aufträge werden ebenso wie die Störungen stochastisch ermittelt. Mit Hilfe eines Zufallszahlenstroms werden zu Beginn die Aufträge für jede Woche ermittelt. Hierbei wird die maximale Kapazität je Woche berücksichtigt, um keine Engpässe zu erzeugen. In der Regel wird hierdurch keine Vollauslastung erreicht, wodurch auch die Möglichkeiten der Terminierung verwendet werden können. Durch eine Variation der Startzahlen der Zufallszahlenströme werden unterschiedliche Zufallszahlen erzeugt, die allerdings die gleiche Verteilung besitzen. Hierüber ist eine Veränderung des Lastmodells möglich. Die Simulationslaufzeit beträgt bei allen Experimenten vier Wochen.

## 10.2.2 Maschinenmodelle

Die Maschinenmodelle basieren auf Literaturwerten und eigenen Messungen, die mit Industriepartnern bzw. den an der Universität Kassel vorhandenen Maschinen durchgeführt worden sind. Die Leistungsaufnahme ist auf reale Messwerte zurückzuführen. Hierbei werden zwei unterschiedliche Messprofile verwendet. Insgesamt werden vier verschiedene Produkte in der Beispielanlage hergestellt, dabei werden jeweils zwei gleiche Bauteile (Bauteil A und Bauteil B) aus zwei unterschiedlichen Materialien (PP und POM) verwendet.

### Bauteil A

- Gewicht: 0,14 kg
- Zykluszeit: 60 Sekunden
- Elektrischer Gesamtenergieverbrauch: 0,327 kWh
- Spezifischer elektrischer Energieverbrauch: 2,338 kWh/kg

### Bauteil B

- Gewicht: 0,20 kg
- Zykluszeit: 60 Sekunden
- Elektrischer Gesamtenergieverbrauch: 0,406 kWh
- Spezifischer elektrischer Energieverbrauch: 2,028 kWh/kg

Der zeitliche Verlauf der Leistungsaufnahme wird jeweils durch abschnittsweise lineare Funktionen approximiert. Die Leistungsaufnahme variiert in der Realität allerdings abhängig von dem verwendeten Material. Da dieser Einfluss aber meist sehr gering ist, wird er in diesem vereinfachten Modell vernachlässigt.

Die Wärmeabgabe der Maschinen basiert auf Literaturwerten, da messtechnische Unterscheidung zwischen Konvektion und Strahlung nur schwer möglich ist. Basierend auf den Werten von Schwarze (Schwarze, 1996) werden 27 % der aufgenommenen Energie durch Konvektion und 9 % durch Strahlung in den Raum abgegeben. Für die verwendeten Bauteile ergeben sich daher folgende Werte.

#### Bauteil A

- Elektrischer Gesamtenergieverbrauch: 0,327 kWh
- Wärmeabgabe durch Konvektion: 0,088 kWh
- Wärmeabgabe durch Strahlung: 0,029 kWh

#### Bauteil B

- Elektrischer Gesamtenergieverbrauch: 0,406 kWh
- Wärmeabgabe durch Konvektion: 0,109 kWh
- Wärmeabgabe durch Strahlung: 0,036 kWh

Der zeitliche Verlauf ist in diesem Fall konstant über die Zykluszeit. Lediglich nach Inbetriebnahme der Maschine findet zunächst ein Aufwärmen statt. Diese Aufwärmphase wird in dem Beispielmmodell nicht betrachtet.

Die Werte für die Emissionen basieren ebenfalls auf Literaturwerten. Hierfür wurden vor allem die Untersuchungen von Marti (Marti et al., 2003) und Kühl (Kühl et al., 1995) herangezogen. Entscheidend in Zusammenhang mit der maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) ist vor allem die Emission von Formaldehyd bei der Verarbeitung von POM. Je nach Verarbeitungstemperatur werden bis zu 450 mg/kg Formaldehyd freigesetzt (Marti et al., 2003). Hiermit kann der gesetzlich vorgegebene Grenzwert von 0,62 mg/m<sup>3</sup> (TRGS 900, 2000) leicht erreicht werden. Die Emission entsteht hauptsächlich bei Öffnen des Werkzeuges. Für die verwendeten Bauteile werden folgende Formaldehyd-Emissionen angenommen.

- Bauteil A (POM): 22,5 mg je Zyklus
- Bauteil B (POM): 45,0 mg je Zyklus

Die detaillierten Daten zu Leistungsaufnahme, Wärmeabgabe und Emissionen sind dem Anhang zu entnehmen.

### 10.2.3 Gebäudemodell

Das thermische Gebäudemodell wurde mit TRNSYS modelliert. Das Gebäude entspricht einer vereinfachten Industriehalle, die eine Raumzone beinhaltet. Folgende Daten liegen dabei dem Modell zugrunde:

- Grundfläche: 15 x 15m, Höhe: 4 m
- Raumvolumen: 900 m<sup>3</sup>, Wärmekapazität der Luft: 2160 kJ/K
- Keine Undichtigkeiten in der Gebäudehülle
- Konvektive Raumheizung mit maximaler Leistung von 1000 kW
- Mechanische Lüftung

Für den Boden, die Decke und die Wände wurden in TRNSYS vordefinierte Wände verwendet. Die Lüftung erfolgt abhängig von der Hallenkonzentration und der maximalen Arbeitsplatzkonzentration der Schadstoffe. Liegt keine Überschreitung der Grenzwerte vor, so wird eine minimale Luftwechselrate von 2/h eingestellt.

Die untersuchten Standorte sind Stuttgart (Deutschland) und Tallinn (Estland). Die verwendeten Klimadaten sind Testreferenzjahre, die von der Software Meteororm (Meteororm, 2006) erstellt worden sind. Die genauen Daten sind den im Anhang aufgeführten Tabellen zu entnehmen.

#### 10.2.4 Kennzahlen

Zum Vergleich und zur Bewertung der einzelnen Verfahren werden die bereits genannten logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue herangezogen. Sie werden wie in Kapitel 7 definiert verwendet. Eine Ausnahme bildet in diesem Zusammenhang die Termintreue. Hier wird der Prozentsatz der Produkte, die zum Liefertermin vorliegen, als Liefertreue herangezogen, und nicht der prozentuale Anteil der Aufträge.

Bei der Betrachtung der Kosten werden die in Kapitel 8.1 dargestellten Ergebnisse verwendet.

- Kosten für den Energieverbrauch der Heizungs- und Klimatechnik
- Kosten für den mengenabhängigen Arbeitspreis für den Strombedarf der Produktionsmaschinen (unter Berücksichtigung von tages- und tageszeitabhängigen Strompreisen)
- Kosten für den spitzenlastabhängigen Leistungspreis des Strombedarfs der Produktionsmaschinen
- Einrichtungs- und Rüstkosten
- Lagerhaltungskosten

- Kosten für Nichteinhaltung von Lieferterminen
- Kosten durch die Vermeidung absehbarer Terminüberschreitungen

Bei den Energiekosten werden grundsätzlich zwei Szenarien betrachtet. Szenario 1 verwendet aktuelle Energiekosten, Szenario 2 dagegen versucht den Einfluss steigender Energiekosten zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Prognosen über zukünftige Energiepreise verdeutlichen, dass hierbei keine exakte Vorherbestimmung möglich ist. Im Rahmen der Untersuchung wird daher die Energiekostensteigerung durch einen Zuschlag von 50% auf die aktuellen Energiekosten angenommen.

Die Heizkosten werden über einen Heizölpreis von 6 ct/kWh (Tecson, 2006) ermittelt. Bei den Stromkosten wird ein stundenabhängiger Strompreis, wie er an der Europäischen Strombörse in Leipzig gehandelt wird, verwendet. Da dieser Preis allerdings zum jetzigen Zeitpunkt nicht für den Endkunden herangezogen wird, wird der Preis dementsprechend angepasst, so dass der mittlere Preis einem üblichen Endkundenpreis für die Industrie entspricht. Der mittlere Leistungspreis ist demnach 89,90 €/kW und der mittlere Arbeitspreis 77 €/MWh (EEX, 2005; VdEW, 2006).

Die Einrichtungs- und Rüstkosten werden über die Stundenkosten des jeweiligen Mitarbeiters berechnet. Es werden nur die direkt zuordenbaren Kosten beachtet. Die Lagerhaltungskosten werden über die verursachten Zinskosten für das vorhandene Umlaufvermögen ermittelt. Hierbei wird der Materialpreis und nicht der Verkaufspreis als Grundlage verwendet. Die Materialpreise sind für POM 2,40 €/kg und für PP 1,40 €/kg (Pro-Plast, 2006) und der Zinssatz wird mit 6 % angenommen.

Die Kosten für die Nichteinhaltung von Lieferterminen und die Vermeidung absehbarer Terminüberschreitungen sind allerdings nur sehr schwierig zu bewerten. Aufgrund der verstärkten Kundenorientierung in Unternehmen (Wiendahl, 2005, S. 255) sollen die entwickelten Algorithmen eine nahezu vollständige Termintreue sicherstellen, es wird daher keine monetäre Bewertung dieser Größe erfolgen, vielmehr gilt eine verstärkte Terminabweichung als Ausschlusskriterium für den Algorithmus. Um die Kosten zur Vermeidung von absehbaren Terminüberschreitungen zu beachten, muss in dem Simulationsmodell eine detaillierte Be-

trachtung der Mitarbeiter erfolgen. Diese Betrachtung würde aber den Komplexitätsgrad des Modells erhöhen und wird daher vernachlässigt.

### 10.3 Verifikation und Validierung

Verifikation und Validierung sind wichtige aber auch schwierige Teilaufgaben der Simulation. Es handelt sich meist um komplexe und dynamische Systeme, wodurch es kein Verfahren gibt, um eine formale Korrektheit nachzuweisen. Die Verifikation soll dabei die Richtigkeit der Mechanismen und die Validierung die hinreichende Übereinstimmung von Modell und Realsystem prüfen.

Verifikation und Validierung werden nach der Arbeitsgruppe für Validierung der ASIM wie folgt definiert:

„Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ (Rabe et al., 2004, S. 255) (Ist das Modell richtig?) (Balci, 2003)

„Validierung ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben“ (Rabe et al., 2004, S. 256) (Ist es das richtige Modell?) (Balci, 2003).

Bei den eingesetzten Techniken für die Verifikation und Validierung ist meist keine scharfe Trennung zwischen beiden Begriffen möglich.

Die Aufgabenstellung der Verifikation und Validierung existiert nicht nur für Simulationsmodelle, sondern für jede Art von Modellen. Bei der Simulation erschwert allerdings das dynamische Verhalten die Durchführung. Mittelwerte haben nur eine geringe Bedeutung und können nur für vereinfachte Modelle angewendet werden (Page, 1991). Es ist daher eine systematische Überprüfung nach unterschiedlichen Klassen sinnvoll (Rabe et al., 2004):

- Unterschiedliche Kennzahlen (z. B. Ausbringung, Durchlaufzeit, Bestand)
- Unterschiedliche zeitliche Aggregation (z. B. Mittelwerte für Stunden, Tage, Wochen)
- Unterschiedliche inhaltliche Aggregation (z. B. Artikel, Artikelgruppen)
- Prüfung einzelner logischer Abschnitte

Bei dem hier entwickelten Modell entsteht die Komplexität nicht durch die jeweiligen Modelle auf den unterschiedlichen Ebenen, sondern vielmehr durch die Kopplung der einzelnen Modelle. Beispielsweise ist das Materialflussmodell im Vergleich zu realen Simulationsstudien sehr einfach gehalten. Es existieren nur wenige Bausteine und keine komplexen Steuerungsabläufe innerhalb der Anlage. Dies gilt ebenso für den Stoff- und Energiefluss der Maschinen sowie die thermische Gebäudesimulation. Es werden daher zunächst die jeweiligen Simulationsebenen losgelöst voneinander betrachtet und daraufhin das gekoppelte Gesamtsystem. Die Verifikation und Validierung von gekoppelten Modellen wird aktuell nur wenig betrachtet. Die bisherigen Ansätze kommen aus dem militärischen Bereich, wie beispielsweise dem Department of Defense der USA (DOD, 2003).

### Materialflusssimulation

Zur Untersuchung der Validität von Materialflusssimulationen existieren und eignen sich verschiedene Techniken. Jede einzelne Technik ist nicht als alleinige Methode zu verstehen, sondern die einzelnen Techniken sollten vielmehr miteinander kombiniert werden. Alle Methoden können allerdings nur Fehler ausschließen und nicht eine Fehlerfreiheit garantieren. Folgende Techniken, welche meist in der englischsprachigen Literatur (Balci, 1989; Sargent, 1996) zu finden sind, wurden zur Sicherstellung der Validität angewendet:

- Animation  
Eine Überprüfung des Modellverhaltens anhand der dreidimensionalen Animation wird durchgeführt.
- Test mit konstanten Werten  
Das Modell wird nur mit konstanten Werten (z. B. feste Bearbeitungszeiten, keine Störungen) verwendet und die Ergebnisse mit einfachen Kalkulationen überprüft.
- Interne Validität  
Es werden mehrere Experimente mit unterschiedlichen Startwerten der Zufallszahlengeneratoren durchgeführt. Es sollten, um ein stabiles und verwendbares Modell zu besitzen, keine hohen Abweichungen bei den Ausgangsdaten (z. B. Durchlaufzeiten, Ausbringung, Bestand) auftreten.

- Sensitivitätsanalyse

Es werden Eingabeparameter verändert und die Auswirkungen auf Ausgabeparameter bestimmt und mit den erwarteten Veränderungen verglichen.

- Trace-Analyse

Das Verhalten von einzelnen Objekten innerhalb des Modells wird im Trace File nachverfolgt und damit das logische Verhalten überprüft.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Experimente, die zur Verifikation und Validierung durchgeführt wurden, dargestellt.

Im ersten Schritt ist eine Simulation mit konstanten Werten erfolgt. Hierbei sind alle Störungen ausgeschaltet. Weiterhin wurde nur ein Produkt gefertigt und dies konstant über die gesamte Laufzeit. Dieses vereinfachte Modell kann statisch nachkalkuliert werden, da keine stochastischen Einflüsse vorhanden sind. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Materialflusssimulation mit konstanten Werten

	<b>Simulation</b>	<b>Statische Berechnung</b>	<b>Abweichung [%]</b>
Arbeiten [%]	100	100	0
Störung [%]	0	0	0
Rüsten [%]	0	0	0
Mittlere Durchlaufzeit [min]	5.040	5.040	0
Mittlerer Bestand [Stck]	25.200	25.200	0

Es ist zu erkennen, dass keine Abweichungen vorhanden sind. Hierdurch können z. B. grundsätzliche Fehler im Materialfluss ausgeschlossen werden.

Bei dem Modell werden stochastische Daten, wie z. B. Störungen der Maschinen, verwendet, daher ist es wichtig zu prüfen, inwieweit es eine Abhängigkeit von den Zufallszahlenströmen gibt. Die in Tabelle 4 dargestellten Ergebnisse sind mit einem prioritätsregelbasierten Algo-

rhythmus, der als Priorität die Schlupfzeit verwendet, simuliert. Die einzelnen Experimente unterscheiden sich nur durch die Festlegung der Startwerte für die Zufallszahlenströme.

Tabelle 4: Ergebnisse der Überprüfung der internen Validität der Materialflusssimulation

	<b>Startwerte- satz 1</b>	<b>Startwerte- satz 2</b>	<b>Startwerte- satz 3</b>	<b>Mittlere Abweichung zum Mittelwert [%]</b>
Arbeiten [%]	64,15	64,15	64,15	0,00
Störung [%]	4,62	4,87	4,98	2,81
Rüsten [%]	0,92	0,92	0,92	0,00
Inaktiv [%]	30,31	30,06	29,95	0,45
Mittlere Durchlauf- zeit [min]	3.819	3.817	3.811	0,08
Minimale Durchlauf- zeit [min]	2	2	2	0,00
Maximale Durch- laufzeit [min]	9.595	9.650	10.121	2,26
Mittlerer Bestand [Stck]	12.248	12.246	12.224	0,08
Minimaler Bestand [Stck]	0	0	0	0,00
Maximaler Bestand [Stck]	38.476	38.500	38.557	0,08

Die minimalen Abweichungen zum Mittelwert zeigen, dass keine statistische Abhängigkeit der Ausgangswerte vorhanden ist.

Zur weiteren Sicherstellung der Korrektheit des Simulationsmodells sind verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt worden. In Tabelle 5 sind beispielhaft die Ergebnisse bei einer Veränderung des Lastmodells dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse beim Lastmodell der Materialflusssimulation

Lastmodell	normal	hoch		niedrig	
	Werte	Werte	Abweichung [%]	Werte	Abweichung [%]
Ausbringung [Stck]	129.318	140.804	8,88	117.629	-9,04
Arbeiten [%]	64,14	69,84	8,88	58,35	-9,04
Mittlere Durchlaufzeit [min]	3.819	4.168	9,14	3.462	-9,35

Es ist zu erkennen, dass, wie zu erwarten ist, die Auslastung sich ebenso wie die Ausbringung erhöht bzw. senkt. Die minimal stärkere Abweichung bei der mittleren Durchlaufzeit ist damit zu erklären, dass durch eine höhere Systemlast auch logistische Störungen (z. B. Stau) zunehmen, wodurch sich die Durchlaufzeit erhöht.

Auch bei der Anwendung der weiteren genannten Techniken ergaben sich keine Fehler oder Auffälligkeiten, weshalb von einem validen Modell ausgegangen wird.

#### Stoff- und Energiefluss

Der Stoff- und Energiefluss der Maschinen nimmt in diesem Zusammenhang eine Sonderstellung ein, da hier keine dynamische Simulation erfolgt. Es können daher die berechneten Werte auf Basis der Eingangsdaten über einfache Kalkulation nachberechnet und überprüft werden. Alle Vergleiche ergaben keine Abweichung. Es ist somit ein valides Modell vorhanden.

#### Thermische Gebäudesimulation

Bei der thermischen Gebäudesimulation existieren grundsätzlich drei Möglichkeiten, um eine Verifikation und Validierung durchzuführen (Gummerer et al., 2000b, S. 61 f.):

- Empirische Validierung  
Es wird ein direkter Vergleich zwischen realen Messwerten und den Simulationsergebnissen durchgeführt.
- Analytische Vergleiche  
Die Simulationsergebnisse werden mit vereinfachten analytischen Methoden nachberechnet und verglichen.
- Vergleichstest  
Die Ergebnisse verschiedener Simulationen (z. B. unterschiedliche Problemlöser, veränderte Daten oder Rahmenbedingungen) werden verglichen oder es werden zur Überprüfung andere Simulationsprogramme eingesetzt.

Das entwickelte Modell kann in diesem Fall nicht mit realen Messdaten verglichen werden, auch ein Vergleich mit anderen Simulationsprogrammen konnte nicht realisiert werden. Es wurden daher Vergleiche mit statisch nachberechneten Werten bei unterschiedlicher zeitlicher Aggregation sowie Vergleiche mit leicht veränderten Daten und Betrachtung der dadurch veränderten Ergebnisse durchgeführt.

Nachfolgend sind ausgewählte Ergebnisse der Validierungsexperimente dargestellt. Für die analytischen Vergleiche fanden Simulationen bei konstanten Werten (z. B. innere Wärmelasten, Luftwechselrate) statt. Bei der statischen Berechnung wird die mittlere Außentemperatur verwendet. Es findet eine Berücksichtigung der Transmissionswärmeverluste durch die Wände und der Lüftungswärmeverluste statt. Unter Transmissionswärmeverlusten sind die Wärmeleitung in der Raumumfassung und die Wärmeübergänge an der Raumumfassung zusammengefasst. Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste wird der sogenannte U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) herangezogen. Bei der statischen Berechnung werden hier die Gewinne durch lang- und kurzweilige Strahlung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse ausgewählter Experimente sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Ergebnisse der analytischen Vergleiche bei der thermischen Gebäudesimulation

	Heizenergieverbrauch [kJ/h]	
	TRNSYS	Statische Berechnung
Luftwechselrate 2 ohne innere Wärmelasten, Standort Stuttgart	55.106,42	59.405,46
Luftwechselrate 4 ohne innere Wärmelasten, Standort Stuttgart	99.941,37	103.782,38
Luftwechselrate 6 mit innerer Wärmelast (konvektiv: 60.000 kJ/h, radiativ: 20.000 kJ/h), Standort Stuttgart	59.538,80	68.159,30
Luftwechselrate 2 ohne innere Wärmelasten, Standort Tallinn	61.086,48	74.895,97

Bei den Ergebnissen sind Abweichungen zwischen statischer Berechnung und Simulation mit TRNSYS zu erkennen. Sie sind auf die Nicht-Berücksichtigung der lang- und kurzwelligen Strahlung zurückzuführen. Die Sensitivitätsanalyse bei einer Veränderung der Luftwechselrate, der inneren Wärmelasten oder der Außentemperatur (Standortwechsel) führt ebenfalls zu erwarteten Ergebnissen und passt zu den analytisch berechneten Werten.

Auch alle weiteren Prüfungen ergaben keine Fehler oder große Abweichungen. Das Modell wird daher ebenfalls als valide betrachtet.

#### Gekoppeltes Simulationssystem

Nach Überprüfung der einzelnen Teilmodelle muss auch eine Verifikation und Validierung des gekoppelten Simulationssystems durchgeführt werden. Hier ist vor allem das Zusammenspiel zwischen den simulierten Start- und Endzeitpunkten und den Stoff- und Energieprofilen mit der thermischen Gebäudesimulation zu nennen. Es liegen somit dynamisch erzeugte innere Wärmelasten vor, wodurch ein Vergleich mit einem statisch berechneten

Heizbedarf nur bedingt möglich ist. Folgende Techniken wurden zur Überprüfung des gekoppelten Simulationssystems angewendet:

- Test mit konstanten Werten

Das Modell wird nur mit konstanten Werten (z. B. keine Störungen, festgelegtes Produktionsprogramm) verwendet. Die inneren Wärmelasten sind somit nachzuvollziehen und können mit statischen Berechnungen überprüft werden.

- Interne Validität

Es werden wiederum mehrere Experimente mit unterschiedlichen Startwerten der Zufallszahlengeneratoren durchgeführt. In diesem Fall wird allerdings die Abweichung bei Heizlasten und Temperaturverläufen betrachtet.

- Sensitivitätsanalyse

Es werden Eingabeparameter (z. B. Emissionen, Wärmemengen) verändert und die Auswirkungen auf Ausgabeparameter (z. B. Heizenergieverbrauch, Temperaturverlauf) bestimmt und mit den erwarteten Veränderungen verglichen.

Bei der Durchführung von Experimenten mit konstanten Werten am gekoppelten Simulationssystem ergibt sich das grundsätzliche Problem, dass sich die Luftwechselrate aufgrund der Emissionen berechnet. Eine konstante Luftwechselrate wird nur bei Betrieb einer Maschine mit einem emissionsarmen Produkt erreicht. Bei dem Betrieb von zwei Maschinen mit emissionsarmen Produkten ist schon teilweise eine erhöhte Luftwechselrate nötig. Die Ergebnisse dieser beiden Experimente sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse des gekoppelten Simulationssystems mit konstanten Werten

	Heizenergieverbrauch [kJ/h]		
	Gekoppeltes Si- mulationssystem	TRNSYS	Statische Be- rechnung
Festes Produktionsprogramm mit 1 Maschine parallel, konstante Luft- wechselrate	23.850	23.853	30.377
Festes Produktionsprogramm mit 2 Maschinen parallel, emissionsarme Produkte	3.312	5.200	5.476

Die Tabelle zeigt, dass es nahezu keine Abweichung zwischen dem gekoppelten System und der Simulation mit TRNSYS gibt. Bei dem Betrieb von zwei Maschinen entstehen, aufgrund der schwankenden Luftwechselrate, etwas größere Abweichungen,. Die Ergebnisse zeigen aber, dass keine grundsätzlichen Fehler bei der Kopplung vorhanden sind.

Bei der Überprüfung der internen Validität, also der statistischen Abhängigkeit der Ergebnisse von den verwendeten Zufallszahlen, wurden ebenfalls mehrere Experimente mit unterschiedlichen Startzahlen durchgeführt. In Abbildung 46 ist der Verlauf der Heizleistung dargestellt.

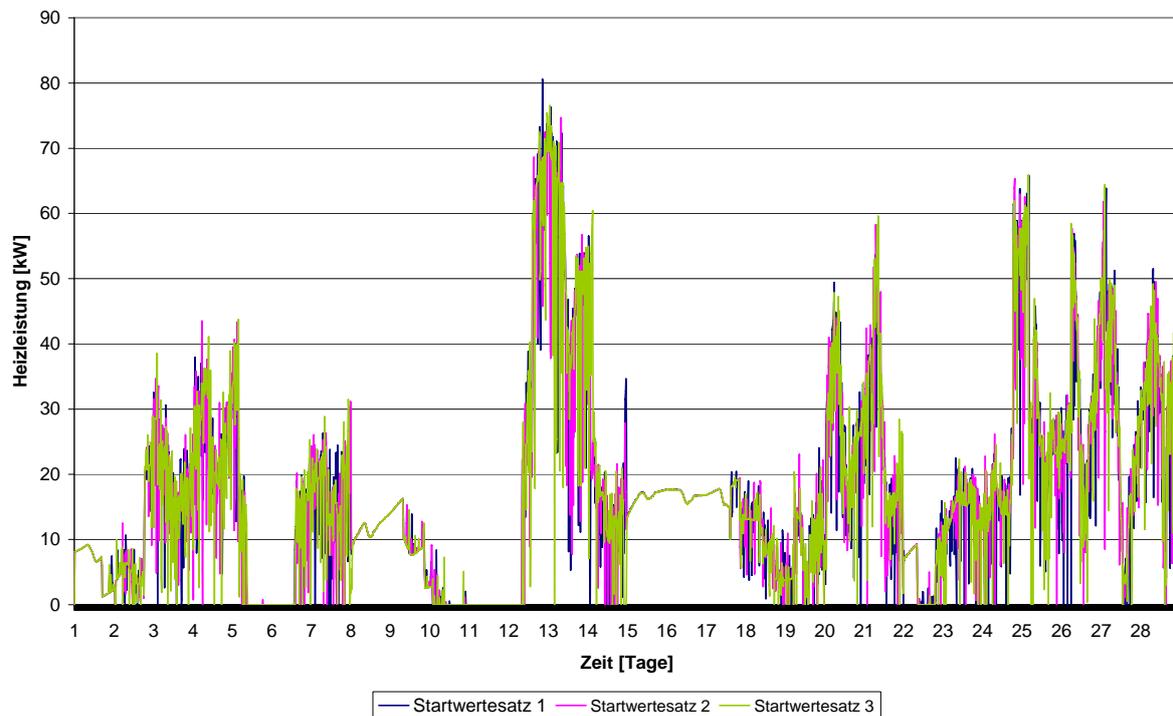


Abbildung 46: Ergebnisse der internen Validität bei der Heizleistung des gekoppelten Simulationssystems

Die Grafik zeigt, dass der grundsätzliche Verlauf der Heizleistung gleich ist. Es sind nur kurze Sprünge vorhanden, die auf die verschobenen Störzustände zurückzuführen sind. Die in Tabelle 8 dargestellten Gesamtwerte für den Heizenergieverbrauch zeigen nur eine mittlere Abweichung vom Mittelwert von 0,14 %. Es ist daher keine statistische Abhängigkeit vorhanden.

Tabelle 8: Ergebnisse der internen Validität bei dem Heizenergieverbrauch des gekoppelten Simulationssystems

	Heizenergieverbrauch [kWh]
Startwertesatz 1	11.626
Startwertesatz 2	11.590
Startwertesatz 3	11.625

Die weiteren Prüfungen ergaben ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Das Gesamtmodell wird daher als valide angenommen und kann zur Untersuchung unterschiedlicher Steuerungsmethoden verwendet werden.

## 10.4 Experimentplan

Im Folgenden sind die durchgeführten Experimente und Optimierungsläufe in einer Übersicht dargestellt und daraufhin sind in Kapitel 10.5 die Ergebnisse aufgeführt. Zum Vergleich zu den energieeffizienten Steuerungsansätzen (Kapitel 9) wird eine Produktionssteuerung mit Prioritätsregeln verwendet. Zum Einsatz kommen folgende klassische Prioritätsregeln:

- Minimale Schlupfzeit
- Kürzeste Operationszeit
- Längste Operationszeit

Ein Experimentsatz besteht immer aus den Experimenten mit den verschiedenen energieeffizienten Steuerungsansätzen und den Vergleichsexperimenten mit den klassischen Prioritätsregeln.

Es wird zunächst untersucht, ob überhaupt eine Reduzierung des Energieverbrauchs mit den genannten Verfahren möglich ist. Hierbei ist zudem ein Experimentsatz mit einer Anpassung bei den Ansätzen Trend und Tag/Nacht erfolgt, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Daraufhin wird die Wirtschaftlichkeit der Verfahren betrachtet. Bei dieser Betrachtung findet zudem eine Variation des Standorts zwischen Stuttgart (Deutschland) und Tallinn (Estland) statt, da durch die geringeren Personalkosten am Standort Tallinn bessere Ergebnisse im Gesamtkostenvergleich zu erwarten sind. Es wird dabei sowohl eine energetische als auch eine wirtschaftliche Optimierung bei dem Produktionssteuerungsansatz Lüftungswärmeverluste durchgeführt. Im Anschluss ist zudem ein Ansatz, den tageszeitabhängigen Strompreis in die Optimierungen mit einzubeziehen, dargestellt, um eine Senkung der Stromkosten zu erreichen. Darüberhinaus wird noch gezeigt, wie durch eine Synchronisation der Maschinen eine Senkung der Leistungsspitzen der Gesamtanlage möglich ist. Zum Schluss findet eine erste Untersuchung statt, ob mit den Steuerungsansätzen auch eine Anpassung an die Energiebereitstellung mit Erneuerbaren Energien möglich ist. Eine Übersicht des Experimentplans ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Experimentplan

<b>Experimentsatz</b>	<b>Beschreibung</b>
1	Energetische Optimierung am Standort Stuttgart
2	Energetische Optimierung am Standort Stuttgart mit Anpassungen bei den Ansätzen Trend und Tag/Nacht
3	Energetische Optimierung am Standort Stuttgart mit Anpassungen bei den Ansätzen Trend und Tag/Nacht und höheren Energiepreisen
4	Energetische Optimierung am Standort Tallinn mit Anpassungen bei den Ansätzen Trend und Tag/Nacht
5	Energetische Optimierung am Standort Tallinn mit Anpassungen bei den Ansätzen Trend und Tag/Nacht und höheren Energiepreisen
6	Kostenoptimierung des Ansatzes Lüftungswärmeverluste am Standort Stuttgart und höheren Energiepreisen
7	Kostenoptimierung des Ansatzes Lüftungswärmeverluste am Standort Tallinn und höheren Energiepreisen
8	Stromkostenoptimierung
9	Leistungsspitzenoptimierung
10	Anpassung an Erneuerbare Energien

## 10.5 Ergebnisse

### 10.5.1 Energetische Optimierung

#### Experimentsatz 1, Standort Stuttgart

Bei dem ersten Experimentsatz wird der Heizenergieverbrauch untersucht. Der Standort ist Stuttgart und der Simulationszeitraum sind die ersten vier Wochen des Monats Januar der gewählten Klimadaten.

Bei dem Vergleich des Energieverbrauchs für die Heiztechnik (Abbildung 47) ist zu erkennen, dass der Energieverbrauch bei den klassischen Prioritätsregeln geringfügig voneinander abweicht. Dies ist weitestgehend zufällig und hängt von dem vorhandenen Auftragspektrum ab. Bei Experimenten mit anderen Zufallszahlenströmen ist nicht zu erkennen, dass grundsätzlich die Prioritätsregel „Kürzeste Operationszeit“ zum niedrigsten Energieverbrauch geführt hat. Es ist auch verständlich, da keine direkte Zuordnung der Prioritätsregel mit dem Energieverbrauch besteht.

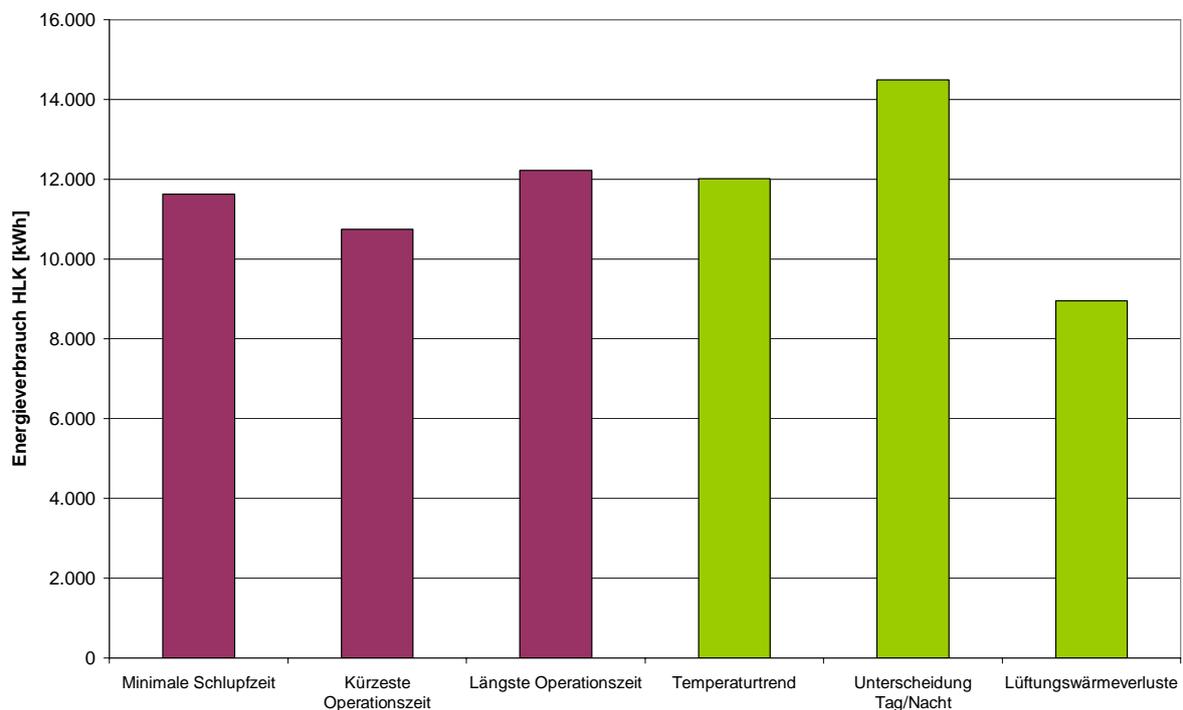


Abbildung 47: Heizenergieverbrauch am Standort Stuttgart

Weiterhin ist zu erkennen, dass nur der Ansatz über Lüftungswärmeverluste zu signifikanten Einsparungen führt. Grundsätzlich sind die anderen beiden energieeffizienten Ansätze bei Betrachtung einer einzigen Maschine sinnvoll. Bei mehreren Maschinen, wie in dem gewählten Beispiel, führen die Ansätze aber zu einer Konzentration der Bearbeitung der emissionsreichen Produkte in einem bestimmten Zeitraum, wodurch sehr hohe Lüftungsraten notwendig sind und somit wiederum ein hoher Heizenergiebedarf besteht. Insgesamt kann dadurch keine Einsparung erzielt werden, sondern es sind sogar höhere Energieverbräuche zu beobachten.

### Experimentsatz 2, Standort Stuttgart

Bei dem zweiten Experimentsatz wird bei den Ansätzen Temperaturtrend und Unterscheidung Tag/Nacht die Vorgehensweise auf eine Anzahl von Maschinen begrenzt. Es werden demnach nur x Maschinen nach dem Verfahren eingeplant und die restlichen Maschinen werden mit emissionsarmen Produkten beplant. Die jeweilige Anzahl der Maschinen, auf die das Verfahren begrenzt wird, ist experimentell bestimmt worden. Die Untersuchungen werden wiederum am Standort Stuttgart im Januar durchgeführt. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse.

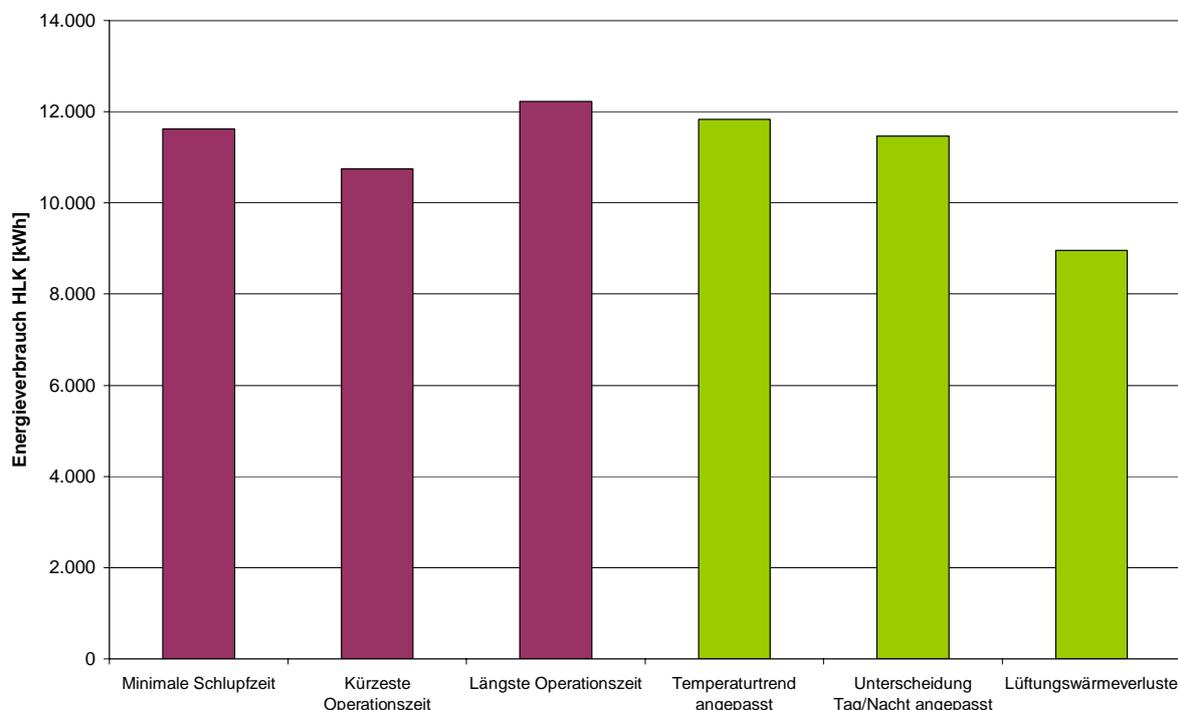


Abbildung 48: Heizenergieverbrauch am Standort Stuttgart nach der Anpassung

Die beschriebene Anpassung führt zu besseren Ergebnissen bei den beiden angepassten Ansätzen, jedoch kann nicht gegenüber allen klassischen Prioritätsregeln eine Einsparung erzielt werden.

Der Ansatz Lüftungswärmeverluste führt dagegen zu Energieeinsparungen von 16,5 bis 26,5 % im Vergleich zu den klassischen Verfahren mit Prioritätsregeln. In Abbildung 49 ist der Energiebedarf der Prioritätsregel kürzeste Operationszeit und dem Ansatz Lüftungswärmeverluste während einer Woche dargestellt. Zusätzlich ist die jeweils vorhandene Außentemperatur aufgeführt. An diesem Beispiel ist zu sehen, dass der neue Ansatz nicht zu jedem Zeitpunkt einen niedrigeren Energiebedarf erreicht, sondern vielmehr nur kurze Spitzenwerte erreicht, wenn emissionsreiche Produkte ausgewählt werden. Die Prioritätsregel dagegen erreicht ein eher konstantes höheres Niveau, durch die Vorwärtsterminierung wird aber zum Ende der Woche nahezu keine Energie mehr benötigt, da aufgrund der im Beispiel ausgewählten geringeren Last schon vorher alle Aufträge abgearbeitet sind und somit keine Produktion mehr stattfindet. In diesem Fall ist dies aufgrund des fallenden Temperaturtrends sogar von Vorteil.

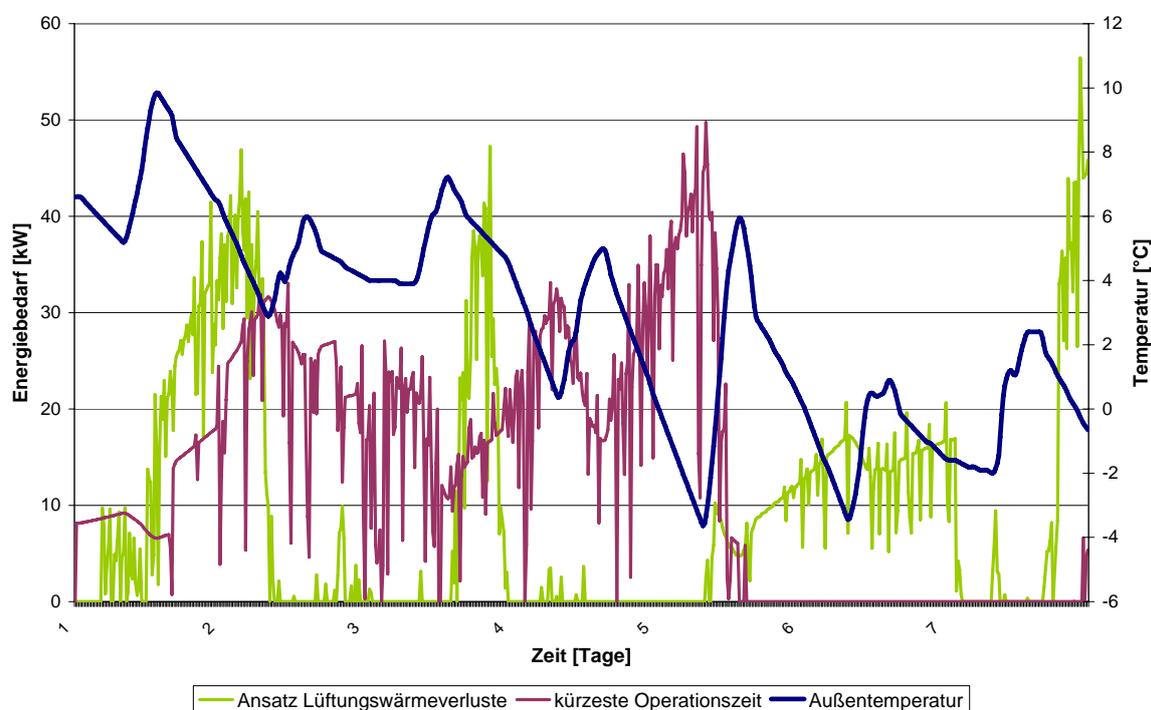


Abbildung 49: Vergleich des Energiebedarfs verschiedener Ansätze über eine Woche

Die bei dem Ansatz Lüftungswärmeverluste gewählten Parameter werden mit Hilfe von Optimierungsverfahren ermittelt. In Abbildung 50 ist der Verlauf der Ergebnisse während der Optimierung dargestellt.

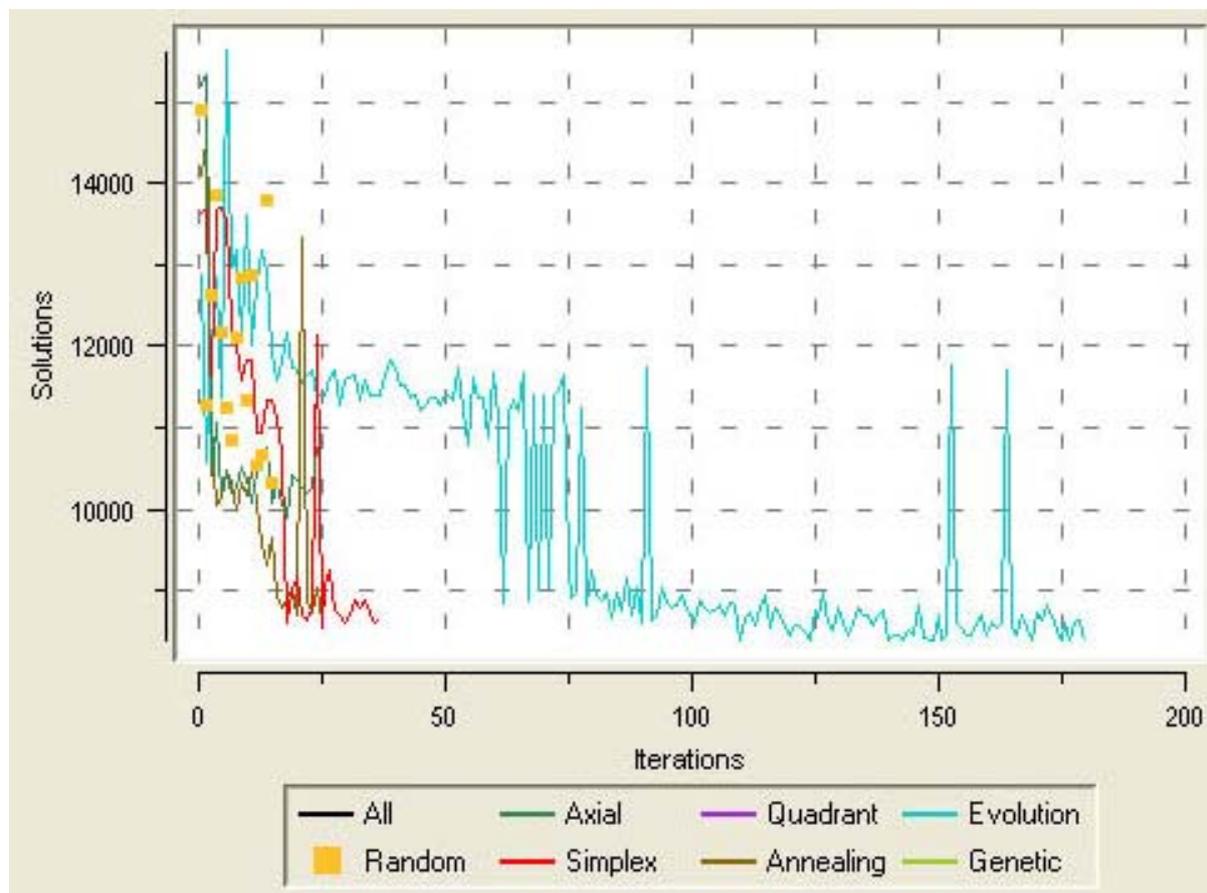


Abbildung 50: Ergebnisverlauf während der Optimierung

Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die verschiedenen Optimierungsverfahren, wobei in x-Richtung die einzelnen Versuche und in y-Richtung der erzielte Heizenergieverbrauch aufgeführt sind. In dem dargestellten Beispiel ist zu erkennen, dass das beste Ergebnis mithilfe der Evolutionsstrategie ermittelt worden ist. Hierfür ist allerdings eine hohe Anzahl von Experimenten nötig. Gute Ergebnisse werden erst nach etwa 100 Experimenten erreicht. Bei einer mittleren Rechenzeit von 45 Minuten hat dies eine Dauer von etwa 75 Stunden auf einem Rechner zur Folge. Durch eine Parallelisierung kann diese Rechenzeit jedoch reduziert werden.

Es ist ebenfalls zu sehen, dass das Ergebnis sehr stark von den gewählten Parametern abhängt. Die Ergebnisse bewegen sich zwischen ca. 9.000 kWh und ca. 15.000 kWh. Es ist da-

her besonders auf die optimale Festlegung der Parameter des Ansatzes Lüftungswärmeverluste zu achten.

Das Beispiel zeigt, dass grundsätzlich eine Energieeinsparung mithilfe der Produktionssteuerung möglich ist. Es stellt sich die Frage, inwieweit diese Verfahren die logistischen Zielgrößen:

- Durchlaufzeit,
- Bestand,
- Auslastung und
- Termintreue

beeinflussen. Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der einzelnen logistischen Ziele dargestellt. Nur die Betrachtung der Auslastung wird nicht aufgeführt, da bei selbem Auftragspektrum und gleicher Maschinenzahl eine identische mittlere Auslastung besteht. Es kann nur eine Verschiebung innerhalb der Maschinen stattfinden. Diese Verschiebung kann über die Standardabweichung der Auslastung dargestellt werden.

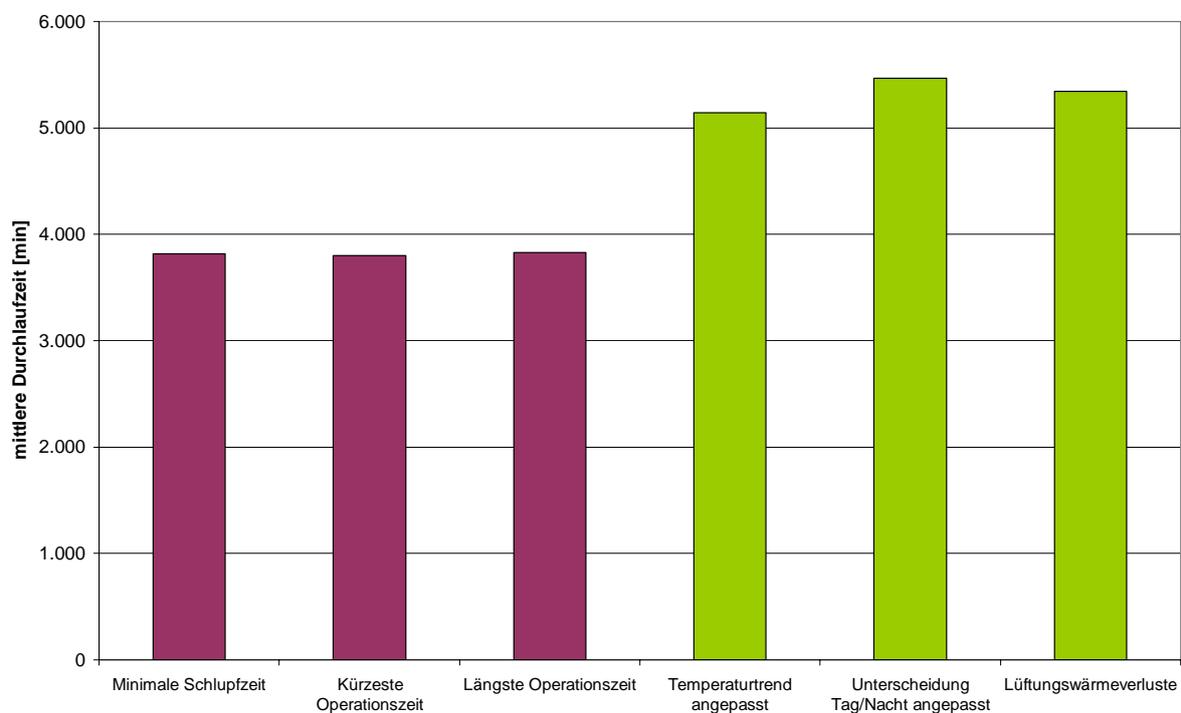


Abbildung 51: Mittlere Durchlaufzeiten

Die mittlere Durchlaufzeit (Abbildung 51) ist bei allen drei neuen Ansätzen deutlich höher. Es sind Steigerungen von 35 % vorhanden. Dies basiert hauptsächlich darauf, dass bei den klassischen Verfahren eine Rückwärtsterminierung durchgeführt wird, um eine möglichst kurze Durchlaufzeit zu erreichen. Hingegen nutzen die energieeffizienten Ansätze den Zeitraum zwischen Vorwärts- und Rückwärtsterminierung, wodurch zwangsläufig höhere Durchlaufzeiten zu erkennen sind. Dies ist auch auf den mittleren Bestand (Abbildung 52) übertragbar.

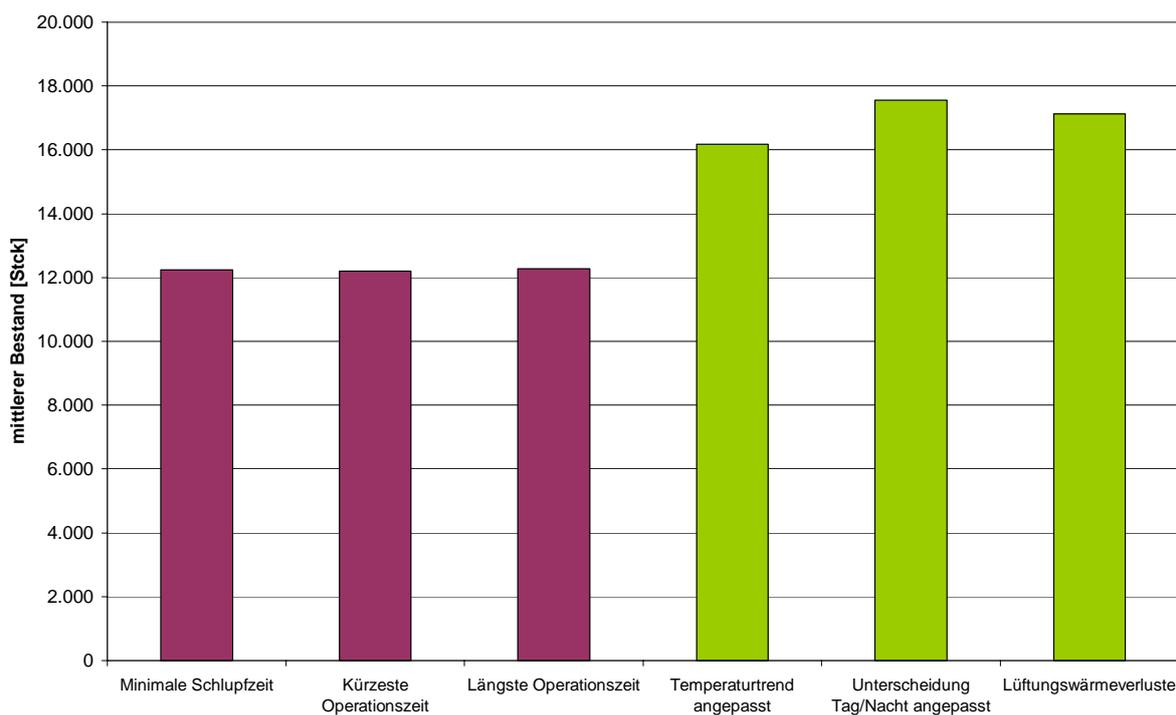


Abbildung 52: Mittlerer Bestand

Die Abweichungen bei der Termintreue (Abbildung 53) sind sehr gering. Dies ist auch damit zu begründen, dass die Last des Modells bewusst sehr gering gewählt ist. Mit Ausnahme des Ansatzes Temperaturtrend, der bei steigenden Temperaturen sehr spät fertigt, wodurch es bei größeren Störungen leicht zu Terminabweichungen kommen kann. Es kann aber mit Hilfe von entsprechenden Sicherheiten in der Planung die Termintreue erhöht werden

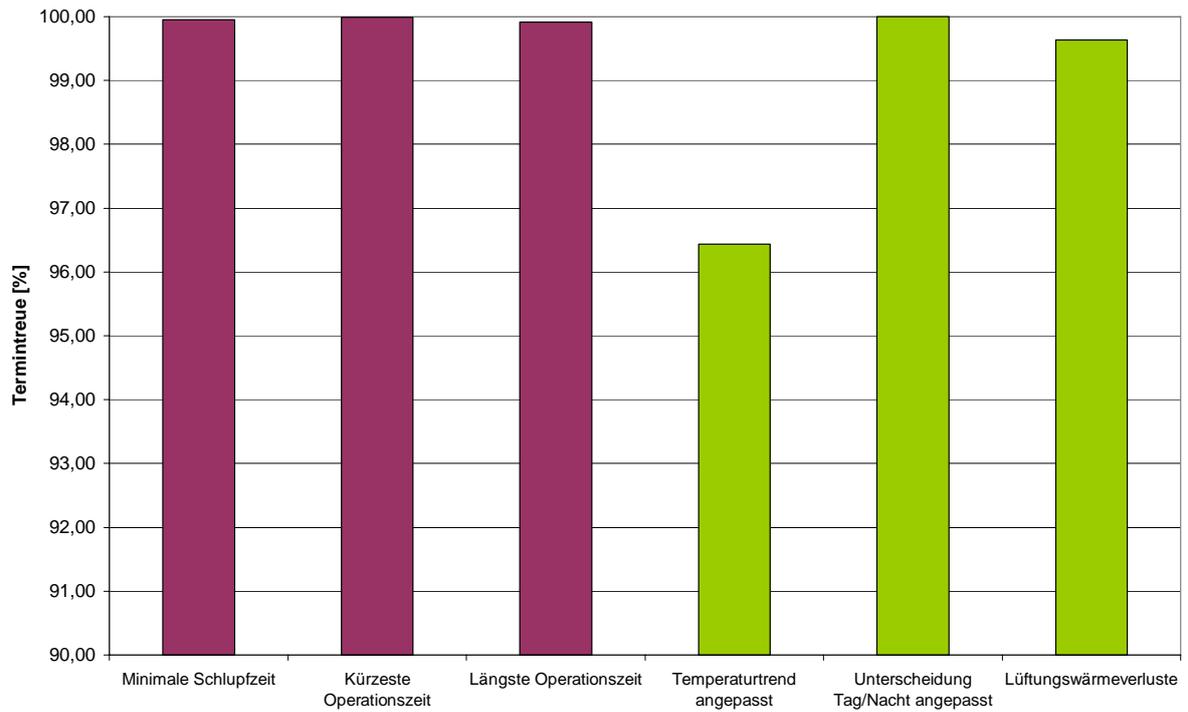


Abbildung 53: Termintreue

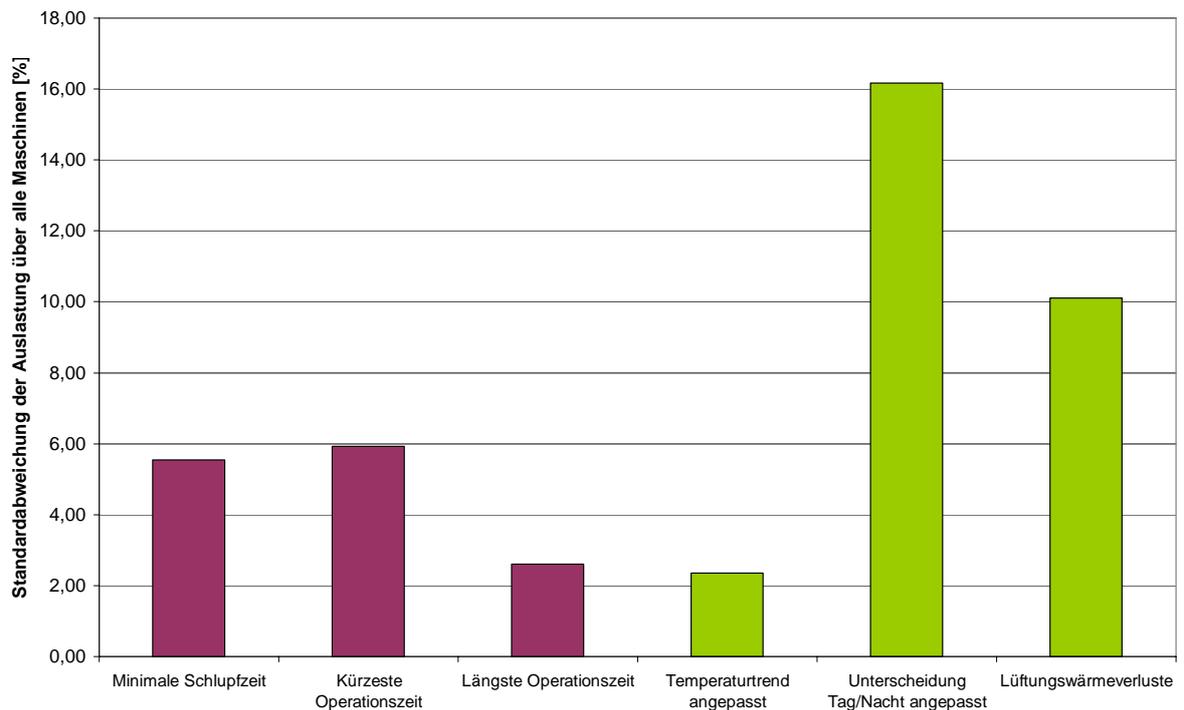


Abbildung 54: Standardabweichung der Auslastung

Die Abweichungen der Auslastung innerhalb der Maschinen (Abbildung 54) fällt besonders bei den Ansätzen Tag/Nacht und Lüftungswärmeverluste sehr deutlich aus. Bei einer nicht

ausgeglichene Anzahl von emissionsreichen und emissionsarmen Aufträgen entstehen Zeiträume, in denen nur eine bestimmte Anzahl von Maschinen verwendet wird und somit eine stark unterschiedliche Auslastung zu betrachten ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Reduzierung des Heizenergieverbrauchs mit dem Ansatz Lüftungswärmeverluste gegenüber klassischen Prioritätsregeln möglich ist. Die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit und Bestand weisen allerdings deutlich schlechtere Ergebnisse aus. Abbildung 55 stellt die Ergebnisse nochmals in einer Übersicht dar. Es ist allerdings zu untersuchen, ob aus wirtschaftlicher Sicht ein besseres Ergebnis erzielt werden kann.

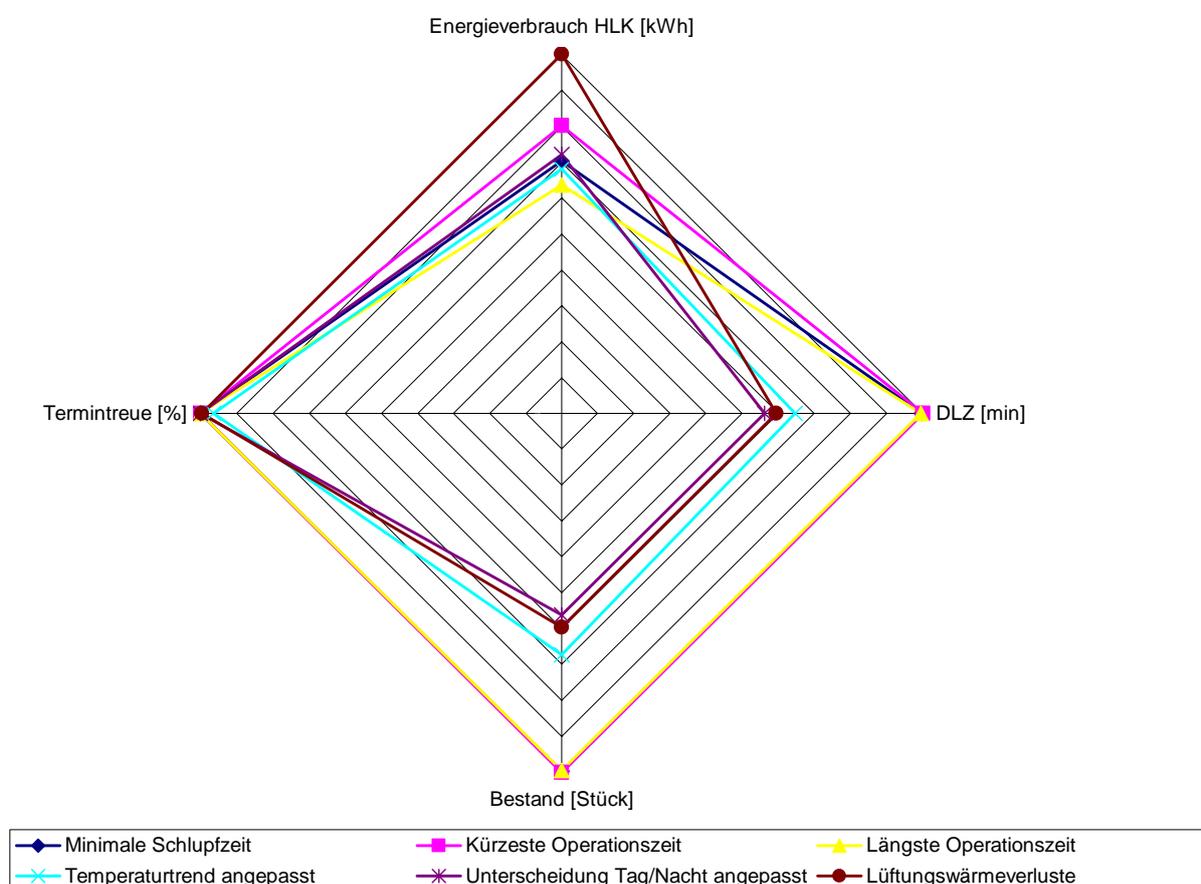


Abbildung 55: Übersicht der einzelnen Kennzahlen

## 10.5.2 Wirtschaftliche Optimierung

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung werden die von der Produktionssteuerung beeinflussten Kosten betrachtet. Es wird jeweils der Mittelwert der:

- Heizkosten,
- Lagerhaltungskosten und
- Rüstkosten

je Produkt berechnet und verglichen.

### Experimentsatz 2, Standort Stuttgart

Es wird wieder der in Kapitel 10.5.1 verwendete Experimentsatz am Standort Stuttgart im Januar verwendet. Der verwendete Stundensatz der Mitarbeiter ist in Stuttgart 28,00 €/h (BLFU, 2002).

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse dargestellt.

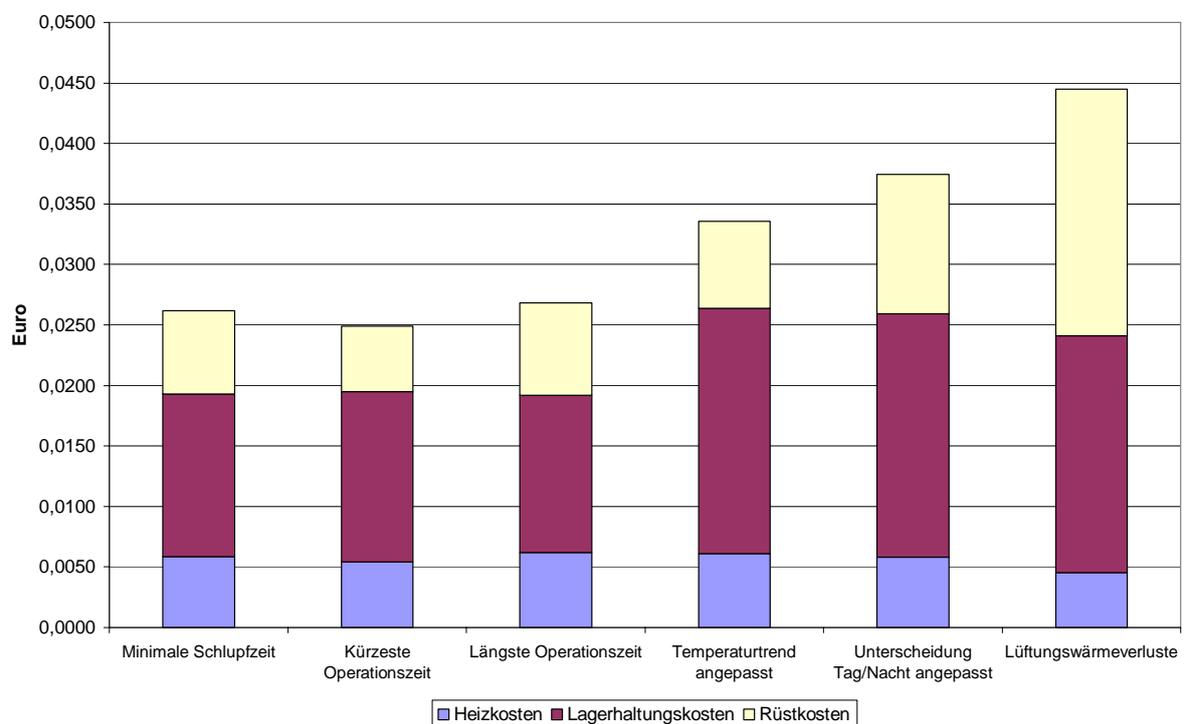


Abbildung 56: Kostenvergleich am Standort Stuttgart (Deutschland)

Die Ergebnisse zeigen, dass die energieeffizienten Ansätze kein Kostenoptimum erreichen. Die reduzierten Heizenergiekosten können die gesteigerten Rüst- und Lagerhaltungskosten

nicht ausgleichen. Während bei den Lagerhaltungskosten nur ein geringer Unterschied besteht, sind vor allem die Rüstkosten bei dem Ansatz Lüftungswärmeverluste deutlich höher. Dies resultiert vor allem aus den kleineren Losgrößen, die durch eine Anpassung an die Temperaturschwankungen nötig sind.

### Experimentsatz 3, Standort Stuttgart, höhere Energiekosten

Es ist zu untersuchen, ob bei höheren Energiekosten (150 % der aktuellen Energiekosten) ein besseres Ergebnis erreicht werden kann. Die Experimente werden ebenfalls am Standort Stuttgart im Januar durchgeführt. Der Mitarbeiterstundensatz entspricht wiederum 28,00 €/h.

In Abbildung 57 ist nur eine geringe Annäherung bei den gesamten beeinflussbaren Kosten zu erkennen.

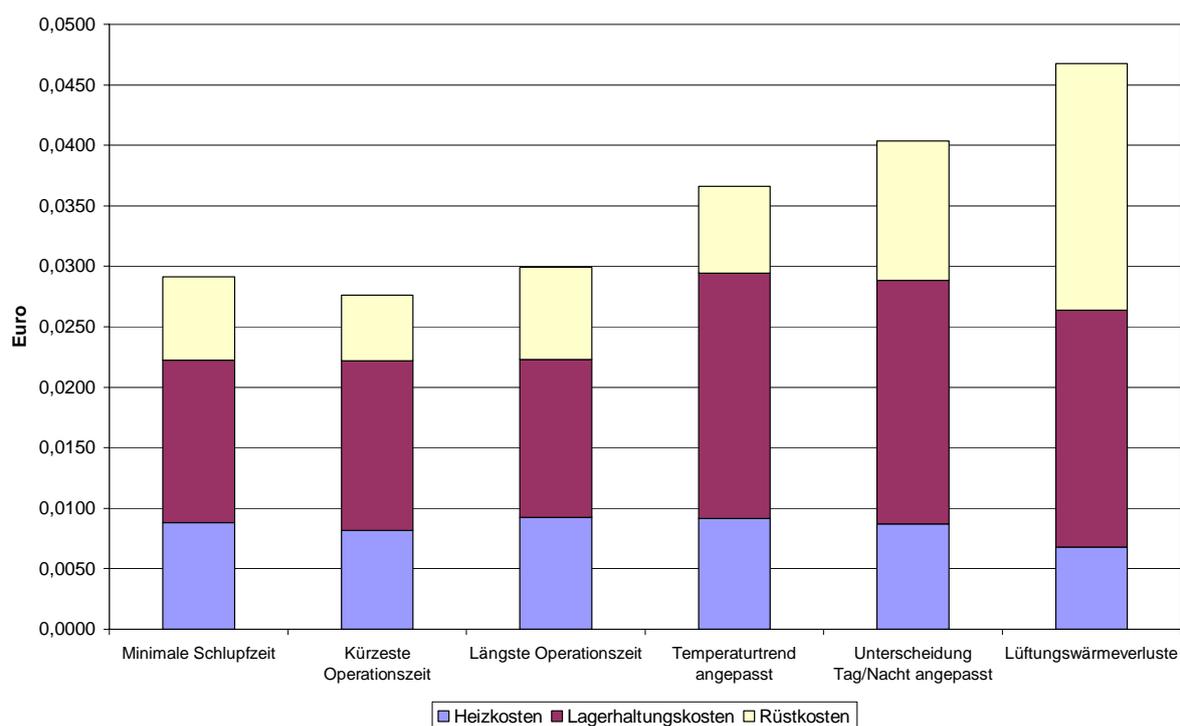


Abbildung 57: Kostenvergleich am Standort Stuttgart (Deutschland) bei höheren Energiekosten

### Experimentsatz 4, Standort Tallinn

An einem Standort mit geringeren Lohnkosten und gleichzeitig niedrigeren Temperaturen könnte besonders der Nachteil der deutlich höheren Rüstkosten ausgeglichen werden. Im

Folgendes ist daher der Standort Tallinn (Estland) untersucht worden. Hier werden ebenfalls die ersten vier Wochen im Januar simuliert. Der Mitarbeiterstundensatz beträgt in Tallinn 4,50 €/h (Davey, 2005).

Bis auf die Klima- und Mitarbeiterkostendatensätze werden bei den Experimenten die gleichen Daten verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 58 aufgeführt.

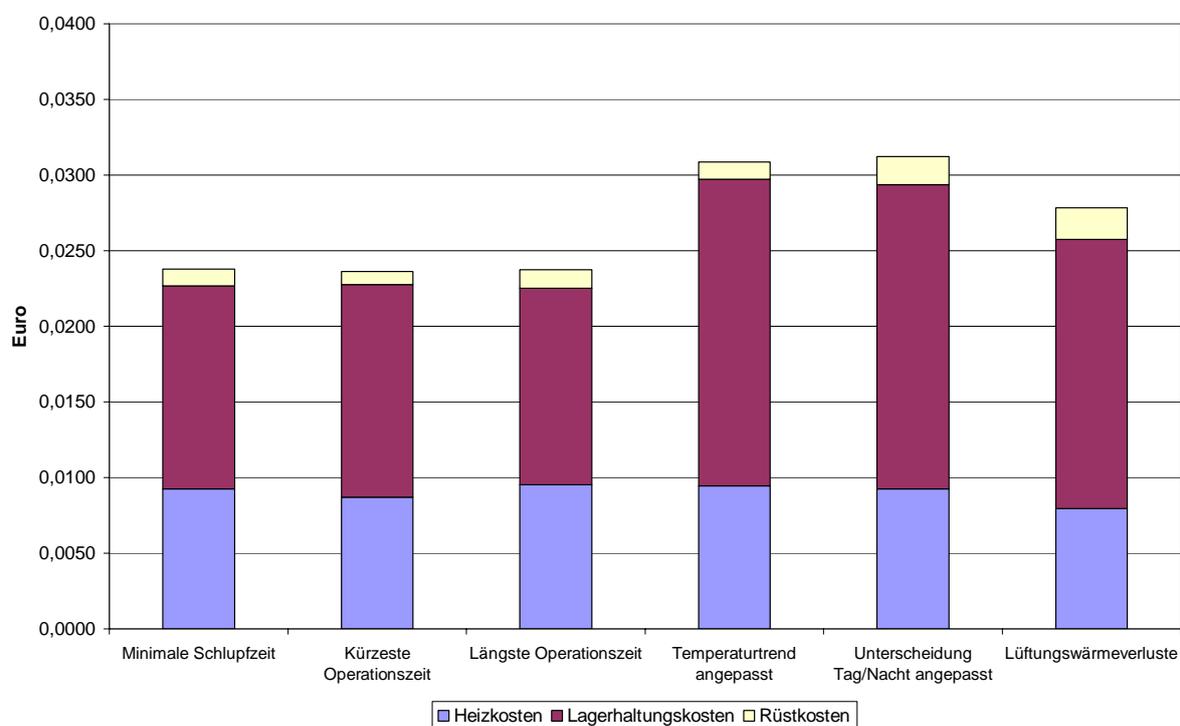


Abbildung 58: Kostenvergleich am Standort Tallinn (Estland)

Bei diesem Vergleich ist ein deutlich geringerer Unterschied zu erkennen, da der Aufwand für Rüstkosten keinen signifikanten Anteil mehr darstellt. Die Kostensteigerungen sind nur noch gering.

#### Experimentensatz 5, Standort Tallinn, höhere Energiekosten

Analog zu den Untersuchungen am Standort Stuttgart wird auch am Standort Tallinn eine Experimentreihe mit höheren Energiekosten durchgeführt. Der Mitarbeiterstundensatz beträgt wiederum 4,50 €/h.

Die Kostendifferenz von den energieeffizienten Ansätzen zu den klassischen Verfahren fällt noch geringer aus als bei dem vorigen Experimentensatz (Abbildung 59).

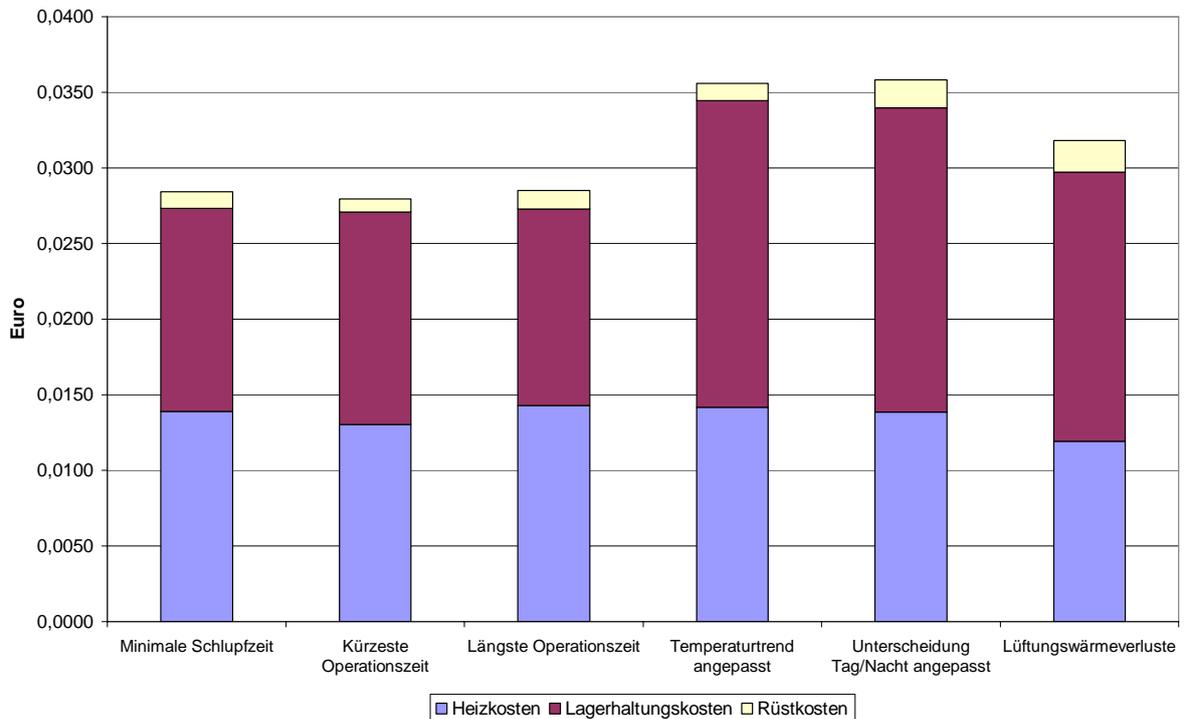


Abbildung 59: Kostenvergleich am Standort Tallinn (Estland) bei höheren Energiekosten

#### Experimentsatz 6, Standort Stuttgart, höhere Energiekosten, Kostenoptimierung

Bei den bisher dargestellten Beispielen erfolgte immer eine Optimierung der Parameter des Ansatzes Lüftungswärmeverluste hinsichtlich des Energieverbrauchs. Es ist allerdings auch möglich, als Zielgröße die beeinflussbaren Kosten zu wählen. Hierdurch kann ein Kompromiss aus Energieverbrauch und Rüst- bzw. Lagerhaltungskosten erzielt werden.

Zunächst wird diese Optimierung wieder am Standort Stuttgart im Januar durchgeführt. In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der kostenoptimierten Variante im Vergleich zu den klassischen Verfahren und der energieoptimierten Variante dargestellt. Bei leicht höherem Energieverbrauch ist besonders eine Reduzierung der Rüstkosten zu sehen. Dies resultiert vor allem aus einer höheren Losgröße. Es ist allerdings für den Standort Deutschland auch unter steigenden Energiekosten kein Kostenoptimum zu erzielen.

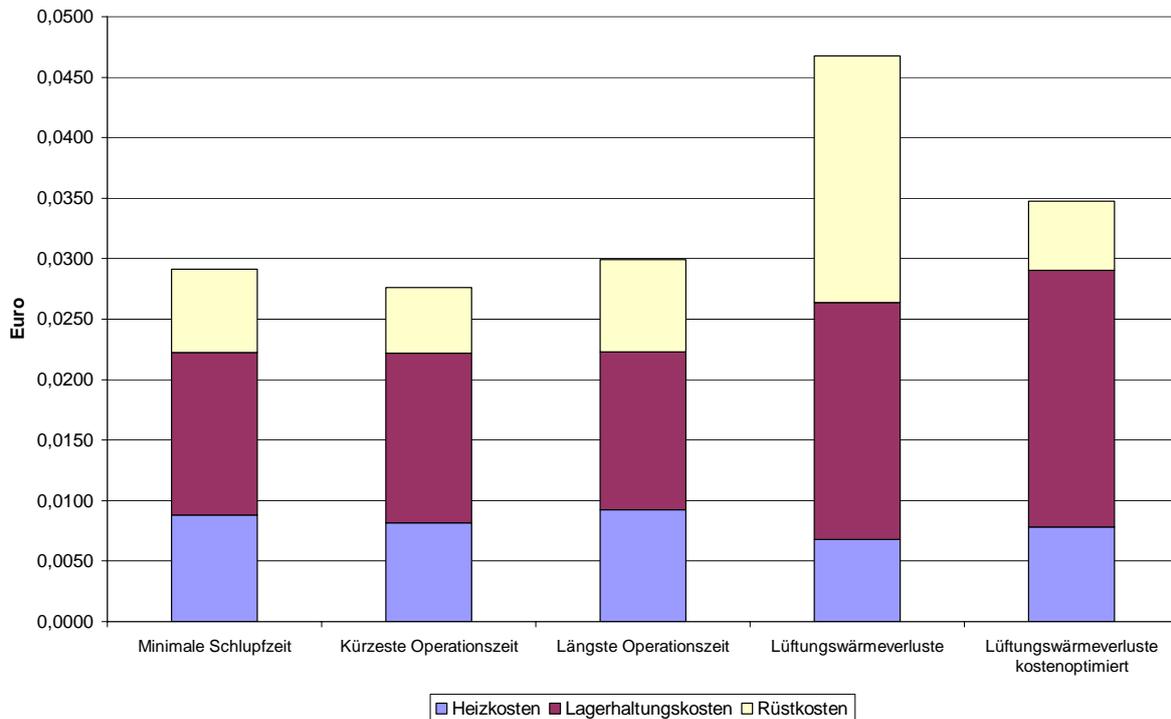


Abbildung 60: Kostenvergleich am Standort Stuttgart (Deutschland) mit kostenoptimierter Steuerung und höheren Energiekosten

Theoretisch betrachtet erfolgt bei dem gewählten Beispiel am Standort Deutschland ein Ausgleich der Kosten erst bei einem Energiepreis von ca. 0,17 €/kWh. Dies entspricht fast einer Verdreifachung des angenommenen Preises.

#### Experimentsatz 7, Standort Tallinn, höhere Energiekosten, Kostenoptimierung

Bei den schon geringeren Kostenunterschieden am Standort Tallinn kann eventuell durch einen kostenoptimierten Ansatz eine kostenoptimale Lösung erzielt werden. Abbildung 61 zeigt, dass hierdurch zwar eine Annäherung erfolgen kann, aber ebenfalls kein kostenoptimales Ergebnis erreicht wird. Bei der theoretischen Betrachtung erfolgt in Estland allerdings schon bei einem Energiepreis von ca. 0,11 €/kWh ein Ausgleich der Kosten. In diesem Fall ist es nicht mal eine Verdoppelung der aktuellen Energiekosten.

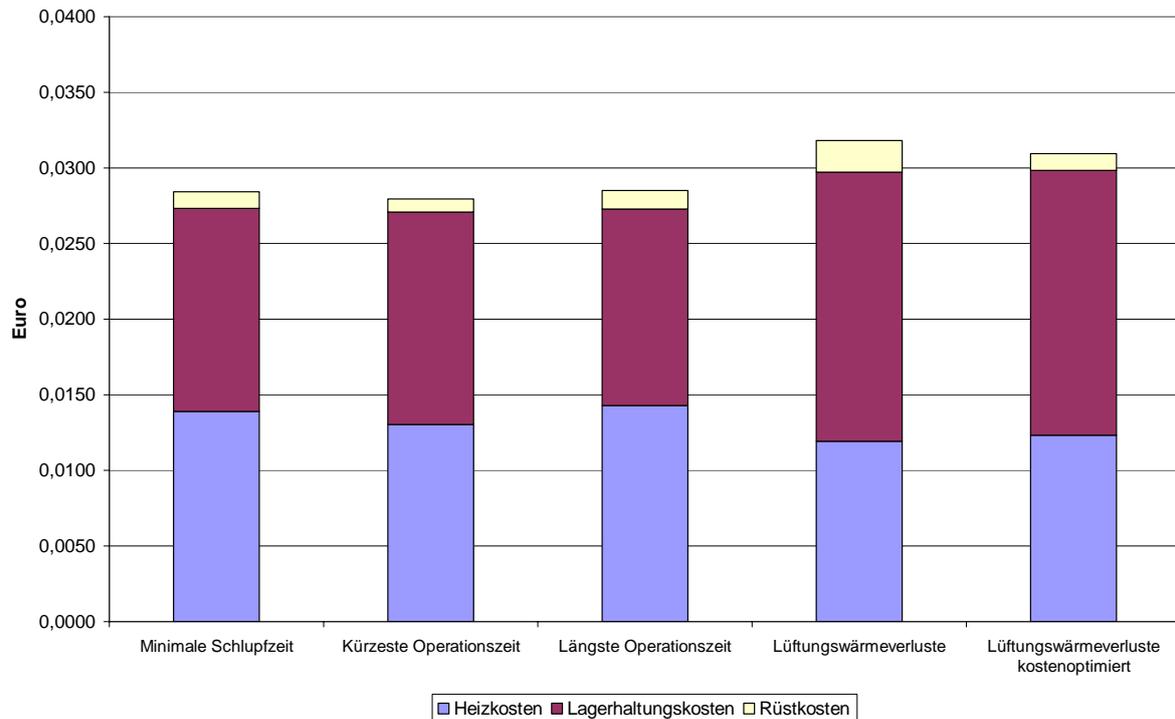


Abbildung 61: Kostenvergleich am Standort Tallinn (Estland) mit kostenoptimierter Steuerung und höheren Energiekosten

### 10.5.3 Optimierung Stromkosten

#### Experimentsatz 8, Stromkostenoptimierung

An der europäischen Strombörse werden schon heute tageszeitabhängige Strompreise gehandelt. Es liegen je Stunde unterschiedliche Preise vor. Aktuell werden diese nicht an die Endverbraucher weitergegeben. Bei Industrieunternehmen findet meist nur eine Unterscheidung von Tag- und Nachtstrom statt. Die Schwankungen über einen Tag sind aber, wie auch Abbildung 62 zeigt, sehr stark.



Abbildung 62: Beispielhafter Strompreisverlauf über einen Tag (EEX, 2005)

Diese stark schwankenden Strompreise können ebenfalls bei der Produktionssteuerung berücksichtigt werden. Ausgehend von dem Ansatz der Lüftungswärmeverluste findet die Auswahl über den zu erwartenden Strompreis statt. Hier besteht sogar ein Vorteil, da die Strompreise im Gegensatz zur Außentemperatur für die nächsten Stunden bekannt sind. Die Priorität berechnet sich analog nach der folgenden Formel:

$$SK = \frac{\sum_{i=t}^{t+BZ} SP_i}{BZ} \cdot \int_{i=0}^{BZ} P_i dt$$

Formel 21: Berechnung der Priorität beim Ansatz Stromkosten

Der Simulationszeitraum entspricht wiederum den ersten vier Wochen im Januar. Der oben beschriebene Ansatz über die Stromkosten wird dabei mit klassischen Prioritätsregeln verglichen. In Abbildung 63 sind die Ergebnisse der Stromkostenoptimierung dargestellt. Es ist zu sehen, dass eine Reduzierung der Stromkosten um etwa 17 % erreicht werden kann. Auch hier entsteht ein erhöhter Rüstaufwand.

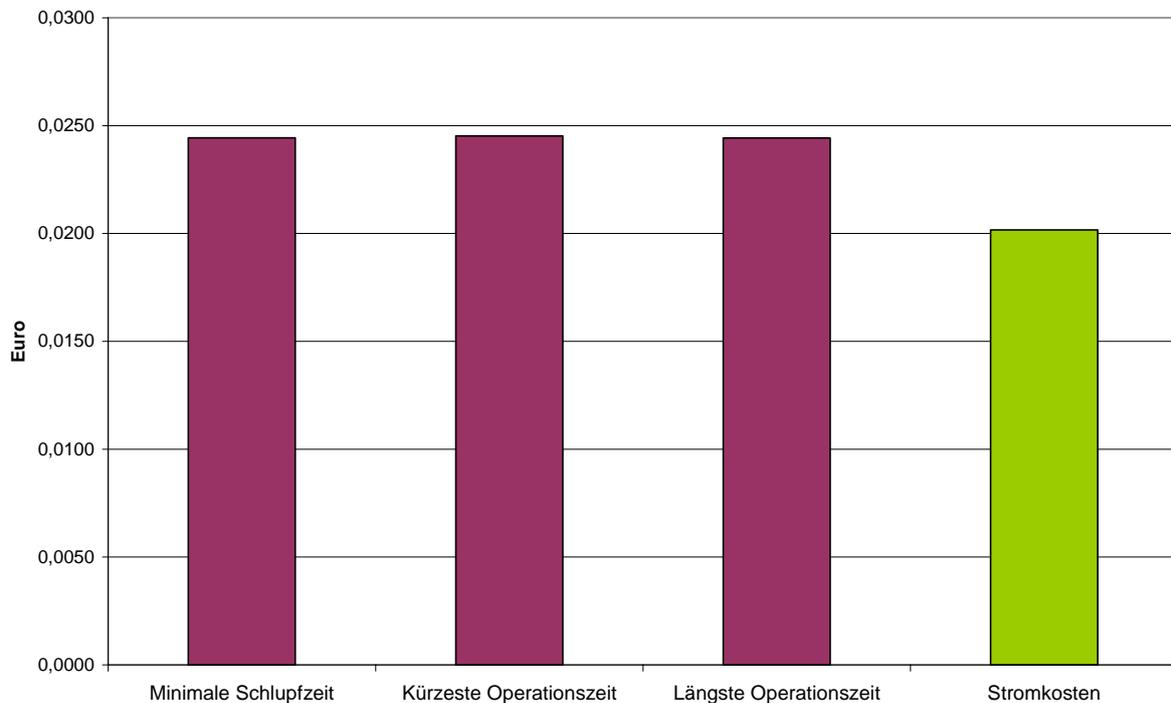


Abbildung 63: Kostenvergleich bei der Stromkostenoptimierung

#### Experimentsatz 9, Leistungsspitzenoptimierung

Neben dem Mengenstrompreis, dem sogenannten Arbeitspreis, richten sich die Stromkosten bei Industrieunternehmen auch nach dem Leistungspreis. Die Grundlage für den Leistungspreis ist der in der Abrechnungsperiode höchste Leistungswert. Dieser Wert wird als 15 Minuten Mittelwert berechnet (Wortberg et al., 1997).

Diese Preisberechnung kann ebenfalls durch die Produktionssteuerung berücksichtigt werden, in dem versucht wird, die einzelnen Maschinen zu synchronisieren, um Spitzenlasten zu reduzieren. In Abbildung 64 und Abbildung 65 sind die Leistungsverläufe innerhalb eines Tages ohne und mit Optimierung dargestellt. An den Diagrammen ist zu sehen, dass eine Reduzierung der Spitzenlasten um etwa 30 % erreicht wird. Diese Reduzierung kann aber noch größer ausfallen, da der theoretisch erreichbare Wert 250 kW ist. Er ist allerdings in der untersuchten Simulationszeit aufgrund der stochastischen Störungen nicht aufgetreten. Es wäre somit eine Reduzierung von bis zu 48 % in dem gewählten Beispiel möglich. Bei einem leicht veränderten Beispielmodell wurde eine Reduzierung um 40 % erreicht (Hesselbach, Junge, 2005c).

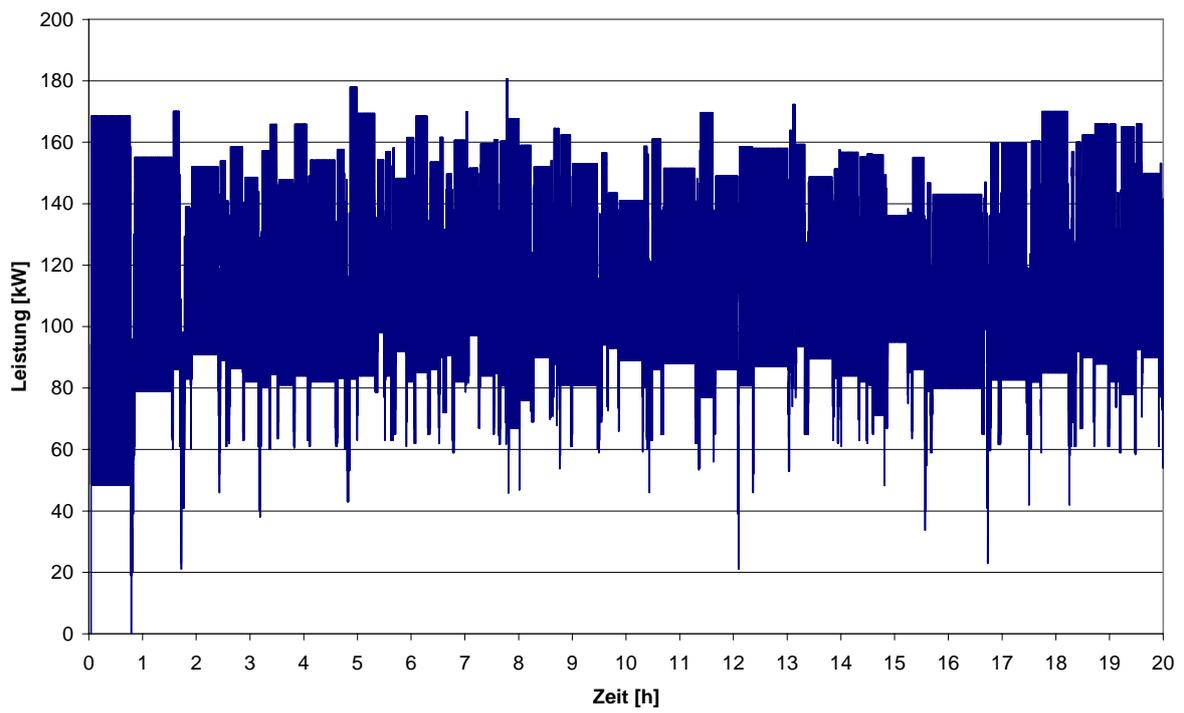


Abbildung 64: Leistungsverlauf ohne Optimierung

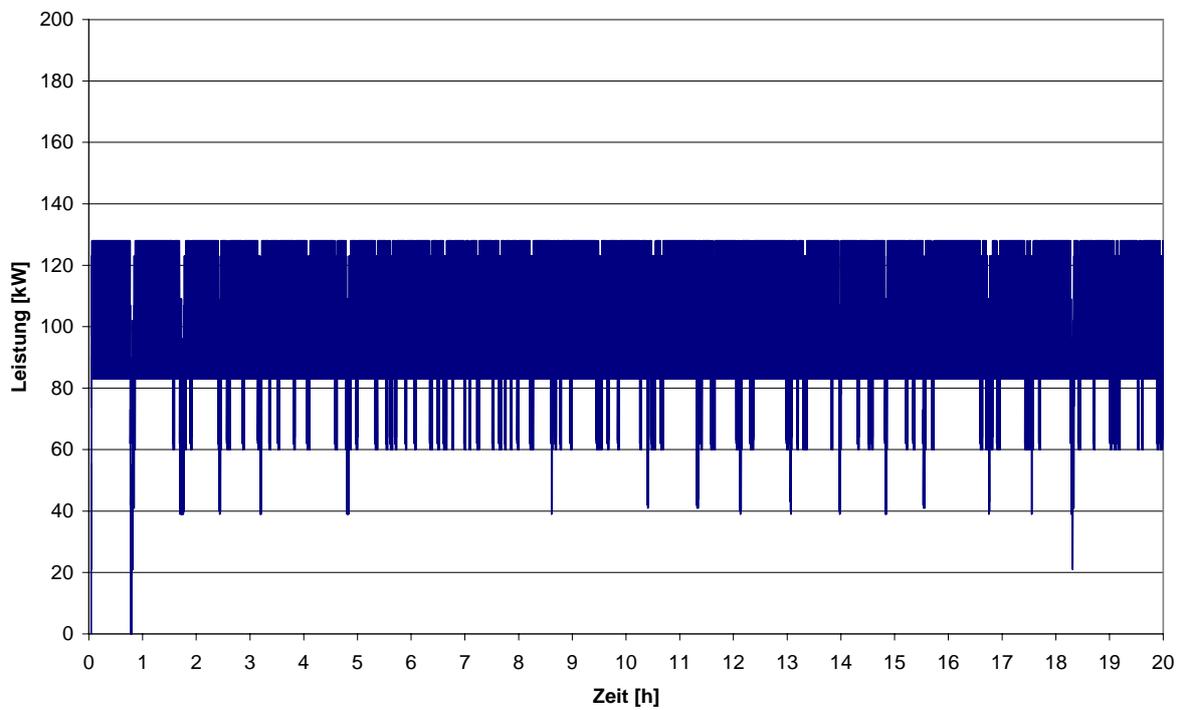


Abbildung 65: Leistungsverlauf mit Optimierung

## Experimentatz 10, Erneuerbare Energien

Eine Umstellung auf erneuerbare Energien führt neben steigenden Energiekosten auch zu einer verstärkt angebotsorientierten Energiebereitstellung. Der vorgestellte Ansatz für eine Optimierung der Stromkosten kann ebenfalls dazu genutzt werden, den Energiebedarf einer Produktionsanlage abhängig von der angebotenen Energie zu steuern. Somit ist es möglich, die Anzahl an Energiespeichern zu reduzieren, da eine Anpassung an die Energiebereitstellung erfolgt. Um dies zu erreichen, wird der Strompreis durch das invertierte Energieangebot berechnet. Hohe Bereitstellungsmöglichkeiten stellen beispielsweise niedrige Preise dar und umgekehrt. In Abbildung 66 sind Energieangebot und der daraus berechnete Strompreis für einen Zeitbereich mit einer Energieversorgung aus Wind und Sonne dargestellt.

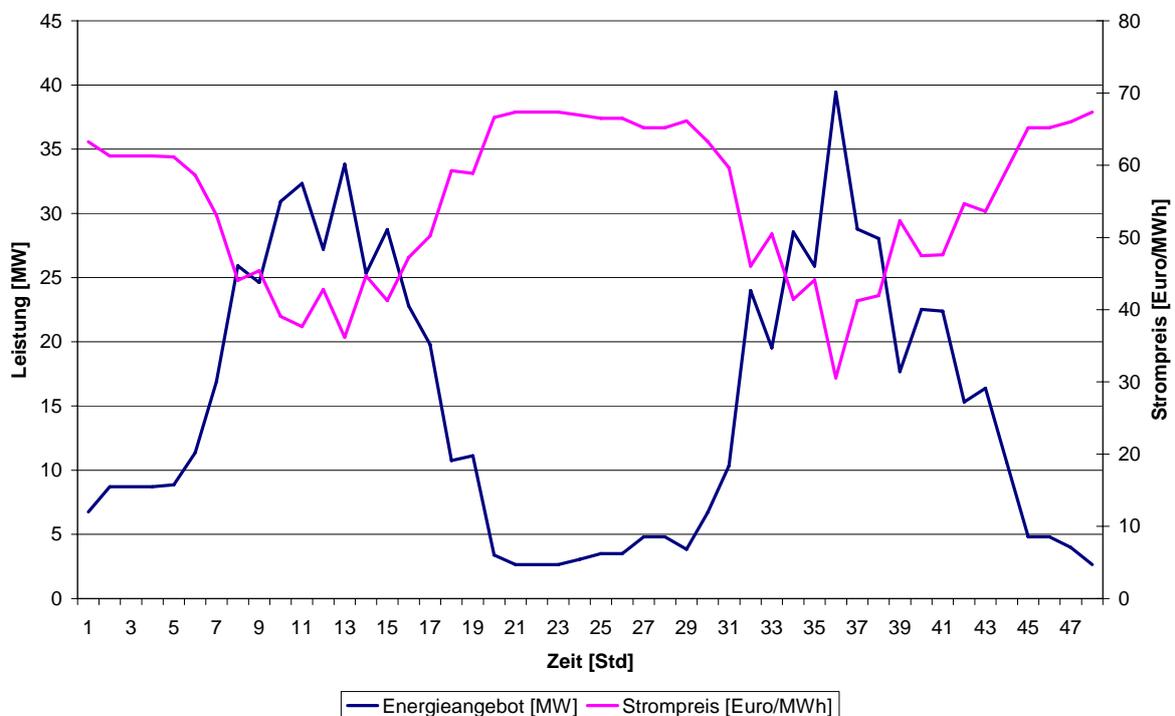


Abbildung 66: Energieangebot und Strompreis

Das Ergebnis des Simulationsexperiments ist in Abbildung 67 dargestellt. Es findet keine genaue Angleichung statt, doch ist ein angepasstes Verhalten zu erkennen. Die Anpassung ist bei dem gewählten Beispiel aber schwer, da keine Grundlastabdeckung durch z. B. Biomasse oder Wasserkraft vorhanden ist. Grundsätzlich kann eine derartige Steuerung aber eine Anpassung erreichen und somit den Unterschied zwischen Angebot und Nachfrage reduzieren.

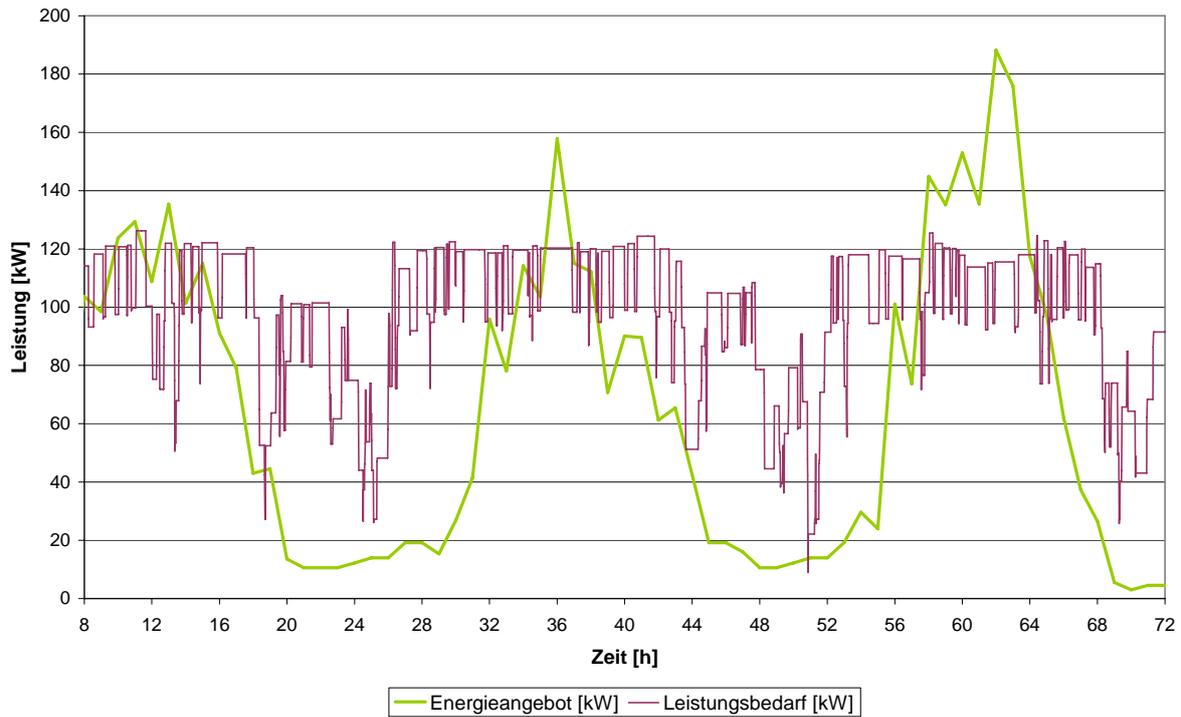


Abbildung 67: Energieangebot und Leistungsbedarf

#### 10.5.4 Vergleich und Bewertung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass mithilfe der Produktionssteuerung eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs von bis zu 26,5 % möglich ist. Der vorgestellte Ansatz Lüftungswärmeverluste führt zu den besten Ergebnissen. Es wird allerdings bei den logistischen Zielgrößen wie Durchlaufzeit und Bestand ein schlechteres Ergebnis erzielt. Bei einer Kostenbetrachtung wird deutlich, dass die Optimierung hinsichtlich des Energieverbrauchs zu höheren Rüst- und Lagerhaltungskosten führt. Dies liegt vor allem an den benötigten kleineren Losgrößen zur Anpassung an den Temperaturverlauf und dem Ausnutzen des Zeitraums zwischen Vorwärts- und Rückwärtsterminierung.

In Ländern mit niedrigen Lohnkosten werden bei höheren Energiekosten und einer wirtschaftlichen Optimierung mithilfe der Steuerungsansätze nahezu gleich hohe Kosten erreicht und der Energiebedarf reduziert.

Die Methodik des Ansatzes Lüftungswärmeverluste eignet sich zudem, um tageszeitabhängige Stromkosten zu beachten und so die Stromkosten zu senken. Allerdings führt dies auch in diesem Fall zu einem erhöhten Rüst- und Lagerhaltungsaufwand. Weiterhin können durch

eine Synchronisierung der Maschinen die Spitzenwerte und somit der Leistungspreis gesenkt werden.

Die reale Umsetzung erscheint aber schwierig, da die benötigten Daten in den meisten Produktionsanlagen kaum oder nicht vorliegen. Zudem können viele in der Realität vorhandenen Randbedingungen dazu führen, dass bestimmte Anpassungen nicht möglich sind. Weiterhin hat auch das bestehende Auftragspektrum einen hohen Einfluss auf die Möglichkeiten zur Reduzierung des Energiebedarfs. Dies gilt es an Realbeispielen näher zu untersuchen.

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

Steigende Energiekosten haben zu der Überlegung geführt, die Energiekosten in das Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung aufzunehmen. Es wurde im Rahmen der Arbeit am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie untersucht, ob eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs mithilfe der Produktionssteuerung möglich ist.

Zur Untersuchung ist ein Simulationssystem, welches neben den Materialflüssen auch die Stoff- und Energieflüsse innerhalb der Produktion abbildet, prototypisch entwickelt worden. Insgesamt drei Ansätze für eine energieeffiziente Produktionssteuerung sind dargestellt und daraufhin an einem Beispielmodell untersucht worden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs von bis zu 26,5 % möglich ist. Allerdings hat dies schlechtere Ergebnisse bei den logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit und Bestand zur Folge. Bei einer wirtschaftlichen Betrachtung zeigt sich, dass am Standort Deutschland die dadurch höheren Lagerhaltungskosten und durch kleinere Losgrößen gestiegenen Rüstkosten gegenüber den eingesparten Energiekosten überwiegen. Auch eine Untersuchung eines Szenarios mit erhöhten Energiepreisen führt zu keinem wirtschaftlichen Optimum. An Standorten mit geringeren Lohnkosten und unter Berücksichtigung von steigenden Energiepreisen ist aber eine deutlich geringere Differenz zu den klassischen Prioritätsregeln zu erkennen. Bei der Verwendung der Minimierung der beeinflussbaren Kosten als Zielgröße der Optimierung können aber am Beispiel des Standortes Tallinn (Estland) nahezu gleich hohe Kosten erzielt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Aufnahme der Zielgröße Energie in das Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung durchaus sinnvoll ist.

Zudem eignen sich die vorgestellten Ansätze einer energieeffizienten Produktionssteuerung auch zur Anpassung an tageszeitabhängige Stromkosten bzw. eine angebotsabhängige Strombereitstellung.

Die schon gezeigten Einflüsse aufgrund niedrigerer Lohnkosten und klimatischer Bedingungen müssen ebenfalls weiter untersucht werden. Weiterhin ist auch eine Übertragung auf andere Branchen durchzuführen.

Mithilfe dieser Untersuchungen ist es möglich, eine Rasterkarte zu entwickeln, die darstellt, an welchen Standorten und in welcher Branche eine energieeffiziente Produktionssteuerung auch wirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden kann. Die dadurch ermittelten Standorte und Branchen stellen mithilfe der energieeffizienten Produktionssteuerung ein großes Potenzial zur Reduzierung des Energieverbrauchs und somit auch den Treibhausgasemissionen dar, ohne hohe Investitionen zu benötigen.

Eine Erweiterung der Verfahren um einen direkten Eingriff in die Maschinensteuerung kann zudem zusätzliches Potenzial darstellen. Mit einem Modell, welches auch die Stoff- und Energieströme der Maschinen simuliert, kann die Modellierung vereinfacht und die Möglichkeiten des Eingriffs auf die Maschinensteuerung untersucht werden.

Neben den weiteren Untersuchungen zur energieeffizienten Steuerung ist auch die Kopplung des Simulationssystems näher zu untersuchen. Die in der Arbeit durchgeführte prototypische Kopplung muss hinsichtlich der Kopplungsmethoden näher betrachtet werden. Es ist zu untersuchen, wie eine vom Simulator unabhängige Kopplung durchgeführt werden kann. Zudem stellt sich die Frage, bei welchen Aufgabenstellungen überhaupt eine Online-Kopplung erfolgen muss. Ein Vorgehensmodell, welches durch ein Kenngrößensystem den Entwickler unterstützt, ob und wie eine Kopplung erfolgen muss, erscheint dabei sinnvoll.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit .....	5
Abbildung 2: Entwicklung des Rohöl-Weltmarktpreises in US-\$/Barrel (Tecson, 2006b) .....	6
Abbildung 3: Die Veränderung des globalen Energiemix im exemplarischen Pfad bis 2050/2100 (WBGU, 2003, S. 4) .....	8
Abbildung 4: Fabrik im Spannungsfeld zwischen Energieerzeugung und Klima (Hesselbach, Junge, 2005b, S. 3) .....	9
Abbildung 5: Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Produktion .....	10
Abbildung 6: Wechselwirkungen in der Kunststoffproduktion.....	11
Abbildung 7: Funktionen der Produktionsplanung und Steuerung (angelehnt an Hackstein, 1989, S. 5 ff.) .....	16
Abbildung 8: Merkmalausprägungen im morphologischen Kasten (angelehnt an FIR, 1997)	19
Abbildung 9: Darstellung der Industrietypen nach den Hauptmerkmalen (Jahnke, Biskup, 1999, S. 24).....	20
Abbildung 10: Zielsystem (Wiendahl, 2005, S. 254).....	23
Abbildung 11: Einteilung der Verfahren zur Maschinenbelegung (angelehnt an Evers, 2002, S. 26).....	26
Abbildung 12: Arten von Ablaufplänen (Bierwirth, Mattfeld, 1999, S. 8).....	28
Abbildung 13: Vorgehensweise bei der Simulation (ASIM, 1987, S. 2).....	34
Abbildung 14: Objekt-Subjekt-Modell-Relation (Reinhardt, 1988, S. 16).....	35
Abbildung 15: Anwendungsfelder der Simulation (angelehnt an VDI 3633, 1992, S. 2) .....	37
Abbildung 16: Simulation als Instrument zur Unterstützung der Fertigungssteuerung (angelehnt an Zell, 1992, S. 39; Friederich, 1998, S. 59).....	39
Abbildung 17: Klassifikation der Simulationsmethoden (Mattern, Mehl, 1989, S. 200) .....	40
Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung des Ablaufs der ereignisorientierten diskreten Simulation (Mattern, Mehl, 1989, S. 201) .....	41
Abbildung 19: Beispiel einer Ereignisliste (Mattern, Mehl, 1989, S. 202) .....	42
Abbildung 20: Überblick Modellierungskonzepte (Wenzel, 1998, S. 38).....	42
Abbildung 21: Wärmebilanz von Raum und Wand .....	47
Abbildung 22: Historische Entwicklung der Ökobilanzierungsmethodik (angelehnt an Eyerer, 1996, S. 4).....	53
Abbildung 23: Kreisdiagramm des Spritzgusszykluses (Michaeli, 1999, S. 110).....	57

Abbildung 24: Leistungs- und spezifischer Strombedarf einer Spritzgussmaschine über einen Zyklus bei verschiedenen Parametereinstellungen (Wortberg et al., 1997, S. 5).....	58
Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Maschinenantrieb und Auslastung von Spritzgießmaschinen auf den spezifischen Strombedarf (Wortberg et al., 1997, S. 6).....	58
Abbildung 26: Verfahren zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs beim Kunststoffspritzguss (Abele et al., 2005, S. 88).....	60
Abbildung 27: Gliederung der Kostenrechnungssysteme (angelehnt an Warnecke et al., 1996, S. 38).....	63
Abbildung 28: Vorgehensweise der Kostenrechnung (Baier, 2002, S. 42).....	65
Abbildung 29: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 22) .....	66
Abbildung 30: Bestand, Reichweite und Leistung im Durchlaufdiagramm (Wiendahl, 2005, S. 268).....	67
Abbildung 31: Aufbau und Ebenen des Simulationssystems .....	72
Abbildung 32: Modell zur Berechnung des Leistungsprofils.....	75
Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der Linearisierung der Leistungsaufnahme .....	76
Abbildung 34: Komponente in TRNSYS.....	78
Abbildung 35: Kopplung der Simulationsebenen (Hesselbach, Junge, 2005a, S. 43).....	81
Abbildung 36: Ablaufverhalten Simulationssystem .....	82
Abbildung 37: Kunststoffspritzgussbetrieb im morphologischen Kasten .....	84
Abbildung 38: Simulationssystem mit Produktionssteuerungskomponente.....	85
Abbildung 39: Beispieldarstellung Ansatz Temperaturtrend .....	87
Abbildung 40: Beispieldarstellung Ansatz Tag/Nacht.....	88
Abbildung 41: Beispieldarstellung Losauswahl mit Vorgabewert.....	89
Abbildung 42: Beispieldarstellung Losauswahl mit Grenzwert .....	90
Abbildung 43: Beispieldarstellung Ansatz Lüftungswärmeverluste.....	91
Abbildung 44: Integration Optimierungsumgebung in Simulationssystem .....	93
Abbildung 45: Beispielanlage in SIMFLEX/3D.....	95
Abbildung 46: Ergebnisse Interne Validität – Heizleistung.....	109
Abbildung 47: Heizenergieverbrauch .....	112
Abbildung 48: Heizenergieverbrauch nach Anpassung.....	113
Abbildung 49: Vergleich Energiebedarf über eine Woche.....	114
Abbildung 50: Ergebnisverlauf während der Optimierung.....	115

Abbildung 51: Mittlere Durchlaufzeiten.....	116
Abbildung 52: Mittlerer Bestand.....	117
Abbildung 53: Termintreue.....	118
Abbildung 54: Standardabweichung der Auslastung.....	118
Abbildung 55: Übersicht der einzelnen Kennzahlen .....	119
Abbildung 56: Kostenvergleich Stuttgart (Deutschland).....	120
Abbildung 57: Kostenvergleich Stuttgart (Deutschland) bei höheren Energiekosten .....	121
Abbildung 58: Kostenvergleich Tallinn (Estland).....	122
Abbildung 59: Kostenvergleich Tallinn (Estland) bei höheren Energiekosten .....	123
Abbildung 60: Kostenvergleich Stuttgart (Deutschland) mit kostenoptimierter Steuerung und höheren Energiekosten .....	124
Abbildung 61: Kostenvergleich Tallinn (Estland) mit kostenoptimierter Steuerung und höheren Energiekosten .....	125
Abbildung 62: Beispielhafter Strompreisverlauf über einen Tag (EEX, 2005) .....	126
Abbildung 63: Kostenvergleich Stromkostenoptimierung .....	127
Abbildung 64: Leistungsverlauf ohne Optimierung.....	128
Abbildung 65: Leistungsverlauf mit Optimierung .....	128
Abbildung 66: Energieangebot und Strompreis .....	129
Abbildung 67: Energieangebot und Leistungsbedarf .....	130

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl Permutationen einstufig – mehrstufig.....	21
Tabelle 2: Übersicht spezifischer Energieverbrauch bei verschiedenen Untersuchungen .....	59
Tabelle 3: Ergebnisse mit konstanten Werten .....	102
Tabelle 4: Ergebnisse Interne Validität .....	103
Tabelle 5: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Lastmodell.....	104
Tabelle 6: Ergebnisse Analytische Vergleiche .....	106
Tabelle 7: Ergebnisse mit konstanten Werten .....	108
Tabelle 8: Ergebnisse Interne Validität – Heizenergieverbrauch .....	109

## Formelverzeichnis

Formel 1: Permutationen bei mehrstufiger Fertigung (Hüttner, 1979, S. 11) .....	21
Formel 2: Permutationen bei einstufiger Fertigung (Hüttner, 1979, S. 11).....	21
Formel 3: Metropolis-Algorithmus (Metropolis et al., 1953) .....	31
Formel 4: Fouriersche Wärmeleitungsgleichung (Feist, 1994, S. 86).....	49
Formel 5: Eindimensionale, dynamische Wärmeleitungsgleichung (Feist, 1994, S. 131) .....	50
Formel 6: Konvektiver Wärmeübergang (Glück, 1997, S. 55; VDI 6020, 2001, S. 12).....	50
Formel 7: Lüftungswärmeverlust (VDI 6020, 2001, S. 12).....	52
Formel 8: Berechnung aktive Energie Spritzgussprozess (Abele et al., 2005, S. 89).....	60
Formel 9: Berechnung zusätzlicher Energiebedarf (Abele et al., 2005, S. 53) .....	61
Formel 10: Berechnung Energiebedarf Prozessperipherie (Abele et al., 2005, S. 53).....	61
Formel 11: Plastifizierenergie (Lampl, 1994, S: 18).....	61
Formel 12: Einspritzenergie (Lampl, 1994, S. 18) .....	61
Formel 13: Energie zum Öffnen und Schließen des Werkzeugs (Lampl, 1994, S. 19) .....	62
Formel 14: Durchlaufzeit (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 21) .....	66
Formel 15: Bestand (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27).....	67
Formel 16: Auslastung (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 27).....	68
Formel 17: Mittlere Leistung (Nyhuis, Wiendahl, 2003, S. 26) .....	68
Formel 18: Liefertermintreue (VDI 4400, 2000, S. 14) .....	68
Formel 19: Lüftungswärmeverluste .....	88
Formel 20: Berechnung der Luftwechselrate (Rötscher, 1982, S. 9).....	89
Formel 21: Berechnung Priorität Stromkosten .....	126

## Literaturverzeichnis

- Aarts, Lenstra, 1997: Aarts, E.; Lenstra, J.K.: Local Search in Combinatorial Optimization. Chichester, UK, J. Wiley & Sons, 1997.
- Abele et al., 2005: Abele, R.; Anderl, R.; Birkhofer, H.: Environmentally-Friendly Product Development – Method and Tools. London, Springer Verlag, 2005.
- Adamski, Hiller, 1998: Adamski, D.; Hiller, M.: CORBA in Simulation Tasks. EUROSIM 98, Helsinki, Finland. 1998.
- Aghte, Rey, 1998: Aghte, I.; Rey, U.: Umweltgerechte Produktion durch eine kontinuierliche Optimierung der Planungsparameter und umweltorientierte Erweiterung der Planungsfunktionalitäten. Umweltinformatik '98 : vernetzte Strukturen in Informatik, Umwelt und Wirtschaft / 12. Internationales Symposium "Informatik für den Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik (GI), Bremen, 1998; Haasis, H.-D., Ranze, K.C. (Hrsg.). 1998.
- ASIM, 1987: ASIM: Leitfaden für Simulationsbenutzer in der Fertigung. ASIM-Mitteilungen aus den Arbeitskreisen, Heft Nr. 7A. 1987.
- Baier, 2002: Baier, J.: Ein Beitrag zur simulationsgestützten Kostenanalyse auf Prozesskostenbasis in der Nutzfahrzeugproduktion. Dissertation Universität Kassel. Shaker Verlag, 2002.
- Baitz et al., 2001: Baitz, M.; Hoffmann, R.; Russ, M.: Life Cycle Engineering im Automobilbau: Stand des Wissens, neue Erkenntnisse und künftige Anforderungen. Umweltwissenschaften und Schadstofforschung, Ecomed Verlag. 2001.
- Balci, 1989: Balci, O.: How to access the acceptability and credibility of simulation results. MacNair, E.A.; Musselman, K.J.; Heidelberger, P. (Hrsg.): Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference. SCS International, S. 62-71, 1989.

- Balci, 2003: Balci, O.: Validation, verification, and certification of modeling and simulation applications. Chick S, Sanchez PJ, Ferrin E, Morrice DJ (Hrsg) Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, Piscataway (NJ, USA). IEEE, Piscataway , S. 150–158, 2003
- Bayer, Collisi, Wenzel, 2002: Bayer, J.; Collisi, T.; Wenzel, S.: Simulation in der Automobilproduktion. 2002.
- Bierwirth, Mattfeld, 1999: Bierwirth, C.; Mattfeld, D. C.: Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation* 7(1), 1999.
- Binding, 1988: Binding, H.J.: Grundlagen zur systematischen Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes. Dissertation RWTH Aachen. 1988.
- Binner, 2003: Binner, H. F. : Prozessorientierte Arbeitsvorbereitung. 2. Auflage München Wien, Carl Hanser Verlag, 2003.
- Bley, Braun, Wuttke, 1999: Bley, H.; Braun, P.; Wuttke, C. C.: Simulation als Werkzeug zur Optimierung inner- und zwischenbetrieblicher Logistik in der Blechverarbeitung. Tagungsband zum EFB-Kolloquium '99, Fellbach, Deutschland. 1999.
- BLFU, 2002: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): CO<sub>2</sub>-Minderung durch rationelle Energienutzung in der Kunststoffverarbeitenden Industrie. Augsburg, 2002.
- Brucker, 2004: Brucker, P.: Scheduling Algorithms. Fourth Edition Springer Verlag , 2004.
- Bullinger, 1997: Bullinger, H.-J. : Anforderungen an Methoden und Systeme für eine umweltorientierte Auftragsabwicklung. Projektbericht des IAT der Universität Stuttgart. 1997.
- Cerny, 1985: Cerny, V.: Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: An efficient Simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45, S.41–51, 1985.
- Claus, 1996: Claus, T.: Objektorientierte Simulation und genetische Algorithmen zur Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation Universität Osnabrück, 1996.

- Conway et al., 1967: Conway, R.-W.; Maxwell, W.-L., Miller, L.-W.: Theory of Scheduling. Mineola New York, Dover Publications, 1967.
- Corsten, Gössinger, 1997: Corsten, H.; Gössinger, R.: Multiagentensystem zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. Information Management 12 (1997) 3, S.65–75, 1997.
- Corsten, May, 1995: Corsten, H., May, C.: Unterstützungspotential neuronaler Netze für die Produktionsplanung und -steuerung. Information Management 10 (1995) 2, S.44–55, 1995.
- Davey, 2005: Davey, I.: Investieren in Mittel- und Osteuropa, Oktober 2005. Hrsg.: Dresdner Bank AG: 2005.
- Degner, 1986: Degner, W.: Rationeller Energieeinsatz in der Teilefertigung. Berlin, VEB Verlag Technik, 1986.
- Delmia, 2007: [www.delmia.de](http://www.delmia.de), Stand: 02.02.2007.
- DENA, 2005: TNS Emnid: dena Unternehmensbefragung zum Thema Energieeffizienz, Auftraggeber: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). 2005.
- DIN 19226: DIN: DIN 19226 Teil 1 Regelungs- und Steuerungstechnik – Begriffe, Allgemeine Grundlagen.
- DOD, 2003: Department of Defense (US): DoD Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation (VV&A). Instruction Number 5000.61, May 13, 2003.
- DOD, 2006: Department of Defense (US): High Level Architecture. <https://www.dmsomil/public/transition/hla> Stand 22.10.2006.
- Domschke et al., 1993: Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte. Heidelberg, Springer Verlag, 1993.
- Dorigo, 2006: Dorigo, M.: Metaheuristics network website. <http://www.metaheuristics.net> Stand 20.05.2006.

- Drexl et al., 1994: Drexl, A., Fleischmann, B., Günther, H.-O., Stadler, H., Tempelmeier, H.: Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (ZfbF) 46 (1994), S.1022–1045, 1994.
- Eberle, 2000: Eberle, R.: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau. Schriftenreihe B – Fahrzeugtechnik – des Institutes für Straßen und Schienenverkehr 8. Dissertation TU Berlin, 2000.
- EEG, 2004: Bundesrepublik Deutschland: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21. Juli 2004. Bundesgesetzblatt. Teil I Nr. 40, ausgegeben zu Bonn am 31. Juli 2004, 2004.
- EEX, 2005: European Energy Exchange AG: EEX Handelsergebnisse Spotmarkt. 2005, Stand: 07.06.2005.
- EHRL, 2003: Europäische Union: RICHTLINIE 2003/87/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union. 25.10.2003. 2003.
- Engesser, Claus, Schwill, 1993: Engesser, H.; Claus, V.; Schwill, A.: Duden Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis. 2. Auflage Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, Dudenverlag, 1993.
- EU-Recipe, 2005: EU-Recipe: Project Report Energy Consumption in Polymer Processing – 2005. 2005.
- Evers, 2002: Evers, K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Dissertation Universität Hannover, 2002.
- Eversheim, 1989: Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 3 – Arbeitsvorbereitung. 2. Auflage Düsseldorf, VDI-Verlag, 1989.
- Eyerer, 1996: Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer Verlag, 1996.

- Feist, 1994: Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation – Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Auflage Heidelberg, Verlag C.F. Müller, 1994.
- Felsmann, 2001: Felsmann, C.: Ein Beitrag zur Optimierung der Betriebsweise heizungs- und raumluftechnischer Anlagen. Dissertation TU Dresden. 2001.
- Fischedick, Nitsch, 2002: Fischedick, M.; Nitsch, J.: Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 200 97 104 UBA-FB 000. 2002.
- Fischer, 1999: Fischer, K.: Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Nr. 504. Dissertation Universität Hannover, 1999.
- Fishman, 1973: Fishman, G. S. : Concepts And Methods In Discrete Event Digital Simulation. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1973.
- Frackenpohl, 2002: Frackenpohl, D.: Agentenbasiertes Auftragsmanagement für die Multi-ressourcen-Montage. Dissertation Universität Hannover, 2002.
- Friederich, 1998: Friederich, D.: Simulation in der Fertigungssteuerung. Diss. Uni-Mainz 1997. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag , 1998.
- Giffler, Thompson, 1960: Giffler, B.; Thompson, G.L.: Algorithms for solving production scheduling problems. Operations Research 8, 1960.
- Glück, 1997: Glück, B.: Wärmetechnischer Raummodell – gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen. 1. Auflage Heidelberg, Müller Verlag, 1997.
- Gonser, 2000: Gonser, J.: Umweltschutz in der Kunststoffverarbeitung. Studie im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, 2000.
- Graham et al., 1979: Graham, R.L.; Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G.: Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. Annals of Discrete Mathematics 5, 287–326, 1979.

- Grunow et al., 2002: Grunow, M.; Günther, H.-O.; Viergutz, B.: APS-System auf dem Prüfstand. PPS Management 7 (2002) 1, 2002.
- Gummerer et al., 2000a: Gummerer, Ch.; Tritthart, W.; Geissler, S.: EDV-unterstützte Gebäudesimulation – Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings – Themenheft. 2000.
- Gummerer et al., 2000b: Gummerer, Ch.; Tritthart, W.; Geissler, S.: EDV-unterstützte Gebäudesimulation – Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings – Langversion. 2000.
- Gutenberg, 1951: Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre . Band I: Die Produktion. 1. Auflage Berlin , Springer Verlag , 1951 .
- Gutenberg, 1983: Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre . Band I: Die Produktion. 24. Auflage Berlin, 1983.
- Hackstein, 1989: Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS) . Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Auflage Düsseldorf, VDI-Verlag, 1989.
- Haupt, 1989: Haupt, R.: A Survey of priority-rule based scheduling. OR Spektrum 11, S.3-16, 1989.
- Herrmann, 1996: Herrmann, F.: Modifizierte Verzweige- und Begrenze-Verfahren zur Belegungsplanung in der Produktion. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Anlagensteuerungstechnik der U Dortmund Bd. 96, 4. Dissertation Universität Dortmund, 1996.
- Hesselbach, Junge, 2005a: Hesselbach, J.; Junge, M.: Kopplung von Materialfluss-, Gebäude- sowie Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen. Thomas Schulze, Graham Horton, Bernhard Preim, Stefan Schlechtweg (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2005. Proceedings der Tagung Simulation und Visualisierung 2005. Erlangen, SCS Publishing House, S.39-49, 2005.
- Hesselbach, Junge, 2005b: Hesselbach, J.; Junge, M.: Emissionen bei der Kunststoffverarbeitung im Spannungsfeld von Energiekosten und Arbeitsschutz. 7th Workshop Geruch und Emissionen bei Kunststoffen; Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel; 4.4-5.4 2005. 2005.

- Hesselbach, Junge, 2005c: Hesselbach, J.; Junge, M.: Reduzierung von Energiespitzen durch Fabriksimulation. *Industrie Management* 2/2005, 2005.
- Heuer, 1997: Heuer, J.: Neuronale Netze in der Industrie: Einführung – Analyse – Einsatzmöglichkeiten. Wiesbaden, Deutscher Universitäts Verlag, 1997.
- Hoff, Endres, 2002: Hoff, H.; Endres, S.: Fertigungssteuerungssysteme im Vergleich. *PPS Management* 7 (2002) 4, 2002.
- Holland, 1975: Holland, J.H.: *Adaption in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, 1975.
- Holthaus, 1996: Holthaus, O.: *Ablaufplanung bei Werkstattfertigung*. Dissertation Universität Paderborn, 1996.
- Hooper, 1986: Hooper, J.W.: Strategy-related characteristics of discrete-event languages and models. *Simulation* 46(4), S.153–159, 1986.
- Hooper, Reilly, 1982: Hooper, J.W.; Reilly, K.D.: An algorithmic analysis of Simulation strategies. *Int. J. Computer Infor. Sci.* 11 (2), S.101–122, 1982.
- Hopfield, 1982: Hopfield, J.: Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. *Proceedings of the National Academic of Science* 79, S.2554–2558, 1982.
- Horváth, 1996: Horváth, P.: *Controlling*. 6. Auflage München, Verlag Franz Vahlen, 1996.
- Hoss, 1965: Hoss, K.: *Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden*. Würzburg, Wien, Physica Verlag, 1965.
- Hummel, Männel, 1983: Hummel, S.; Männel, W.: *Kostenrechnung 2 – Moderne Verfahren und Systeme*. Wiesbaden, Gabler Verlag, 1983.
- Hüttner, 1979: Hüttner, H.J.: *Beitrag zur Maschinenbelegungsplanung für die einstufige Fertigung in Spritzgussbetrieben*. Dissertation RWTH Aachen, 1979.
- Incontrol, 2007: [www.incontrol.nl](http://www.incontrol.nl), Stand: 02.02.2007.
- ISO 14040, 2006: ISO EN DIN 14040. 2006.

- Jahnke, Biskup, 1999: Jahnke, H.; Biskup, D.: Planung und Steuerung der Produktion. Verlag moderne Industrie, 1999.
- Kim, 1993: Kim, Y.-D.: A New Branch and Bound Algorithm for Minimizing Mean Tardiness in Two-Machine Flow shops. Computers and Operations Research 20-4, S. 391 ff., 1993.
- Kirkpatrick et al., 1983: Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P.: Optimization by simulated annealing. Science 220, S.671-680, 1983.
- Kistner, Steven, 1993: Kistner, K.-P., Steven, M.: Produktionsplanung. 2. Auflage Heidelberg, Physica Verlag, 1993.
- Knabe et al., 1999: Knabe, G., Felsmann, C.; Perschk, A.; Rösler, M.: Gebäude- und Anlagen-simulation. BINE ProfilInfo 3 (1999), 1999.
- Koch, 2004: Koch, M.: Wertschöpfung durch Innovation in der Spritzgießtechnik. Kunststoffe 8 (2004), S.122-128, 2004.
- Koegst et al., 2000: Koegst, M.; Lantzsch, G.; Schneider, A.: Wiederverwendung bei der ver-teilten Simulation durch Anwendung der High Level Architecture. Report: SFB 358-B1/D4-1/2000. 2000.
- Kreutzer, 1986: Kreutzer, W.: System Simulation programming styles and languages. Rea-ding, Addison-Wesley, 1986.
- Krüger, 1975: Krüger, S.: Simulation – Grundlagen, Techniken, Anwendungen. Berlin, Walter de Gruyter, 1975.
- Kühl et al., 1995: Kühl, R.; Pfeleiderer, I.; Twardon, F.: Analyse und Bewertung von Emissionen bei der Kunststoffverarbeitung. Umweltforschungsplan-Nr 10408153. Universität Stuttgart – Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde. Stuttgart, 1995.
- Kuhn, Reinhardt, Wiendahl, 1993: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.J.: Handbuch Simula-tionsanwendungen in Produktion und Logistik. Fortschritte in der Simulationstechnik Band 7. 1993.

- Kurbel, 1978: Kurbel, K.: Simultane Produktionsplanung bei mehrstufiger Serienfertigung. 1. Auflage Berlin, Erich Schmidt Verlag, 1978.
- Kurbel, 1995: Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung – Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. Handbuch der Informatik; Bd. 13.2. 2. Auflage München Wien, Oldenbourg Verlag, 1995.
- Kurbel, 1999: Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung – Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. Handbuch der Informatik; Bd. 13.2. 4. Auflage München Wien, Oldenbourg Verlag, 1999.
- Kurbel, Rohmann, 1995: Kurbel, K., Rohmann, T.: Ein Vergleich von Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung: Simulated Annealing, Genetische Algorithmen und mathematische Optimierung. Wirtschaftsinformatik 37-6, S.581-593, 1995.
- Lampl, 1994: Lampl, A.: Gegenüberstellung verschiedener Antriebstechniken bei Spritzgießmaschinen. 13. Leobener Kunststoff-Kolloquium. 1994.
- Law, Kelton, 1991: Law, A. M.; Kelton, W. D.: Simulation Modeling and Analysis. Third Edition New York, McGraw-Hill Inc., 2000.
- Luczak et al., 1999: Luczak, H.; Eversheim, W. (Hrsg.); Schotten M.: Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Auflage Berlin, Springer Verlag, 1999.
- Marti et al., 2003: Marti, J.; Dauwalder, J.; Stettler, A.: VOC-Emissionen beim Spritzgießen von Kunststoffen. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 10 (2003), S. 425-429, 2003.
- Mattern, Mehl, 1989: Mattern, F.; Mehl, H.: Diskrete Simulation – Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. Informatik-Spektrum (1989) 12, S.198-210, 1989.
- Merz, 2002: Merz, R. M.: Objektorientierte Modellierung thermischen Gebäudeverhaltens. Dissertation Universität Kaiserslautern. 2002.
- Meteonorm, 2006: Meteotest: [www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch) Stand: 28.12.2006.

- Metropolis et al., 1953: Metropolis, N.; Rosenbluth, A.; Rosenbluth, M.; Teller, A.; Teller, E.: Equation of State calculations by fast Computing machines. Journal of Chemical Physics. 21, S. 1087–1092, 1953.
- Michaeli, 1999: Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 4. erweiterte Auflage München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1999.
- Müller–Merbach, 1970: Müller–Merbach, H.: Optimale Reihenfolgen. Heidelberg, Springer Verlag , 1970.
- Nadig, 2000: Nadig, L.: Kostenrechnung als Führungsinstrument – Grundlagen. Zürich, Schulthess Juristische Medien AG, 2000.
- Neelamkavil, 1987: Neelamkavil, F.: Computer Simulation and Modelling. New York, John Wiley, 1987.
- Nicolai et al., 1995: Nicolai, H.; Much, D.; Laakmann, J.: Aachener PPS–Modell – Grundlagen für die organisatorische und informationstechnische Gestaltung der Produktionsplanung und –steuerung. Luczak, H.; Eversheim, W.: PPS Jahrbuch 95/96. Köln, Verlag TÜV Rheinland, 3–23, 1995.
- Nyhuis, Wiendahl, 2003: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.–P.: Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Auflage Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2003.
- OMG, 2004: Object Management Group: Common Object Request Broker Architecture: Core Specification. Version 3.0.3 2004.
- Page et al., 1988: Page, B.; Bölckow. R.; Heymann, A.; Kadler, R.; Lieben, H.: Simulation und moderne Programmiersprachen. Fachberichte Simulation, Band 8. Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag , 1988.
- Page, 1991: Page, B.: Diskrete Simulation – Eine Einführung mit Modula–2. Springer Verlag, 1991.
- Pauldrach, 1981: Pauldrach, K.–F.: Sparen und Nutzen von Energie im Spritzgießbetrieb – Möglichkeiten der Kostensenkung. Kunststoff–Berater Band 26, 4 (1981), 1981.

- Pensky, 2004: Pensky, D. H.: Parallele und verteilte Simulation industrieller Produktionsprozesse. Fortschr.-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 376. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2004.
- Perschke, 1999: Perschke, A.: Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygienischen Prozesse in den Gebäudewänden. Dissertation TU Dresden. 1999.
- Pinedo, 1995: Pinedo, M.: Scheduling – Theory, Algorithms and Systems. 1995.
- Pro-Plast, 2006: Pro-Plast Kunststoff GmbH, Griesheim: Telefonische Auskunft. 07.03.2006.
- Rabe et al., 2004: Rabe, M.; Junge, M.; Schmuck, T.; Wenzel, S.; Verifikation und Validierung: Motivation, Aufgaben und Herausforderungen; In: Mertens, K.; Rabe, M. (Hrsg.): Experiences from the Future. Tagungsband zur 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag S. 251–261, 2004.
- Rechenberg, 1973: Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie. Friedrich Frommann Verlag, 1973.
- REFA, 1991a: REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung Teil 1. München, Carl Hanser Verlag, 1991.
- REFA, 1991b: REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung Teil 3. München, Carl Hanser Verlag, 1991.
- Reinhardt, 1977: Reinhardt, A.: SIMFLEX – Ein Softwaresystem zur interaktiven graphischen Erstellung und Steuerung von Modellen flexibler Fertigungssysteme. Gnatz, R.; Samuelson, K.: Informatik-Fachberichte. Band 11. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1977.
- Reinhardt, 1988: Reinhardt, A.: Designing the Layout and the Control Systems of FMS. Vortrag NATO-ASI-CIM-Tagung in Istanbul, Sept. 87. 1988.
- Rempel, 2000: Rempel, H.: Geht die Kohlenwasserstoff-Ära zu Ende?. Vortrag auf der DGMK/BGR Veranstaltung "Geowissenschaften für die Exploration und Produktion: Informationsbörse für Forschung und Industrie" in Hannover am 23.05.2000. 2000.

- Roth, 2001: Roth, S.: Konzept verallgemeinerungsfähiger Module für die Sachbilanz von Produktionsprozessen. Dissertation TU Berlin, 2001.
- Rötscher, 1982: Rötscher, H.: Lüftungs- und Klimatechnik – Grundlagen. München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1982.
- Sames, Büdenbender, 1997: Sames, G.; Büdenbender, W.: Aachener PPS-Modell. Das morphologische Merkmalsschema. Sonderdruck 4/90. 6. Auflage Aachen, Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen, 1997.
- Sargent, 1996: Sargent, R.G.: Verifying and validating simulation models. Charnes, J.M.; Morrice, D.J.; Brunner, D.T.; Swain, J.J. (Hrsg.): Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. SCS International, S. 55–64, 1996.
- Schiefer, 2001: Schiefer, E.: Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren. Dissertation TU Darmstadt. Aachen, Shaker Verlag, 2001.
- Schmidt-Pletschka, Milles, 2005: Schmidt-Pletschka, R.; Milles, U.: Kunststoffspritzgießen mit höchster Präzision. BINE Projektinfo. 2005.
- Schneider, 1993: Schneider, B.: Neuronale Netze für betriebliche Anwendungen – Anwendungspotentiale und existierende Systeme. Institut für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Arbeitsbericht Nr. 22. 1993.
- Schneider, 2001: Schneider, S.: Rechnergestützte, kooperativ arbeitende Optimierungsverfahren am Beispiel der Fabriksimulation. Dissertation Universität Kassel, 2001.
- Schreiner, 1996: Schreiner, M.: Umweltmanagement in 22 Lektionen – Ein ökonomischer Weg in eine ökologische Wirtschaft. 4. überarb. Aufl. Gabler Verlag, 1996.
- Schrödel, 1992: Schrödel, O.: Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1992.
- Schultz et al., 1995: Schultz, J., Weigelt, M., Mertens, P.: Verfahren für die rechnerunterstützte Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 – 6, S.594–608, 1995.

- Schumann, Blümel, 1998: Schumann. M.; Blümel. E.: Using HLA for Factory Simulation. Proceedings of the Fall Simulation Interoperability Workshop in Orlando, Florida, USA. 1998.
- Schwarze, 1996: Schwarze, R.: Energieversorgungskonzept für einen kunststoffverarbeitenden Betrieb – Stufenplan zum Energiemanagement. Betrieb&Energie 1 (1996), 1996.
- Schwefel, 1977: Schwefel, H.P.: Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Basel Stuttgart , Birkhäuser Verlag, 1977.
- Siedentopf, 1994: Siedentopf, J.: Anwendung und Beurteilung heuristischer Verbesserungsverfahren für die Maschinenbelegungsplanung – Ein exemplarischer Vergleich zwischen neuronalen Netzen, Simulated Annealing und genetischen Algorithmen. Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft der Universität Leipzig Arbeitsbericht Nr. 2. 1994.
- Steinaecker, 1999: von Steinaecker, J.: Ein PPS-Konzept zur Unterstützung von Umweltorientierung und Produktionsnetzwerken. PPS Management 4 (1999) 1, 1999.
- Straßburger, 2003: Straßburger, S.: HLA als Basis eines Simulationsbackbones für die Digitale Fabrik. Tagungsband, 17.Symposium Simulationstechnik, ASIM 2003, Magdeburg (Hrsg.: Hohmann, R.). 2003.
- Tecson, 2006: Tecson: [www.tecson.de](http://www.tecson.de), Stand: 12.07.2006.
- Tecson, 2007: Tecson: [www.tecson.de](http://www.tecson.de), Stand: 02.02.2007.
- TEHG, 2004: Bundesrepublik Deutschland: Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft vom 8. Juli 2004. Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 35, ausgegeben zu Bonn am 14. Juli 2004, 2004.
- Transsolar, 2004: Transsolar Energietechnik GmbH: TRNSYS 16 Dokumentation. 2004.
- TRGS 900, 2000: Technische Regel für Gefahrstoffe TRGS 900 – Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz. BArbBl. Heft 10/2000. S. 34–63, 2000.
- TRNSYS, 2006: TRNSYS Homepage: [www.trnsys.com](http://www.trnsys.com), Stand: 22.10.2006.

UGS, 2007: [www.ugsplm.de/produkte/tecnomatix/](http://www.ugsplm.de/produkte/tecnomatix/), Stand: 02.02.2007

Vasko et al., 1993: Vasko, F., Wolf, F., Scott, K., Woodyatt, L.: Adapting Branch-and-Bound for Real-World Scheduling Problems. *Journal of Operational Research Society* 44, S. 483 ff., 1993.

VdEW, 2006: VdEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft Baden Württemberg e.V.): Strompreise in Deutschland, Stand: Februar 2006. 2006.

VDI 3633, 2000: Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Ausg. März 2000 (Gründruck), 2000.

VDI 4400, 2000: Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4400 Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion. 2000.

VDI 6020, 2001: Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 6020 Blatt 1: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Ausg. Mai 2001, 2001.

Verzano, Reinhardt, 2003: Verzano, N.; Reinhardt, A.: SIMFLEX/3D – Fabriksimulator mit integriertem HLA-Modul . Tagungsbeitrag "Simulation und Visualisierung 2003" am Institut für Simulation und Graphik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 6.–7.03.2003. 2003.

Viergutz, Tuschinski, 2004: Viergutz, B.; Tuschinski, R.: APS im Mittelstand. *PPS Management* 9 (2004) 2, 2004.

Vorholz, 2001: Vorholz, F.: Der Kampf ums Protokoll – Gelingt ein Klimavertrag, ist das Beste an ihm seine Existenz. *Die Zeit* 29/2001, 2001.

Warnecke et al., 1996: Warnecke, H.J.; Bullinger, H.J.; Hichert, R.; Voegele, A.: *Kostenrechnung für Ingenieure*. 5. Auflage, München, Wien, Carl Hanser Verlag. 1996.

WBGU, 2003: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: *Globale UmweltveränderungenWelt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag. 2003.

Wendt, 1995: Wendt, O.: *Tourenplanung durch Einsatz naturanaloger Verfahren*. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag. 1995.

- Wenzel et al., 2003: Wenzel, S.; Nickel, S.; Deerberg, G.; Appelt, W.: SILVER – Simulationsbasierte Systeme zur Integration logistischer und verfahrenstechnischer Entscheidungsprozesse – Arbeitsbereich 2 – Gesamtbericht, Version 2.1, 2003.
- Wenzel et al., 2005: Wenzel, S.; Jessen, U.; Bernhard, J.: Classifications and Conventions structure the handling of models within the Digital Factory. Computers in Industry, Zülch, G.; Stowasser, S., Special Issue: The Digital Factory Volume 56 Issue 4, S.334–346. 2005
- Wenzel, 1998: Wenzel, S.: Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. Diss. Uni Rostock. 1998.
- Wiendahl, 2005: Wiendahl, H.P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 5. Auflage, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2005.
- Wolfram, 1986: Wolfram, F.: Aspekte der energetischen Bewertung von Produkten und Prozessen der Abtrenntechnik nach dem Prinzip der vergegenständlichten Energie. Dissertation TH Karl-Marx-Stadt. 1986.
- Wolfram, 1990: Wolfram, F.: Energetische produktbezogene Bewertung von Fertigungsprozessen. Dissertation TU Karl-Marx-Stadt. 1990.
- Wortberg et al., 1997: Wortberg, J.; Michels, R.; Neumann, M.: Energieeinsparpotentiale in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Energie & Management. 1997.
- Zäpfel, Braune, 2005: Zäpfel, G.; Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung am Beispiel der Maschinenbelegung. München, Verlag Franz Vahlen. 2005.
- Zelewski, 1993: Zelewski, S.: Multi-Agenten-Systeme für die Prozesskoordinierung in komplexen Produktionssystemen – Ein Verteiltes Problemlösungskonzept auf Basis von Kontraktnetzen. Arbeitsbericht Nr. 46 des Seminars für allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft der Universität zu Köln. 1993.
- Zell, 1992: Zell, M.: Simulationsgestützte Fertigungssteuerung. Dissertation U Saarbrücken. München, Wien, Oldenbourg Verlag. 1992.

Zimmermann, 1990: Zimmermann, W.: Operations Research – Quantitative Methoden zur  
Entscheidungsvorbereitung. 5. Auflage, München, Wien, Oldenbourg Verlag. 1986.

Zimmermann, 1996: Zimmermann, G: Grundzüge der Kostenrechnung. München, Olden-  
bourg Verlag. 1996.

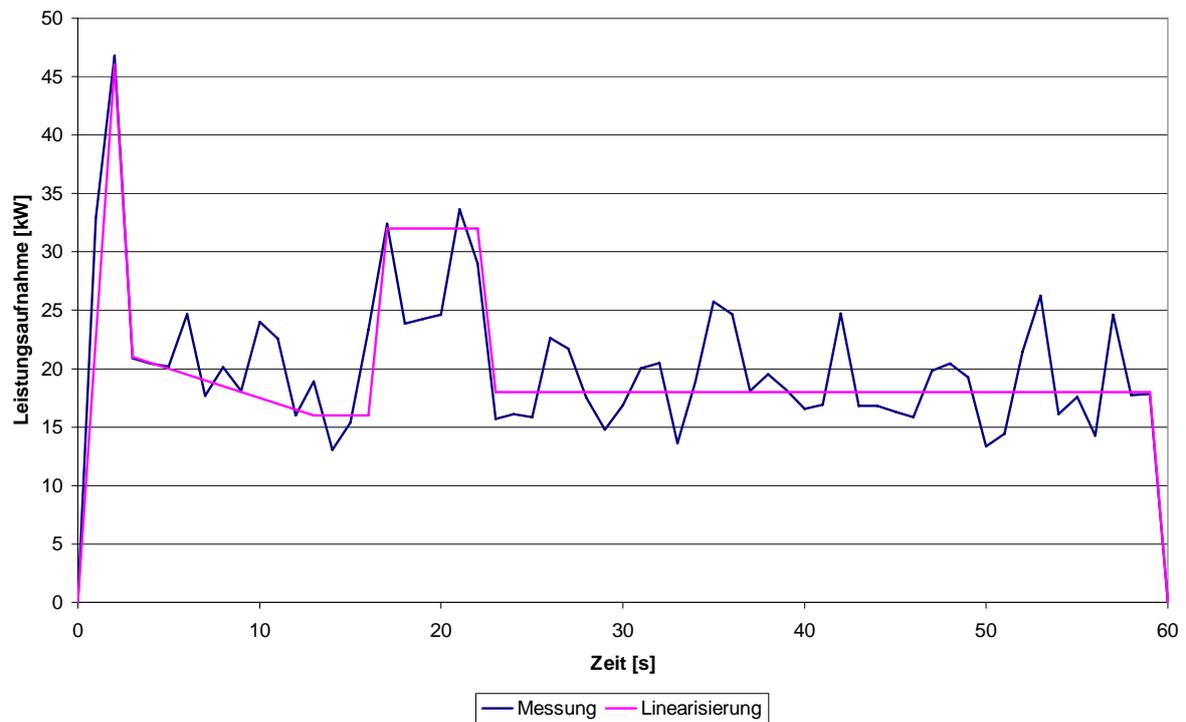
Zöllner, 1997: Zöllner, O.: Optimierte Werkzeugtemperierung. ATI Anwendungstechnische  
Information 1104. 1997.

# Anhang

## Daten Maschinenmodell

Bauteil A

Leistungsaufnahme



Wärmeabgabe, radiativ: 0,0246 kWh

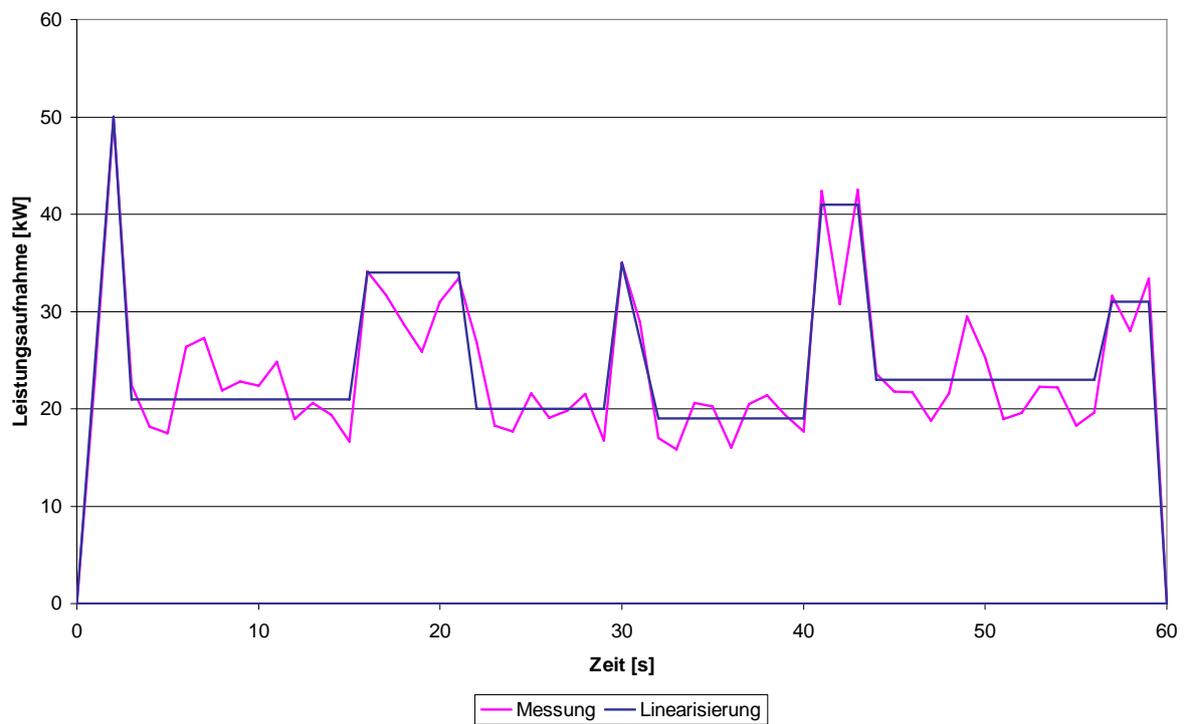
Wärmeabgabe, konvektiv: 0,0819 kWh

Emissionen POM:

Schadstoff	Emissionsmenge pro Zyklus [mg]
Formaldehyd	22,5

## Bauteil B

### Leistungsaufnahme



Wärmeabgabe, radiativ: 0,033 kWh

Wärmeabgabe, konvektiv: 0,102 kWh

Emissionen POM

Schadstoff	Emissionsmenge pro Zyklus [mg]
Formaldehyd	45,0

## Daten Gebäudemodell

Raumvolumen: 900 m<sup>3</sup>

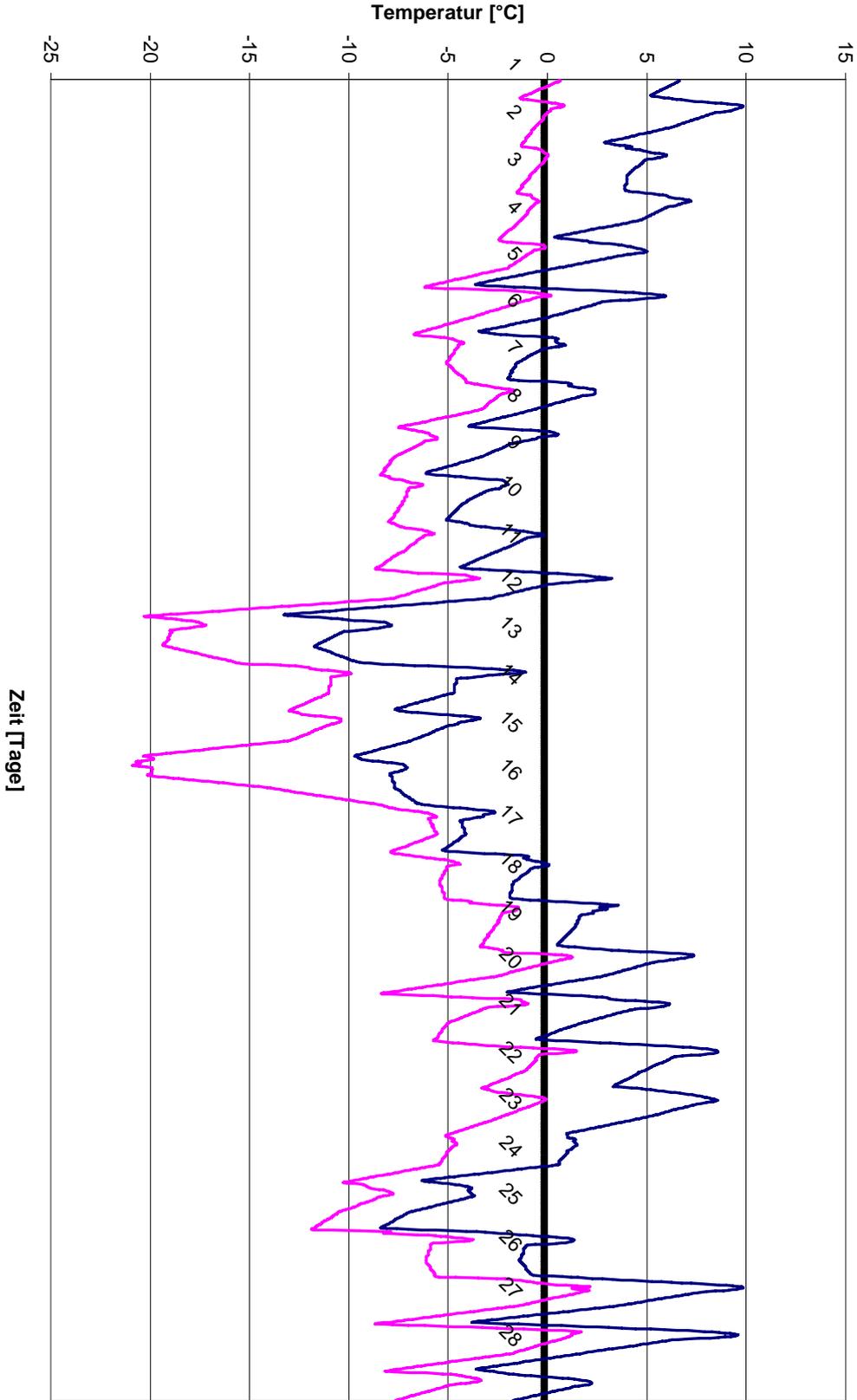
Wärmekapazität: 2160 kJ/K

Wand	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Kategorie	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
Boden	225	Extern (Boundary = 15°C)	0,313
Dach	225	Extern, Horizontal	0,233
Außenwand	60	Extern, Nord	0,339
Außenwand	60	Extern, Süd	0,339
Außenwand	60	Extern, Ost	0,339
Außenwand	60	Extern, West	0,339

## MAK-Werte

Schadstoff	MAK-Wert [mg/m <sup>3</sup> ]
Formaldehyd	0,62

Klimadatenätze



## Diplomarbeiten

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Art</b>
Markus Pacha	Emissionen beim Spritzgießen von Kunststoffen	Diplomarbeit 1
Arne Nord	Auslegung einer HLK-Anlage für eine Modellfabrik	Diplomarbeit 1
Jens Jedamski	Simulationsorientierte Energiebedarfserfassung von Spritzgussmaschinen	Diplomarbeit 2
Hans Georg Weishaar	Modellierungsorientierte Energiebedarfsanalyse von Spritzgießprozessen	Diplomarbeit 1
Maik Zwanziger	Grundlagen der Thermischen Gebäudesimulation mit TRNSYS	Diplomarbeit 1
Marco Esser	Datenhaltungssystem für Ganzheitliche Fabrikmodelle	Diplomarbeit 1
Carmen Ronkowski	Erneuerbare Energien in der Kunststoffindustrie	Diplomarbeit 2
Arne Nord	Optimierung eines Kühlsystems eines kunststoffverarbeitenden Betriebs	Diplomarbeit 2
Monika Froese	Industrieller Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen am Beispiel von Kunststoff-Spritzguss und Aluminium Druckguss	Diplomarbeit 1
Lars Martin	Maschinen-Bauteil-Datenbank für die Ganzheitliche Fabriksimulation	Diplomarbeit 2
Christian Woermann	Modellbildung für den zeitlich aufgelösten Energiebedarf von Spritzgussprozessen	Diplomarbeit 1
Norman Baum	Integration der Simulation in den Planungsprozess der Digitalen Fabrik	Diplomarbeit 1

Miroslav Martinovic	Entwurf eines Modellierungstools für die Ganzheitliche Fabriksimulation	Diplomarbeit 2
Christian Jacob	Aktuelle und zukünftige Algorithmen der Produktionsplanung und -steuerung	Diplomarbeit 1
Kai Jungermann	Algorithmen der Produktionsplanung und -steuerung	Studienarbeit
Bastian Lang	Simulationsgestützte Untersuchung des Einflusses der Auftragsplanung auf den Energieverbrauch	Diplomarbeit 1
Bastian Sembdner-Braun	Empirische Untersuchung des Einflusses der Einstellparameter beim Kunststoffspritzgießen auf den Energieverbrauch	Diplomarbeit 2
Jan Urban	Ermittlung des Einflusses von Steuerparametern auf den Energieverbrauch von Spritzgussmaschinen	Studienarbeit
Patrick Baur	Simulation von Szenarien zur Vision der autarken Fabrik	Studienarbeit
Marco Esser	Prototypische Entwicklung eines energieeffizienten PPS-Systems	Diplomarbeit 2

## Eigene Publikationen

- J. Hesselbach, M.Junge; Energieeffiziente Produktionssteuerung; In: PPS Management; Ausgabe 4/2006; GITO Verlag; Potsdam. 2006
- J.Hesselbach, M.Junge; Life-Cycle GWP simulation of injection molding; Proceedings of The 7th International Conference on Eco Balance, Tsukuba, Japan, 14.-16.11.2006. 2006.
- M.Junge, J.Hesselbach; Simulationsgestützte Untersuchung von Algorithmen zur energieeffizienten Produktionssteuerung; In: Sigrid Wenzel (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2006. Tagungsband zur 12. Fachtagung, Kassel, 26.-27. September 2006. SCS Publishing House, S.243-251, 2006.
- M.Junge, J.Hesselbach, C. Herrmann, T.Dettmer: A Simulation Tool for Sustainable Factory Planning; eco-X: ecology and economy in electroniX, 8.-10. Juni, Wien, Österreich, 2005.
- J. Hesselbach, M. Junge, C. Herrmann, T. Dettmer; Production focused Life Cycle Simulation; 38th CIRP Manufacturing Systems Seminar, Florianopolis, Brazil, 16. - 18. Mai 2005.
- J. Hesselbach, M. Junge; Reduzierung von Energiespitzen durch Fabriksimulation; In: Industrie Management; Ausgabe 2/2005; GITO Verlag; Potsdam.2005.
- J. Hesselbach, M. Junge; Emissionen bei der Kunststoffverarbeitung im Spannungsfeld von Energiekosten und Arbeitsschutz; 7th Workshop Geruch und Emissionen bei Kunststoffen; Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel; 4.4-5.4 2005. 2005.
- J. Hesselbach, M. Junge; Kopplung von Materialfluss-, Gebäude- sowie Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen; In: Thomas Schulze, Graham Horton, Bernhard Preim, Stefan Schlechtweg (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2005. Proceedings der Tagung Simulation und Visualisierung 2005. Erlangen: SCS Publishing House, S.39-49. 2005.

M. Rabe, M. Junge, T. Schmuck, S. Wenzel; Verifikation und Validierung: Motivation, Aufgaben und Herausforderungen; In: Mertens, K.; Rabe, M. (Hrsg.): Experiences from the Future. Tagungsband zur 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, S. 251–261. 2004.

J. Hesselbach, M. Junge; Stoff- und Energiefluss – Simulation in Industriebetrieben; Vortrag im Rahmen der Haydauer Hochschulgespräche; Kassel; Juni 2004. 2004.

Reinhardt, A., Hesselbach, J., Verzano, N., Junge, M. (2003): Fabriksimulation und Ganzheitliche Bilanzierung, in: Hohmann, R. (Hrsg.), Frontiers in Simulation, Tagungsband zum 17. Symposium ASIM 2003 Simulationstechnik, Magdeburg, SCS-Verlag Ghent, 2003.

## Lebenslauf

### Zur Person

Geburtsdatum: 20.02.1978

Geburtsort: Kassel

Familienstand: ledig

### Berufliche Erfahrungen

Oktober 2003 – heute	Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Promotion)
März 2003 – Oktober 2003	Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse Wissenschaftliche Studentische Hilfskraft
Oktober 2002 – März 2003	Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Produktionssysteme Wissenschaftliche Studentische Hilfskraft
Oktober 2002 – heute	maxPlant GbR, Kaufungen Gründer und Gesellschafter
April 2002 – Oktober 2002	Siemens AG, Corporate Technology, Production Processes, Virtual Engineering, München Praktikant
Juni 2000 – April 2002	mplus technologies AG, Kassel Gründer und Vorstand
September 1997 – September 1998	Evangelisches Freizeitheim Niedenstein Zivildienst

## Hochschulstudium

Oktober 1998 – Oktober 2003      Maschinenbaustudium an der Universität Kassel

## Schulbildung

August 1994 – August 1997      Gymnasium:      Georg-Christoph-Lichtenberg-Schule,  
Kassel

Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

August 1988 – August 1994      Gesamtschule: Theodor-Heuss-Schule, Baunatal

August 1984 – August 1988      Grundschule: Friedrich-Ebert-Schule, Baunatal