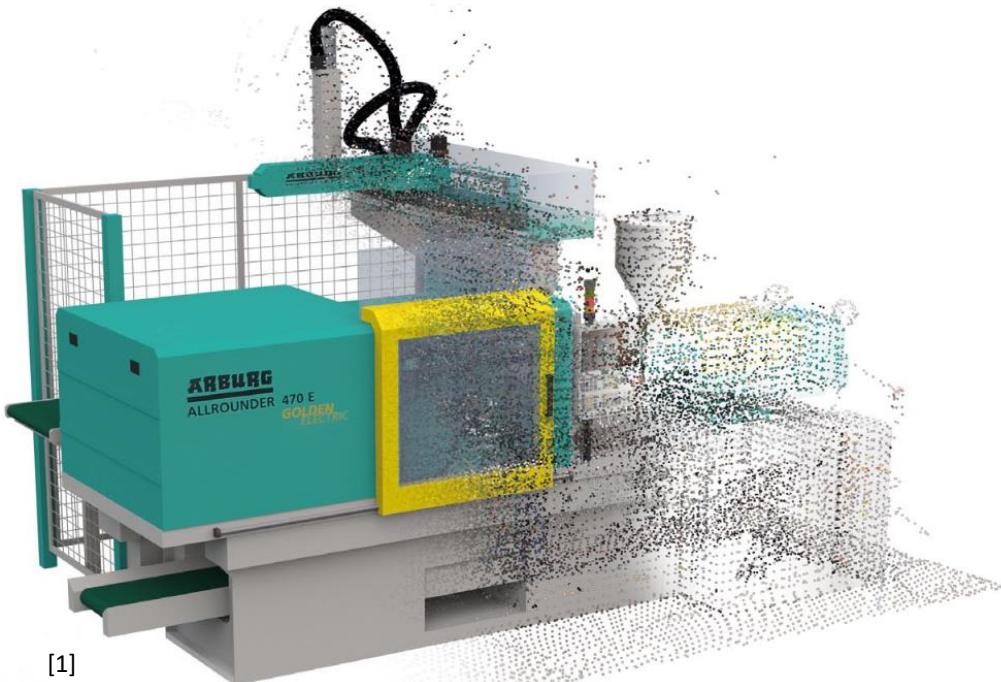


Virtual Kick-Off Digital Twin of Injection Molding (DIM)

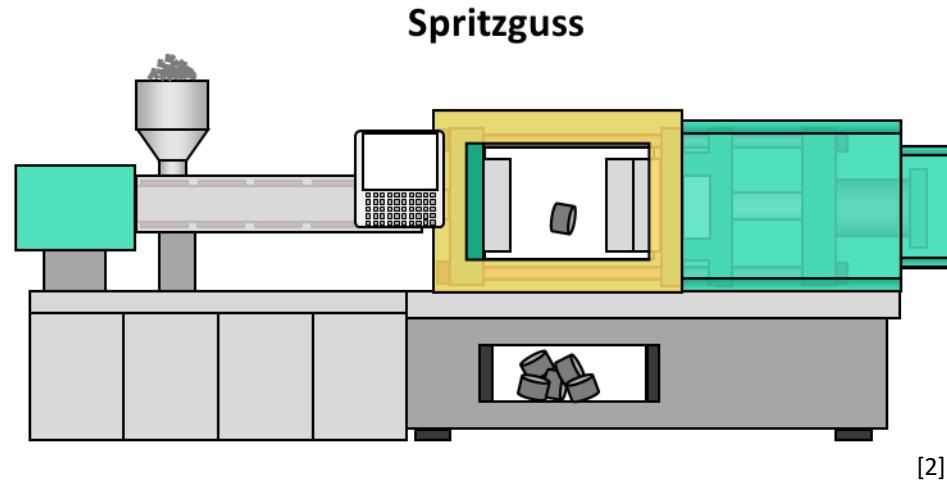
26.01.2021



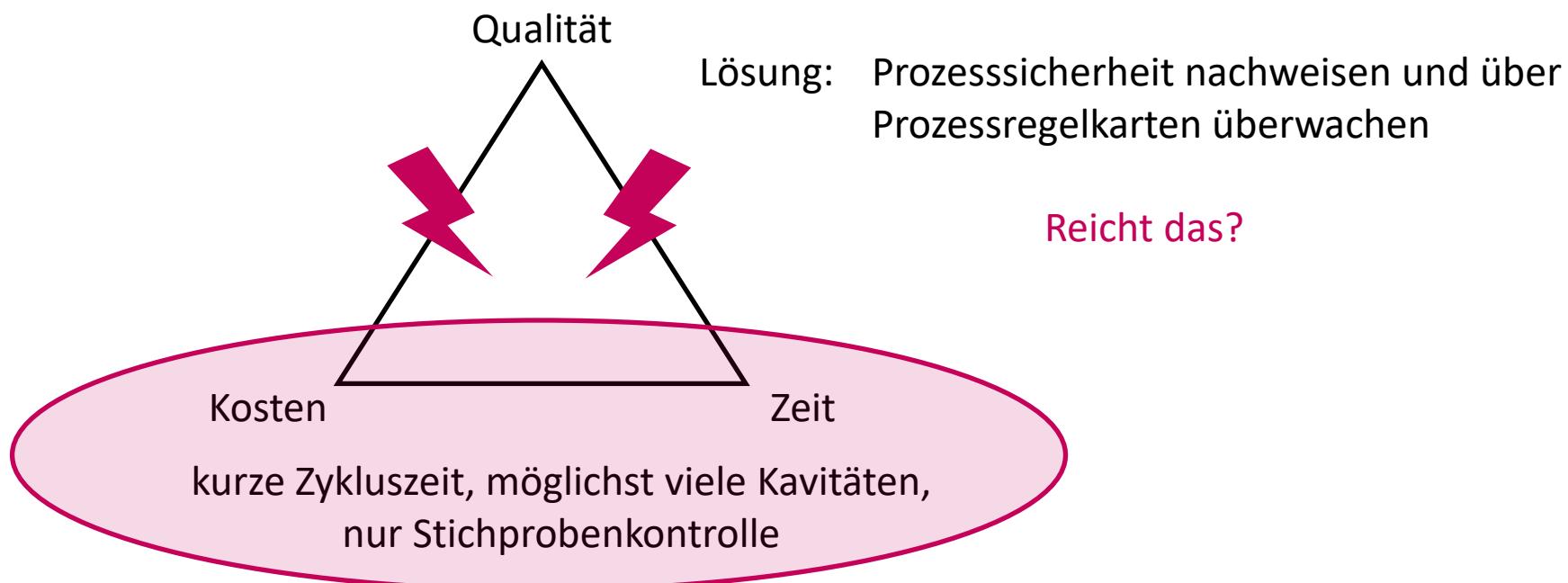
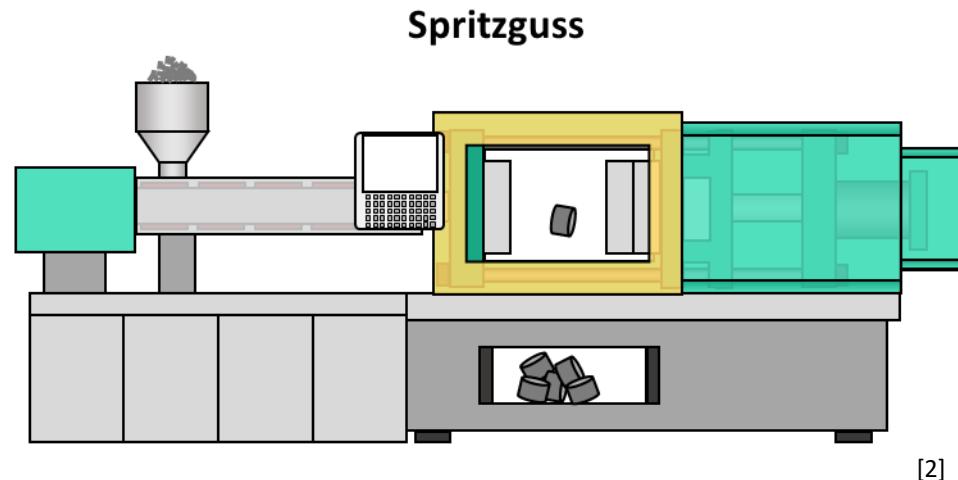
- **Begrüßung**
- **Vorstellung des Projekts DIM**
- **Technisch-methodische Entwicklung**
- **Wissens- und Technologietransfer**
- **Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion**

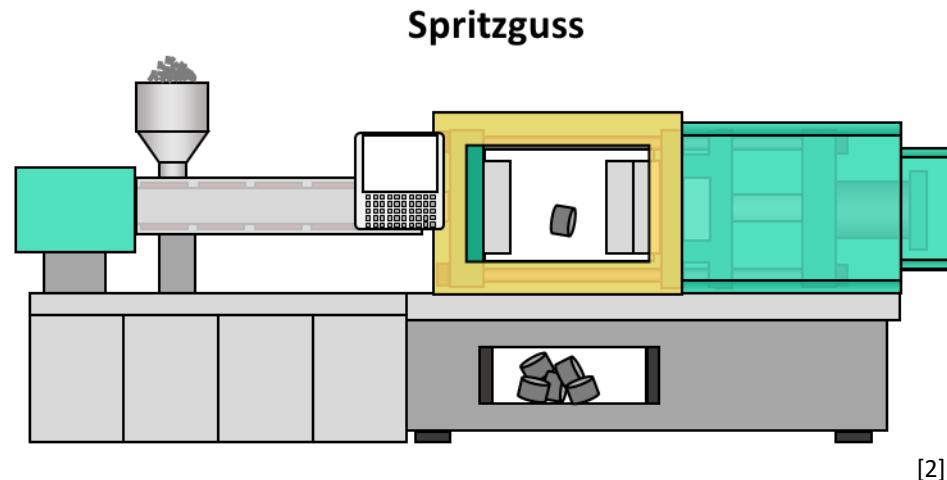
- **Begrüßung**
 - Selbstvorstellung der Fachgebiete MRT & IfW
 - Selbstvorstellung des Projektbeirates
- **Vorstellung des Projekts DIM**
- **Technisch-methodische Entwicklung**
- **Wissens- und Technologietransfer**
- **Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion**

- Begrüßung
- Vorstellung des Projekts DIM
 - Motivation
 - Projektstruktur
 - Überblick über Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- Technisch-methodische Entwicklung
- Wissens- und Technologietransfer
- Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion



- Zunehmend komplexere Bauteilgeometrien
 - Erweiterte Einsatzgebiete mit höheren mechanischen Belastungen
 - Steigende Variantenvielfalt
 - Höhere Anforderungen an Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz
 - Wachsender Kostendruck
- Etablierte Methoden der Qualitätssicherung geraten vermehrt an ihre Grenzen



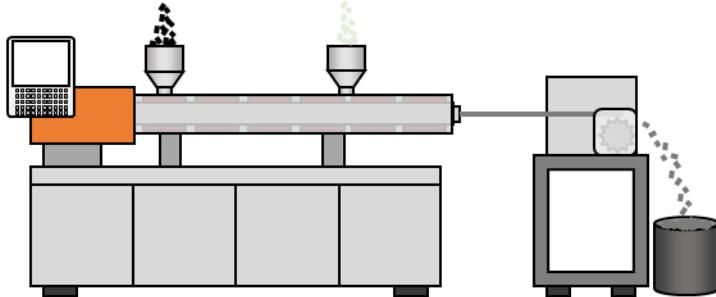


- Störgrößen**
- Temperierung
 - Feuchtigkeiten
 - Verschleiß
 - Materialqualität
 - ...

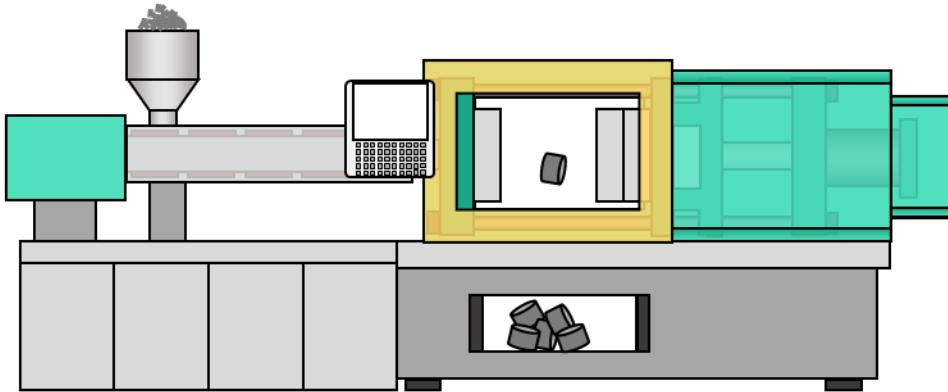
- Prozessparameter**
- Temperaturen
 - Drücke
 - Geschwindigkeiten
 - ...

- Bauteilqualität**
- Maßhaltigkeit
 - Gewicht
 - Fehlstellen
 - ...

Compoundierung



Spritzguss



[2]

Qualität

Prozessparameter

- Temperaturen
- Drücke
- Geschwindigkeiten
- ...



Störgrößen

- Temperierung
- Feuchtigkeiten
- Verschleiß
- Materialqualität
- ...

Prozessparameter

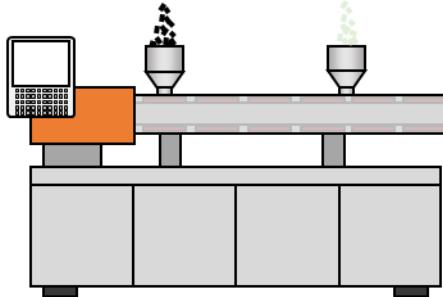
- Temperaturen
- Drücke
- Geschwindigkeiten
- ...



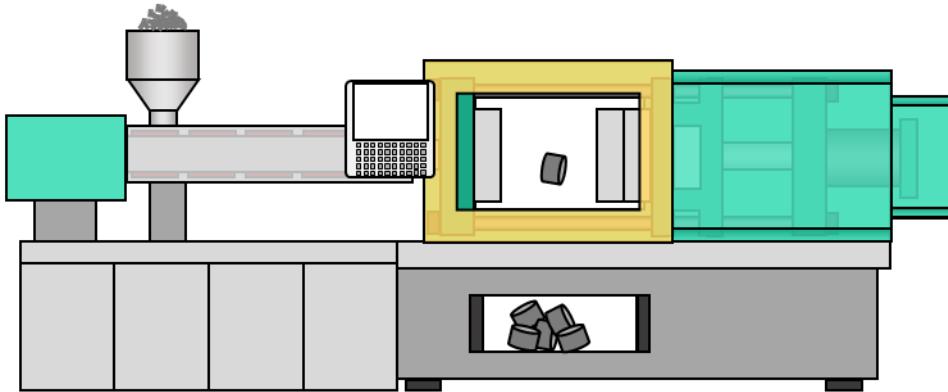
Bauteilqualität

- Maßhaltigkeit
- Gewicht
- Fehlstellen
- ...

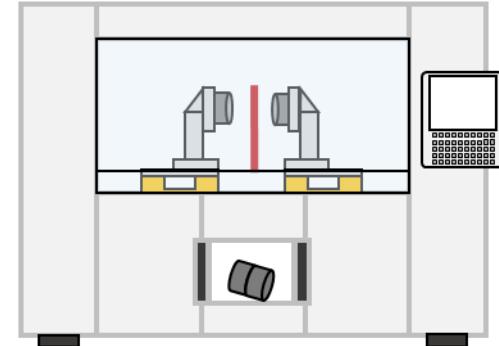


Compoundierung

Rohmaterialien

Spritzguss

Verbundwerkstoff

Schweißen

Spritzgussteil

[2]

Endprodukt

Zwischenfazit:

Innerhalb der gesamten Prozesskette führt ein stabiler Teilprozess zu unterschiedlichen Bauteilqualitäten durch Schwankungen in den anderen Schritten.



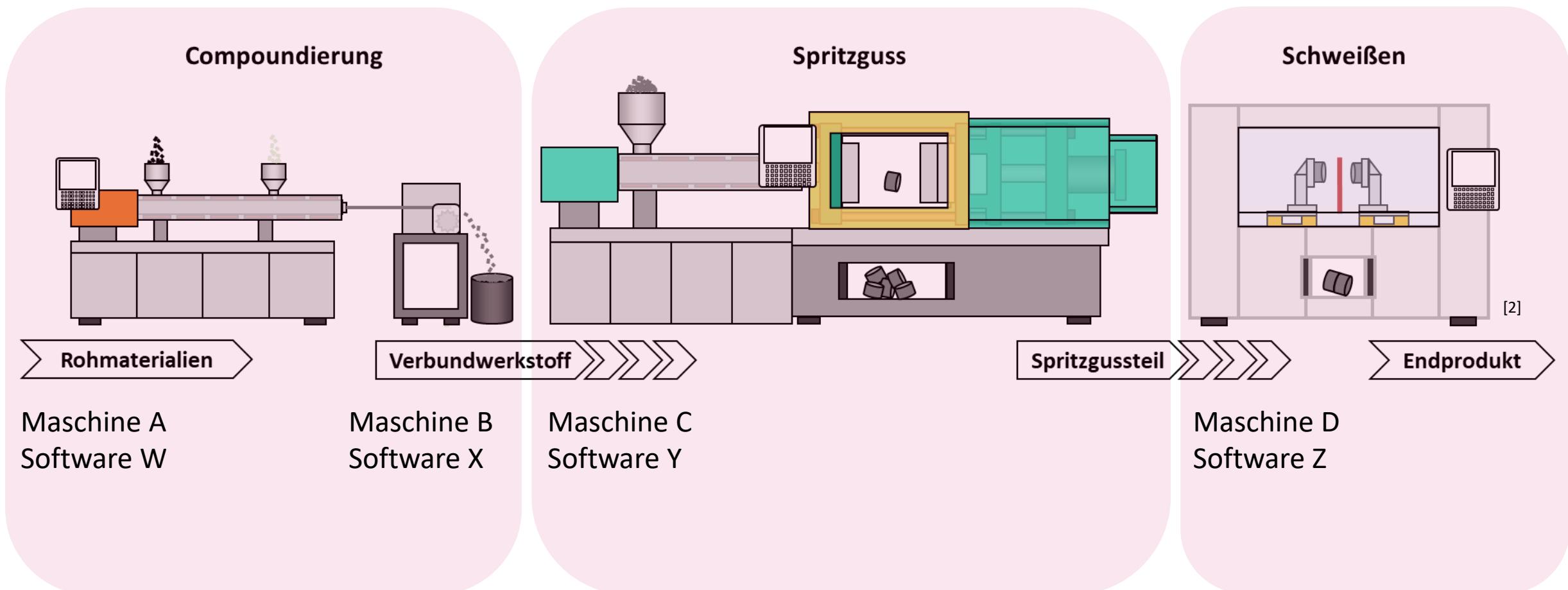
Zunehmende Digitalisierung und Vernetzung im Rahmen von Industrie 4.0 eröffnen innovative Möglichkeiten für die qualitätsorientierte und datengetriebene Weiterentwicklung und Optimierung von Produkten und Prozessen.

Digitale Zwillinge

- virtuelle, dynamische Repräsentation der realen Prozesskette
- Erfassung, Integration und Verknüpfung von Daten entlang des Herstellungsprozesses

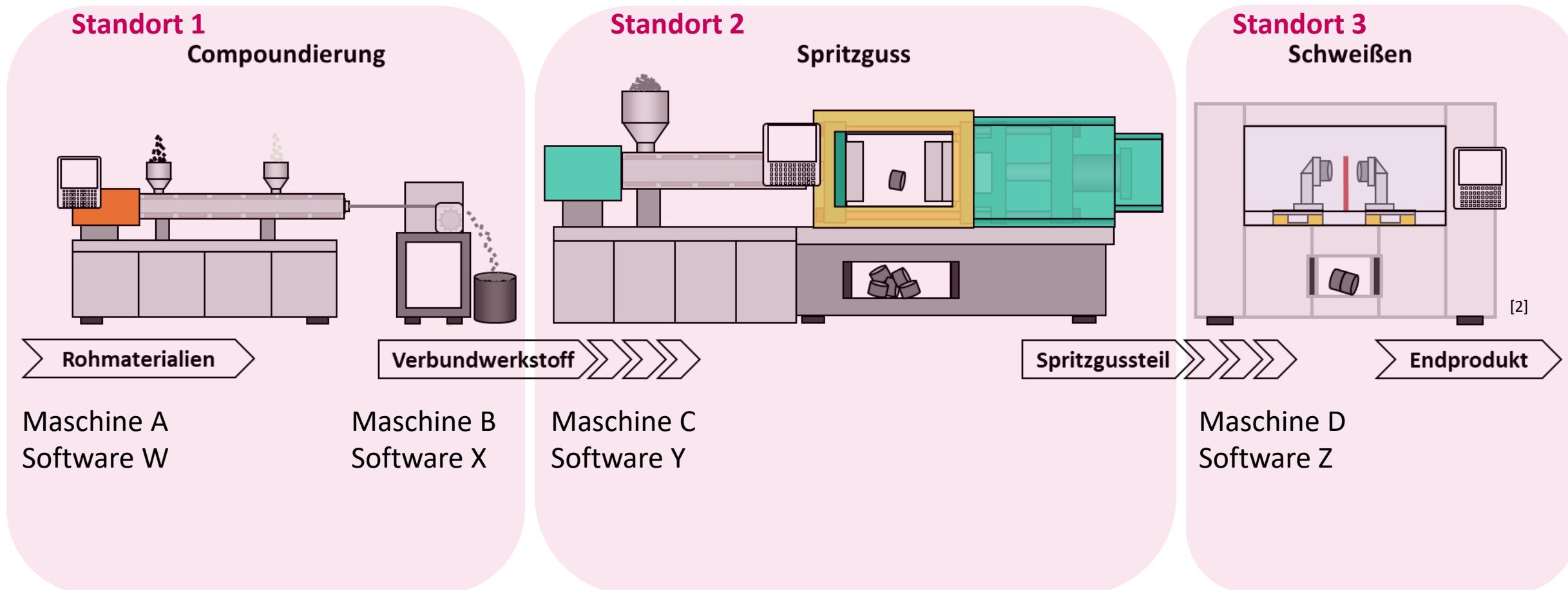
Aber:

- Heterogene IT-Landschaft (Daten über verschiedene Systeme verteilt)
- Aufzeichnung, Visualisierung und Verarbeitung der Prozessdaten der einzelnen Schritte geschieht fast ausschließlich durch die maschineninterne Software



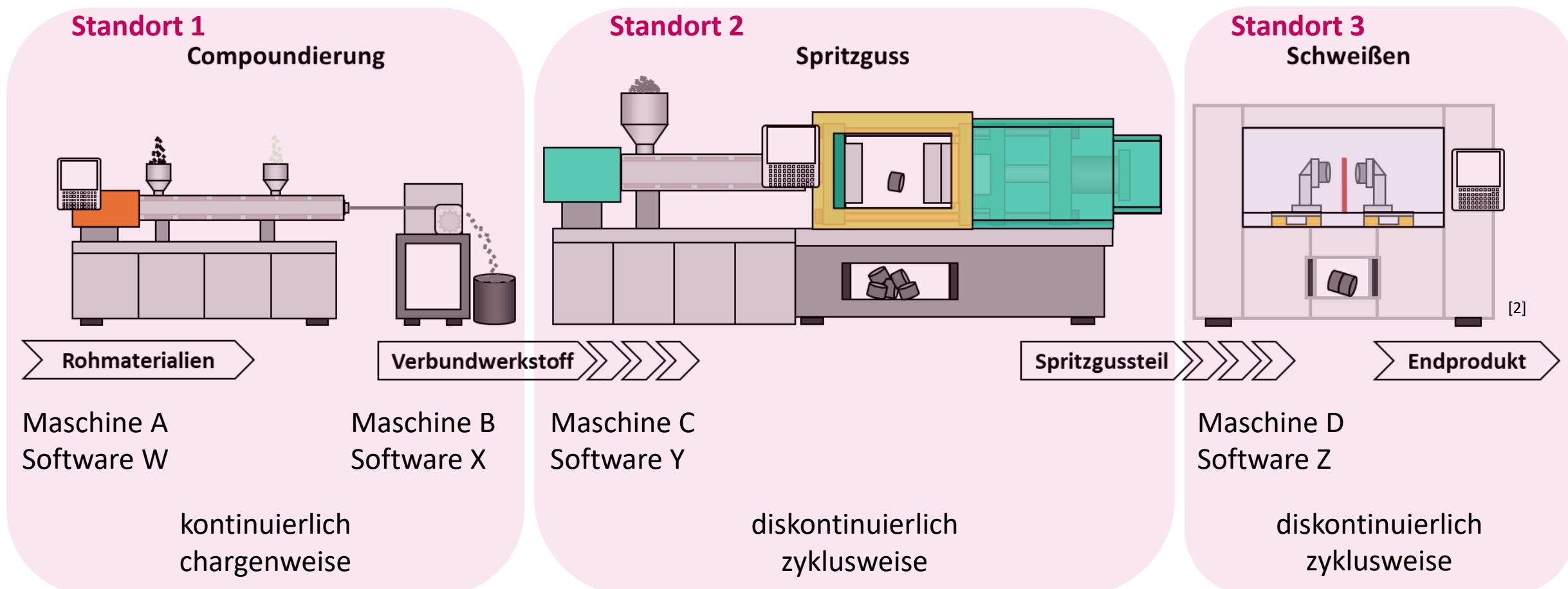
Aber:

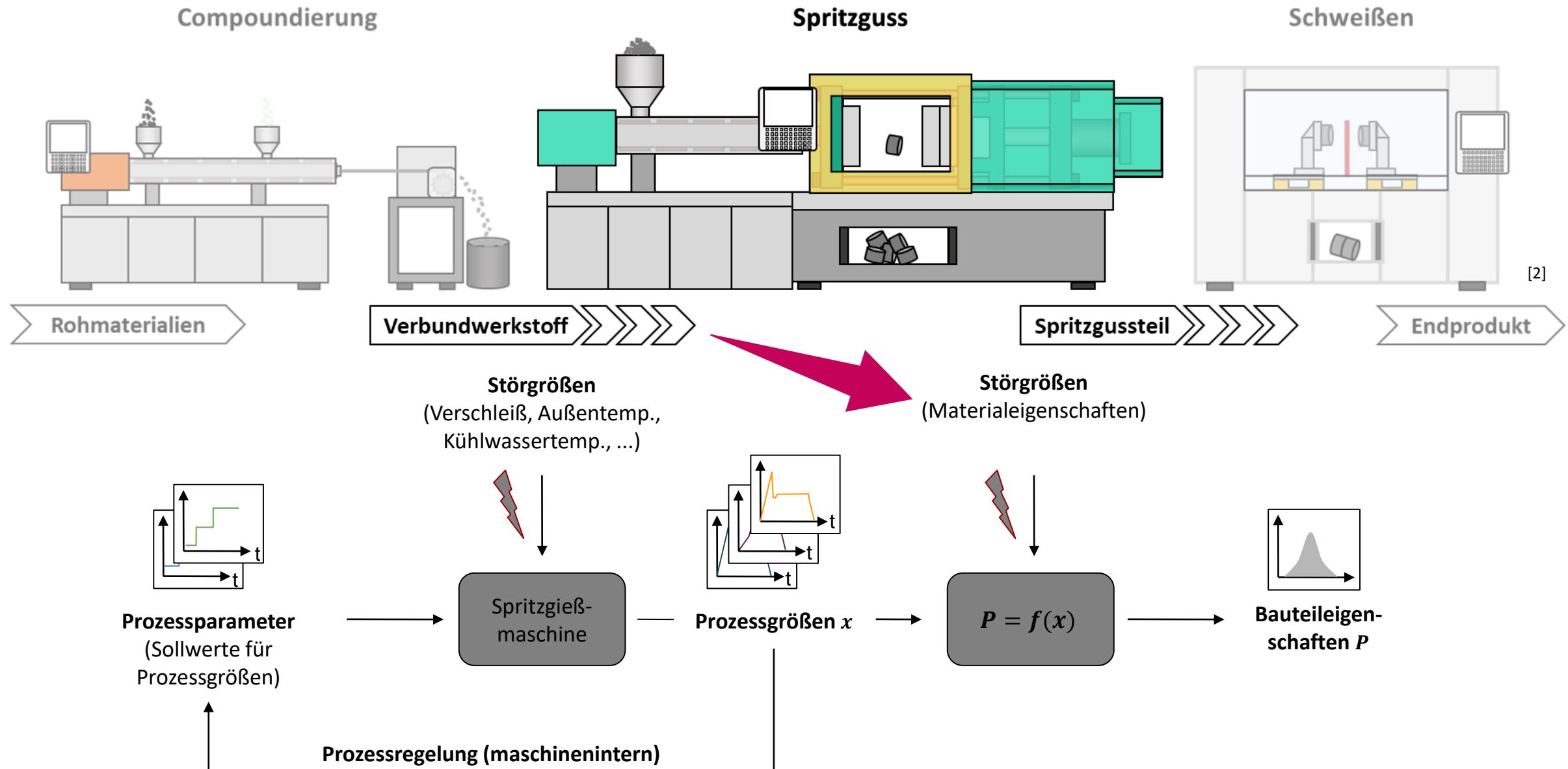
- Einzelne Prozessschritte finden an unterschiedlichen Standorten statt, daher kaum Schnittstellen



Aber:

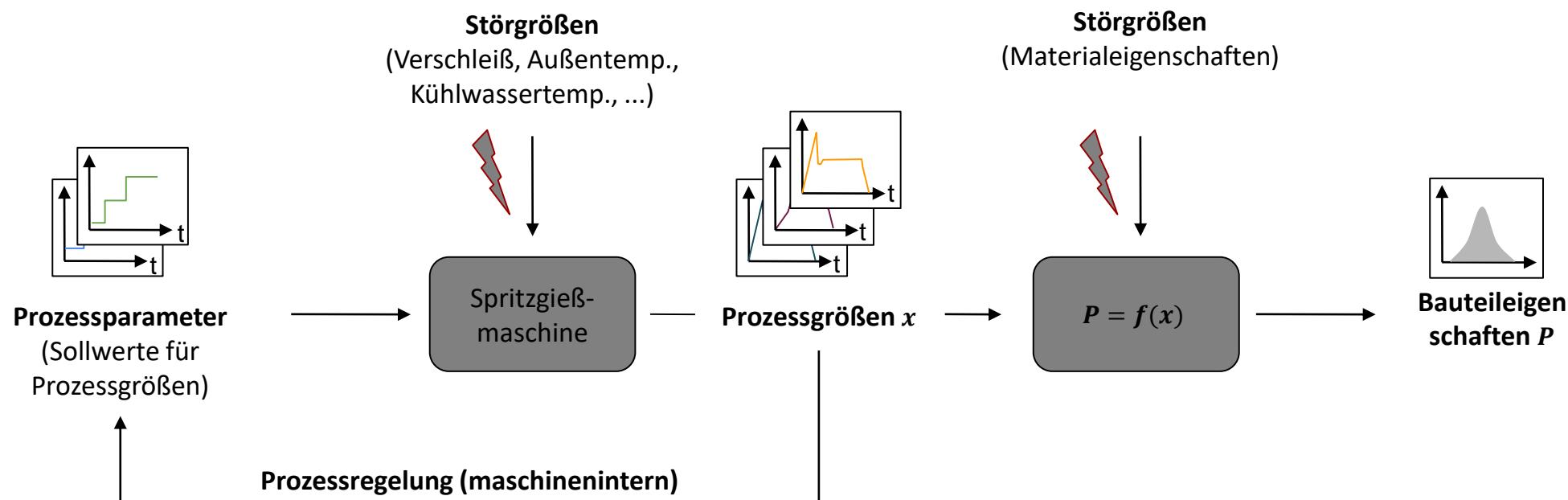
- Unterschiedliche Bezugsebenen
- Verknüpfung der Daten schwierig





- Regelung von Prozessgrößen erlaubt nur indirekt eine Einstellung definierter Bauteileigenschaften
- Nicht messbare Störgrößen ändern den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und resultierenden Bauteileigenschaften

Ziel: Direkte Steuerung der Bauteilqualität, Kompensation von nicht messbaren Störgrößen, einfache Integration des Verfahrens in den bestehenden Produktionsprozess



Projektziele:

- Entwicklung eines digitalen Abbildes des Spritzgießprozesses und von Methoden zur modellbasierten Optimierung der Bauteilgüte
- Proof of Concept aller entwickelten Methoden durch Anwendung an einer Maschine des Fachgebietes IfW
- Transfer der entwickelten Technologien und des erforderlichen Wissens für deren Anwendung und Adaption

Projektbearbeiter:



+ Technischer Mitarbeiter + Hiwis

Marco Klute Alexander Rehmer

| | PM | | | 2020 | | | 2021 | | | 2022 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|------|----|----|------|---|---|------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--|
| | IfW-W | IfW-T | MRT-W | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| AP 0 | 4 | 0 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 1 | 7 | 7 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 2 | 8 | 7 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3 | 3 | 2 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 4 | 2 | 2 | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 5 | 3 | 0 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Σ | 27 | 18 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

■ Entwicklung- und Implementierung

■ Transfer

■ Meilenstein

AP0: Projektlennungskreis

AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle

AP2: Datenaufzeichnung

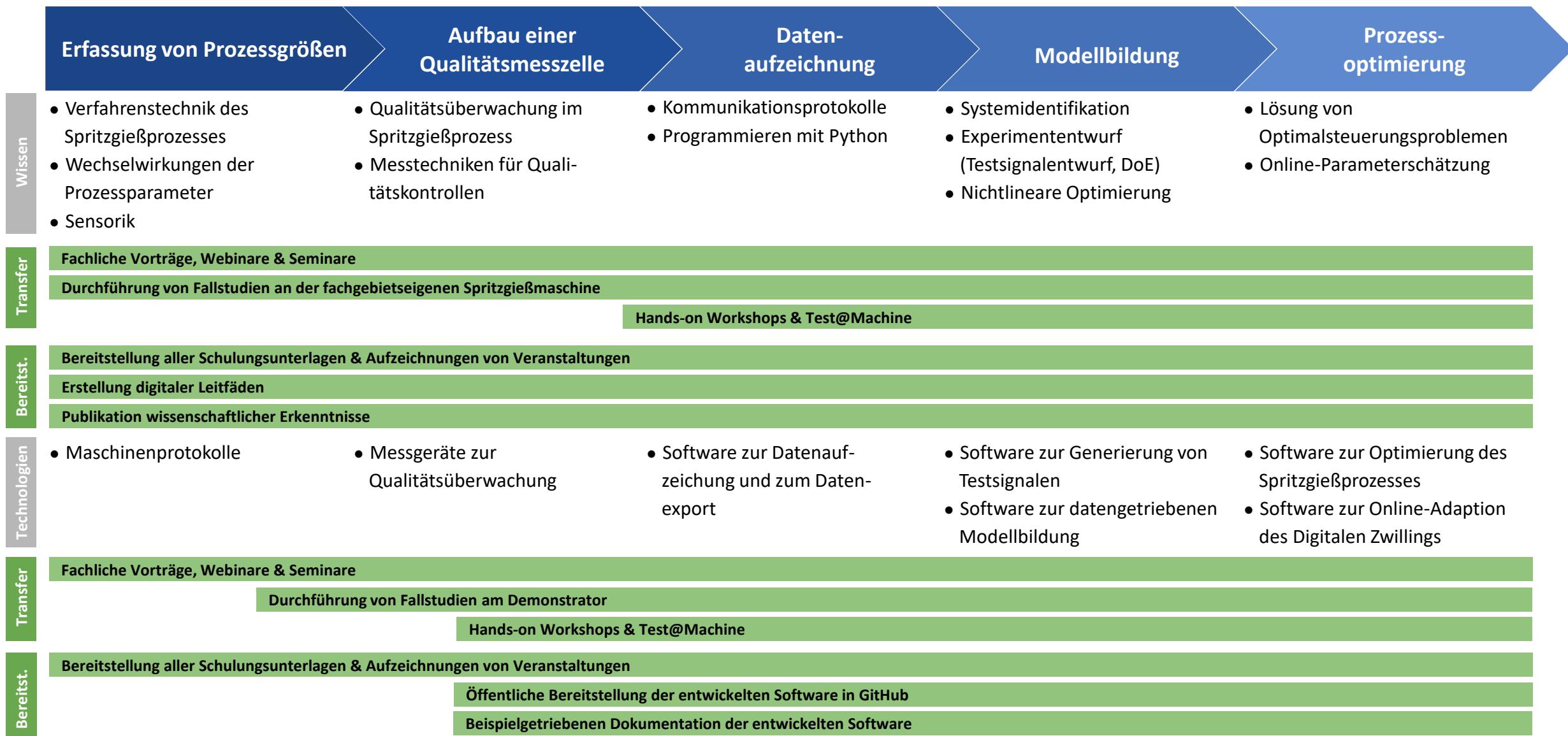
AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling

AP4: Prozessoptimierung

AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

MS1: Demonstratoranlage aufgebaut

MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

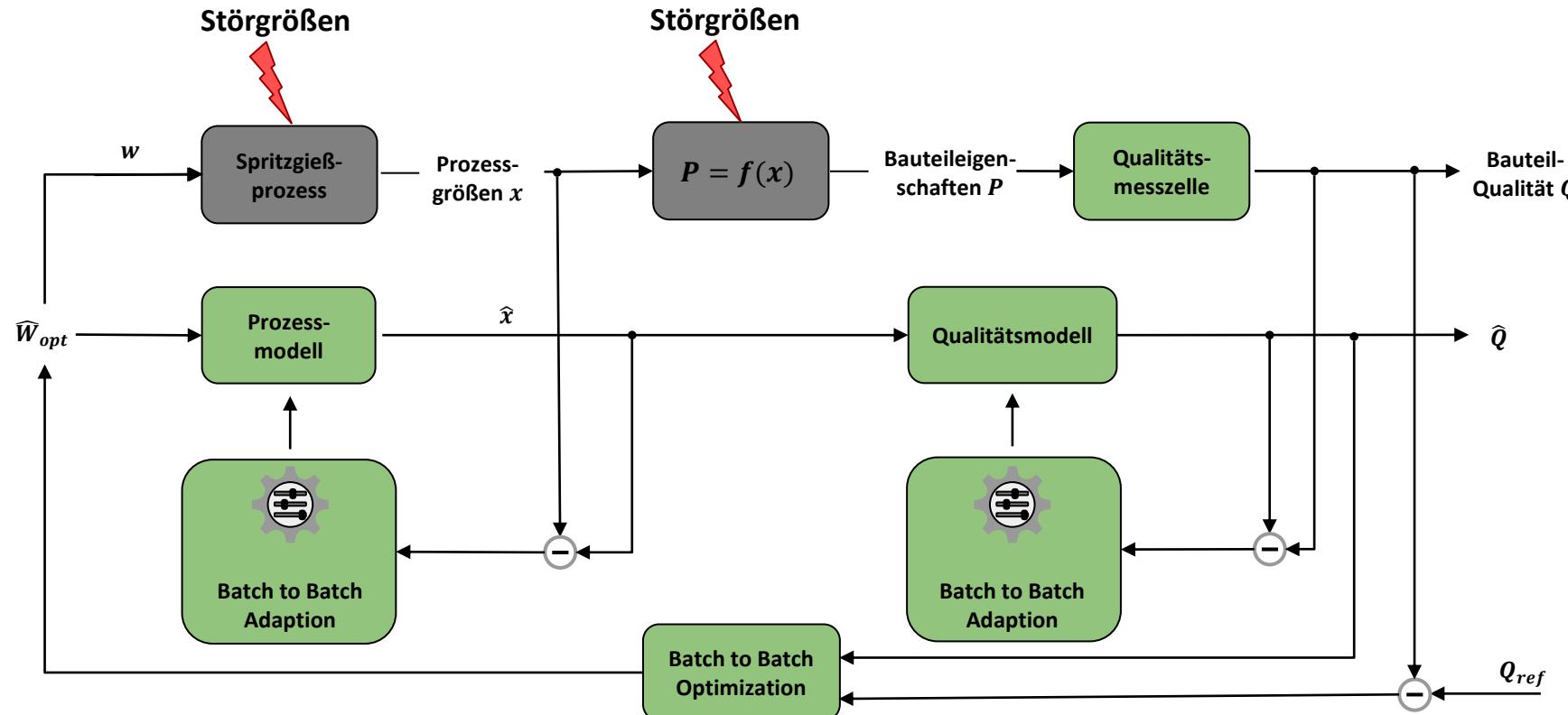


- Begrüßung
- Vorstellung des Projekts DIM
- **Technisch-methodische Entwicklung**
 - Geplante Entwicklungsmaßnahmen
 - Fachliche Diskussion
- Wissens- und Technologietransfer
- Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion

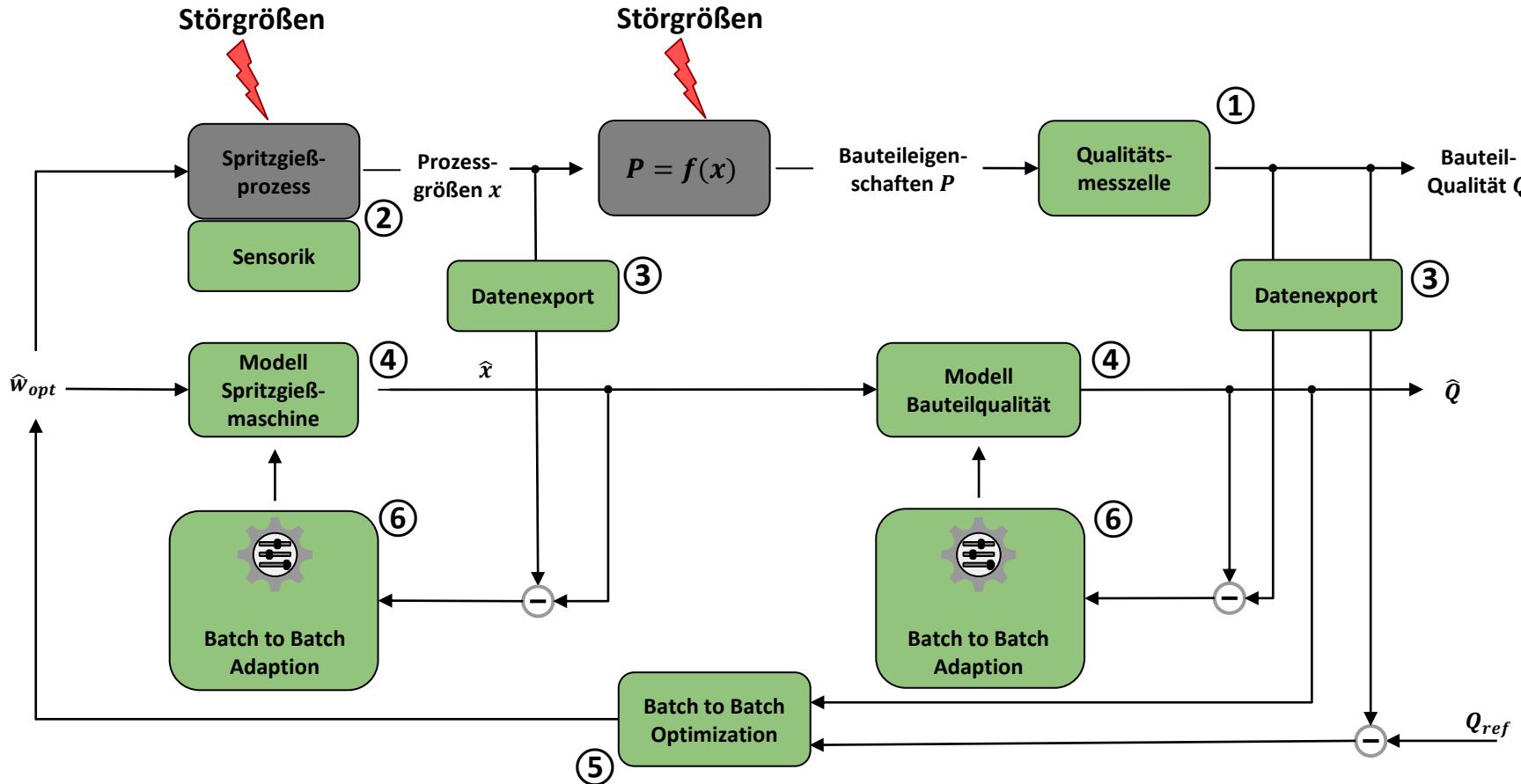
Anforderung an das zu entwickelnde System: Integrierbarkeit in den bestehenden Produktionsprozess

- Keine Software-Veränderungen an der Spritzgießmaschine möglich
- Modulares Baukastensystem, falls nicht alle Bestandteile des Systems umsetzbar sind

Lösungskonzept: Optimalsteuerung mit Modelladaption

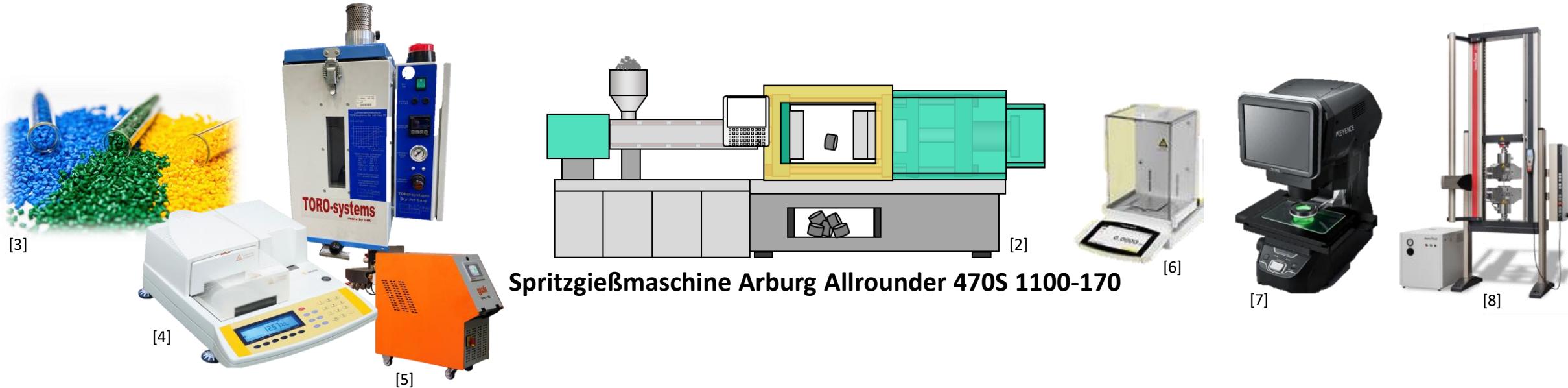


- Prozesstaktnahe Messung der Bauteilqualität
- Modellbasierte Optimierung der Führungsgrößen (batchweise)
- Kompensation von Störgrößen und Modellfehlern durch regelmäßige (z.B. batchweise) Modelladaption



Entwicklungsschritte:

- ①: Qualitätsmesszelle aufbauen
- ②: Maschine mit zusätzlicher Sensorik ausrüsten
- ③: Echtzeit-Datenexport implementieren
- ④: Datengetriebene Modellbildung des Spritzgießprozesses
- ⑤: Prozessoptimierung
- ⑥: Online-Modelladaption



Prozessdaten (Peripherie)

- Werkzeuginnendruck
- Temperatur der Schmelze im Werkzeug
- Werkzeugtemperatur
- Durchflussrate und Temperatur des Kühlmediums

Qualitätsdaten

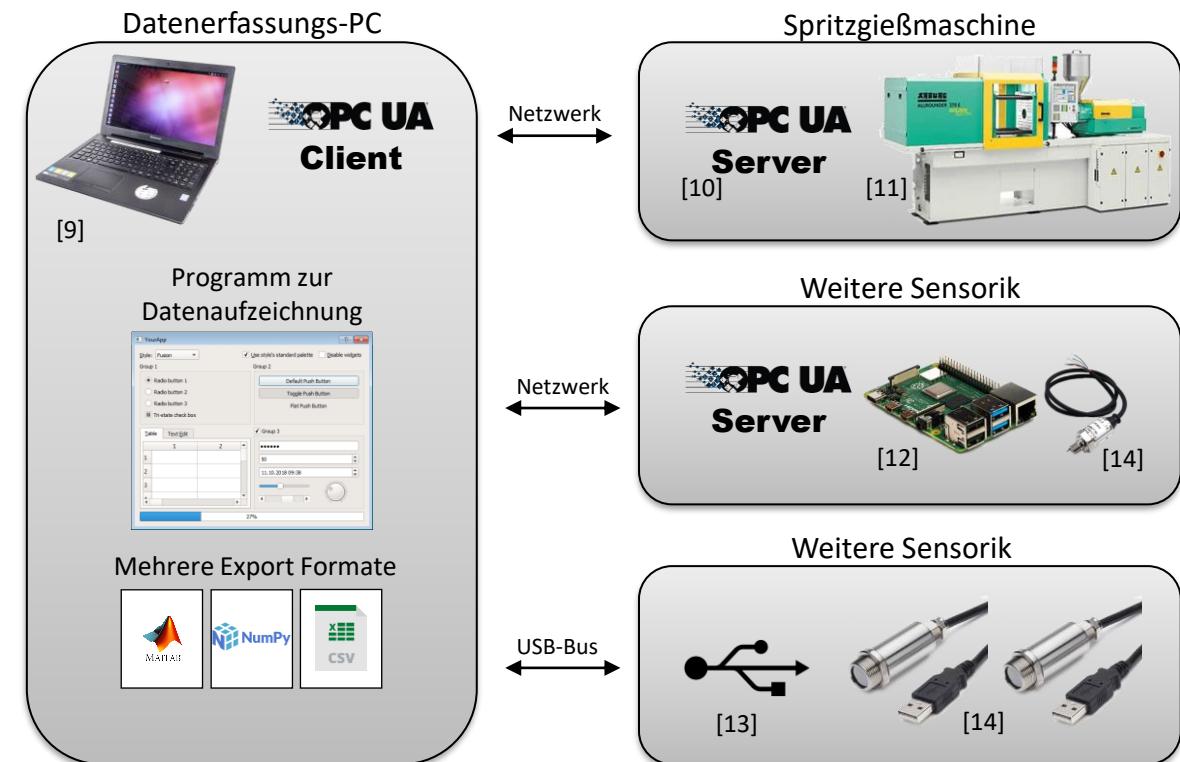
- Bauteilgewicht (Laborwaage)
- Maßhaltigkeit (optischer Messprojektor Keyence IM-7020)
- Mechanische Materialkennwerte (Zugprüfmaschine Z100, Zwick Roell) (offline)

Ziele:

- Datenerfassung der Maschinengrößen
- Einbinden weiterer Sensorik
- Einfaches Programm zur Datenaufzeichnung
- Export der Daten in mehrere gängige Formate

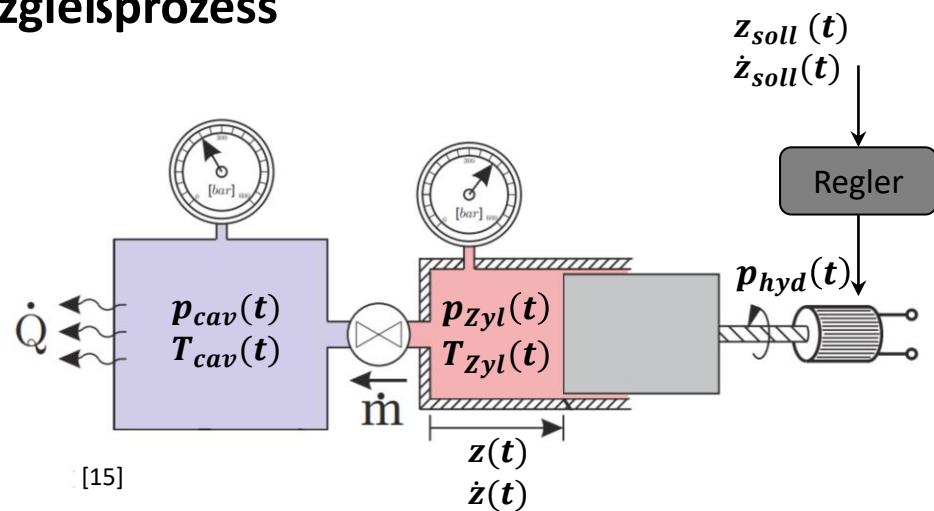
Geplante Umsetzung:

- Maschinendaten per OPC UA Server abfragen
- Weitere Sensorik
 - Direkt an Datenerfassungs-PC mittels USB Messgeräten
 - Messgeräte an Kleinstcomputer mit eigenem OPC UA Server
- Programmumsetzung in Python
- Export für Matlab, Python Numpy und als CSV Datei



Optimierung des Spritzgießprozesses

Spritzgießprozess

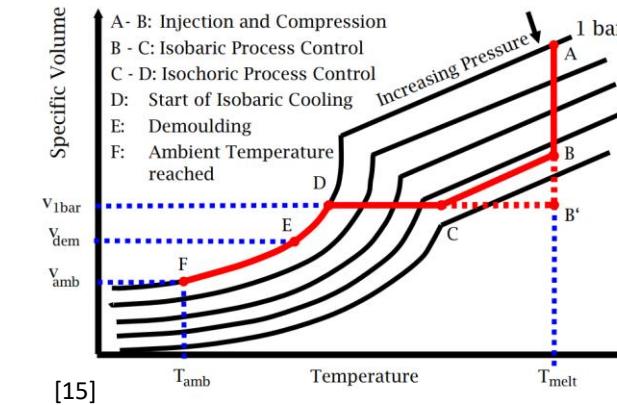


Grundlegende Modellvorstellung (Hopmann et al. 2013):

- Prozess kann prinzipiell durch zwei verbundene Druckkammern beschrieben werden
- Alle Zustände hängen von den obigen Prozessgrößen ab
- Physikalische Beschreibung aller Phänomene (Materialschwund, Wärmeübergang, Drücke aus pvT-Diagramm) extrem schwierig

→ Datengetriebenes adaptives Prozessmodell

Modell für Bauteilqualität



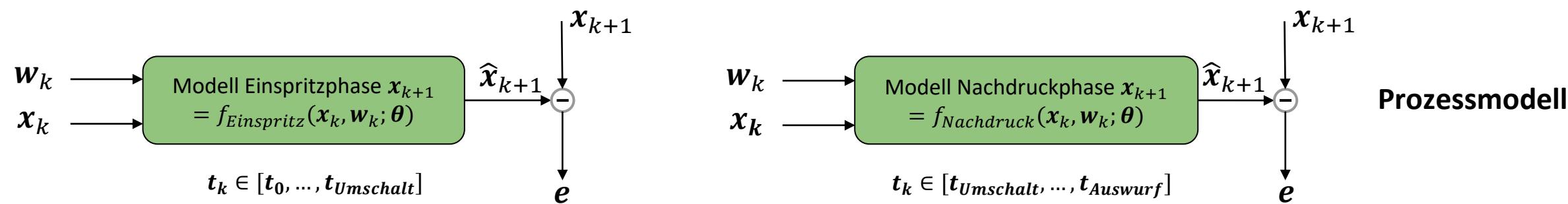
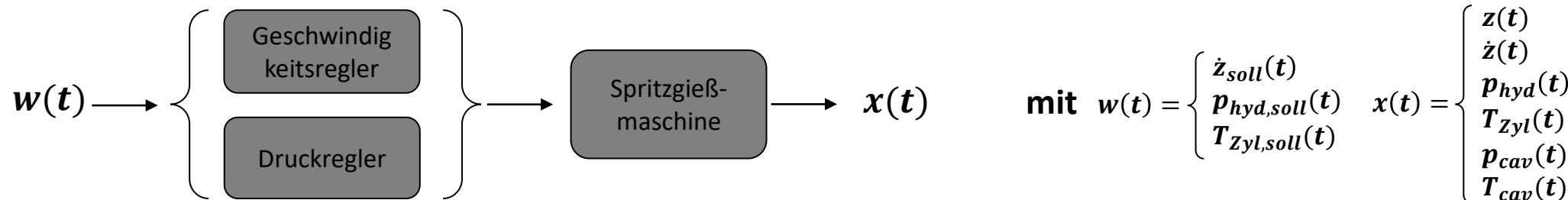
Stand der Technik: Ableitung einer Referenztrajektorie für den Bauteilinnendruck basierend auf dem pvT-Diagramm

- Aufwändig zu generieren
- Berücksichtigt nur den Werkzeuginnendruck
- Setzt konstante Materialeigenschaften voraus
- Maschine muss in der Lage sein den Bauteilinnendruck zu regeln

→ Datengetriebenes adaptives Qualitätsmodell zur Bestimmung der Referenztrajektorien der Prozessgrößen

Spritzgießprozesse

- Da die maschineninterne Regelung mitmodelliert werden muss, handelt es sich beim geregelten Spritzgießprozess um einen schaltenden Prozess



Kopplungsbedingung: Kontinuität der Zustände im Umschaltpunkt

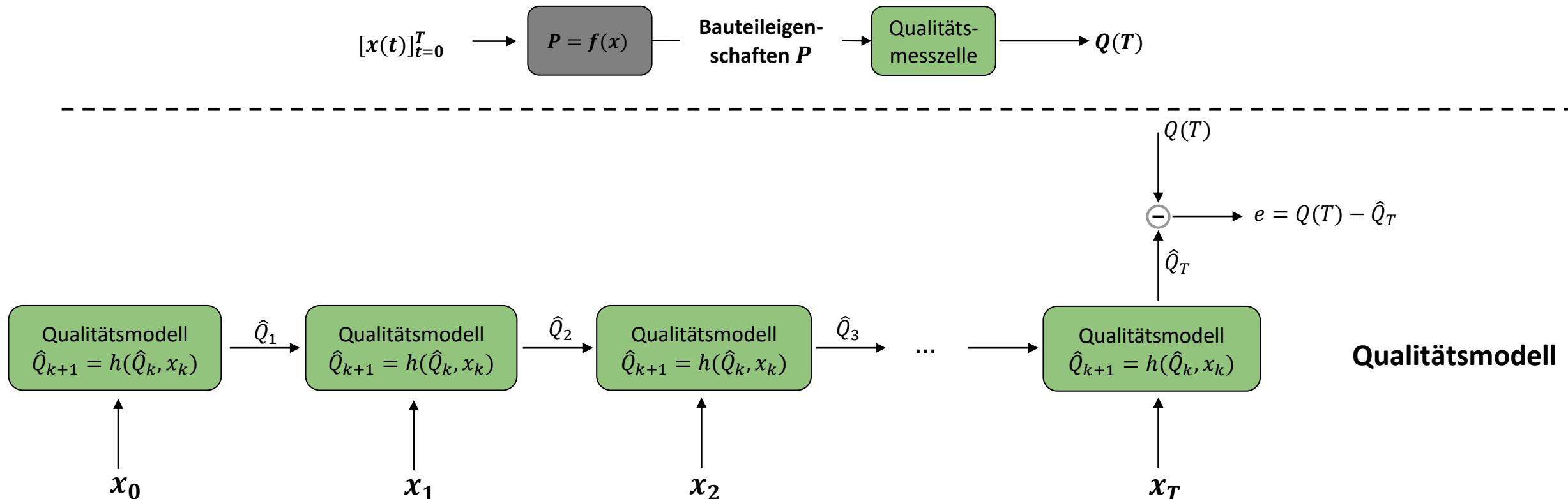
$$f_{Einspritz}(x_{Umschalt}, w_{Umschalt}) = f_{Nachdruck}(x_{Umschalt}, w_{Umschalt})$$

Modellansätze: nichtlinear, physikalisch motiviert oder bspw. Neuronales Netz

Parameterschätzung erfolgt offline, aufgezeichnete Daten aus Einrichtungsvorgang als Trainingsdaten

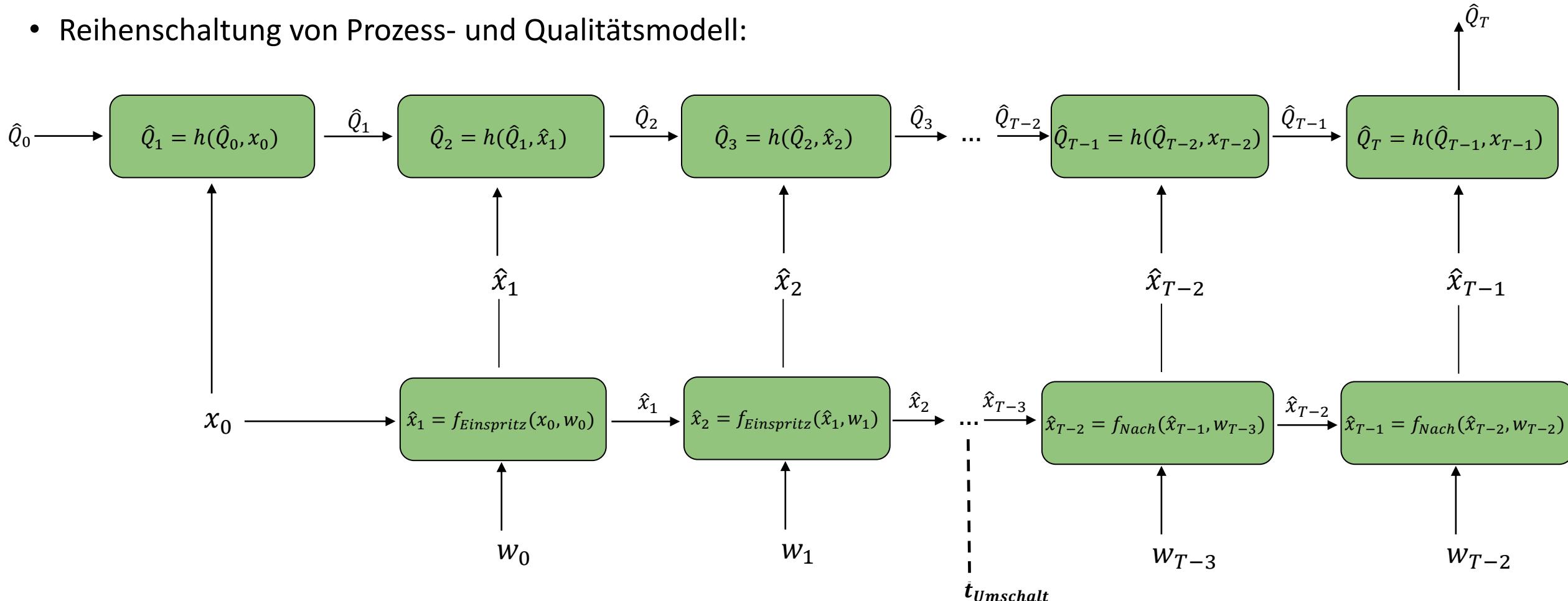
Qualitätsmodell II

- Besonderheit: Es steht nur eine einzige Messung der Bauteilqualität am Ende jedes Batches zur Verfügung.
- Modellansatz: Rekurrenzer nichtlinearer Modellansatz, z.B. Rekurrentes Neuronales Netz.



- Parameterschätzung erfolgt offline, aufgezeichnete Daten aus Einrichtungsvorgang als Trainingsdaten

- Reihenschaltung von Prozess- und Qualitätsmodell:

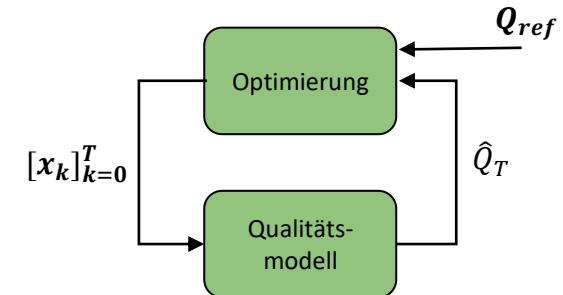


- Gegeben eine geforderte Bauteilqualität Q_T können die Modelle genutzt werden um $[x_k]_{k=0}^T$ und $[w_k]_{k=0}^T$ zu optimieren → Optimalsteuerungsproblem

Das Problem des Erreichens einer vorgegebenen Bauteilqualität wird als Optimalsteuerungsproblem in zwei Schritten formuliert:

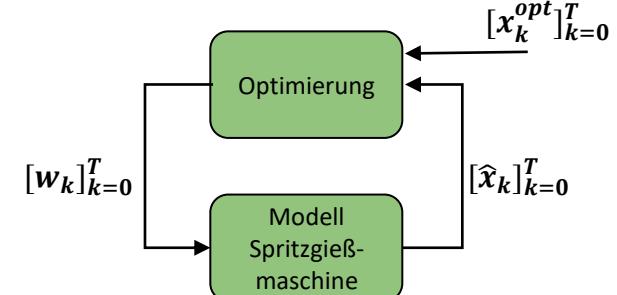
1. Es wird der optimale Verlauf der Prozessgrößen x ermittelt, um die vorgegebene Bauteilqualität Q_{ref} zu erzielen

$$\arg \min_x \|Q_{ref} - \hat{Q}_T(x)\| \rightarrow [x_k^{opt}]_{k=0}^T$$



2. Es werden die einzustellenden Führungsgrößen w_{opt} ermittelt, um den optimalen Prozessgrößenverlauf x_{opt} zu erhalten

$$\arg \min_w \| [x_k^{opt}]_{k=0}^T - [\hat{x}_k(w)]_{k=0}^T \| \rightarrow [w_k^{opt}]_{k=0}^T$$



Die Optimalsteuerungsprobleme werden numerisch in Casadi (Python) formuliert und gelöst

Optimierung der Führungsgrößen

- 6 Zustandsgrößen, $\hat{x} \in \mathbb{R}^6$
- 1-6 Zielgrößen
- Führungsgrößeentrajektorien der Länge N , $\hat{w} \in \mathbb{R}^N$ werden durch Stufenhöhen und Haltezeiten parametetriert → starke Reduktion der Optimierungsgrößen
- Schaltendes stark nichtlineares Prozessmodell
- Erwartete Rechendauer $\ll 30$ s

Optimierung der Prozessgrößen

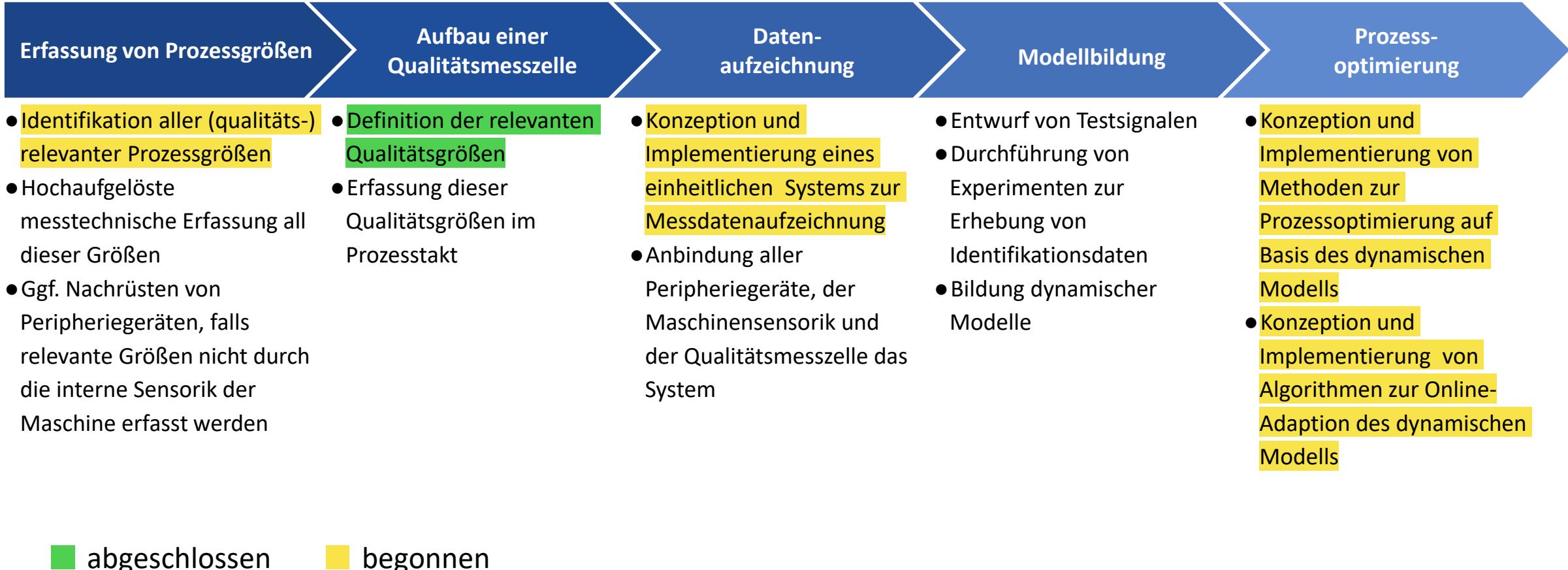
- Unbekannte Anzahl an Zuständen des Qualitätsmodells erforderlich
- 1 Zielgröße $Q(T)$ für die nur ein Messwert vorliegt
- 1-6 zu optimierende Trajektorien der Länge N , $\hat{x} \in \mathbb{R}^{N \times 6}$
- Stark nichtlineares Qualitätsmodell
- Optimale Zykluszeit N teil des Optimierungsproblems → Mixed Integer Optimal Control Problem
- Abschätzung der erwarteten Rechendauer schwierig,
 ≈ 30 s

-
- Erwartete Rechenzeiten beinhalten die Modelladaption noch nicht
 - Eventuell können optimierte Trajektorien erst zeitversetzt nach einigen Zyklen aufgeschaltet werden
 - Hardwareanforderungen: Gewöhnlicher Desktop PC oder Industrie-PC

- Konzeptionell gleiches Problem wie Bildung des initialen Prozess- und Qualitätsmodells → Schätzung von Modellparametern basierend auf dem Fehler zwischen Modellprädiktion und wahren Messdaten
- Schwierigkeit: Nichtlineare Optimierungsproblem können in schlechten Minima konvergieren oder gar divergieren, es gibt keine Konvergenzgarantien
- Kein Problem bei offline-Parameterschätzung: Schlechtes Modell wird verworfen und neu geschätzt
- Für online-Parameterschätzung müssen automatisierte Mechanismen implementiert werden, um Divergenzprobleme zu erkennen und entgegenzuwirken

Lösungsansätze

- Modelladaption nur nach Bedarf durchführen (z.B. wenn der Simulationsfehler einen Grenzwert überschreitet)
- Speichere alte Modelle als Rückfalloptionen, falls aktuelles Modell divergiert
- Parallel Verwendung und Aktualisierung mehrerer Prozess- und Qualitätsmodelle, angewendet wird das mit dem kleinsten Simulationsfehler
- Man-in-the-loop: Digitaler Zwilling liefert nur Vorschläge, der Anlagenführer entscheidet



- Begrüßung
- Vorstellung des Projekts DIM
- Technisch-methodische Entwicklung
- **Wissens- und Technologietransfer**
 - Geplante Transfermaßnahmen
 - Diskussion und Verabschiedung des Transferkonzeptes
- Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion



Softwaremodule

- Python-Bibliotheken. Kein GUI, dafür beispielgetriebene Dokumentation
- Veröffentlichung z.B. auf GitHub unter der BSD oder LGPL Lizenz (entgeltfrei kommerziell nutzbar)
- Alle Bibliotheken (außer für Datenexport) sind unabhängig von Maschinentyp und –hersteller
- Casadi ist in zahlreichen Embedded-Anwendungen bereits erprobt (Kräne, elektrische Antriebe, autonomes Fahren, Verbrennungsmotoren, ...)

Maschinenprotokolle

- Leitfaden zur Auswahl relevanter Prozessgrößen und zum Auslesen dieser über die Maschinensteuerung mit Hilfe maschineninterner und zusätzlicher Sensoren

Messgeräte zur Qualitätsüberwachung

- Leitfaden zur Integration von Messsystemen zur inline Qualitätskontrolle im Prozesstakt (Qualitätsmesszelle)
- Fallstudien am Demonstrator

Digitale Leitfäden

- Dienen im Wesentlichen der nachvollziehbaren Dokumentation des Entwicklungsprozesses
- Welche Entwicklungstätigkeiten sind durchzuführen, welche Lösungskonzepte und Werkzeuge wurden verwendet, welche Probleme traten bei der Umsetzung auf?
- Wissenskonservierung zum Zweck der Unterstützung von Entwicklungsvorhaben von Unternehmen
- Umfang einer PowerPoint Präsentation

Seminare (max. 30 Teilnehmer)

- Dienen der Vermittlung grundlegenden Fach- und Methodenwissens
- Seminare werden aufgezeichnet und zusammen mit Unterlagen zur Verfügung gestellt
- Formate: Präsenz-Seminar oder Webinar
- Umfang: Max. 1 Tag, Zielgruppe: Entwicklungingenieure

Hands-on Workshops (max. 30 Teilnehmer)

- Dienen der konkreten Anwendung der entwickelten Softwarebibliotheken
- Workshops werden aufgezeichnet und zusammen mit Unterlagen zur Verfügung gestellt
- Formate: Präsenz oder online
- Umfang: Max. 1 Tag, Zielgruppe: Entwicklungingenieure

- Begrüßung
- Vorstellung des Projekts DIM
- Technisch-methodische Entwicklung
- Wissens- und Technologietransfer
- **Organisation der Zusammenarbeit und Abschlussdiskussion**
 - Rolle des Projektbeirates und Modalitäten der Zusammenarbeit
 - Abschlussdiskussion



Aufgabe des Projektbeirates:

Sicherstellung der Bedarfsgerechtigkeit der durchgeführten Entwicklungs- und Transfermaßnahmen im Projektlenkungskreis

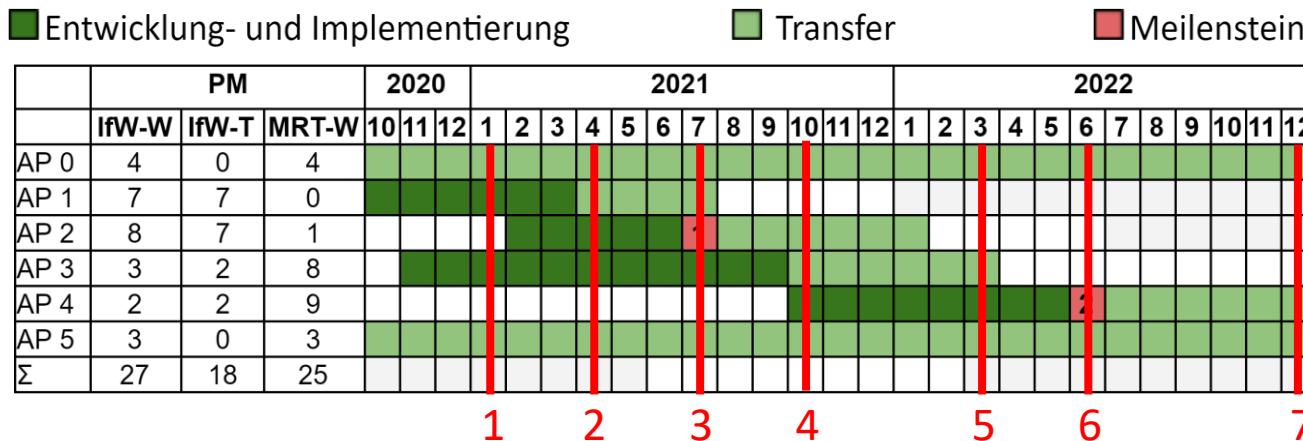
- Erfassung des Entwicklungs- und Transferbedarfs in Zusammenarbeit mit den Projektbearbeitern
- Planung der Entwicklungs- und Transfermaßnahmen in Kooperation mit den Projektbearbeitern
- Regelmäßige Rückkopplung der Entwicklungs- und Transfertätigkeiten

→ Die entwickelten Technologien und Transfermaßnahmen müssen aus Sicht der Unternehmen wertvoll sein!

<https://www.uni-kassel.de/forschung/digital-twin-of-injection-molding/>

Zusammenkommen des Projektlenkungskreises (Vorschlag)

- Beginn jedes Arbeitspaketes zur Ausarbeitung und Verabschiedung der Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- Am Ende jedes Arbeitspaketes zur Maßnahmenkontrolle



AP0: Projektlenkungskreis

AP1: Aufbau der Qualitätsschleife

AP2: Datenaufzeichnung

AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling

AP4: Prozessoptimierung

AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

MS1: Demonstratoranlage aufgebaut

MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

1. Kick-Off
2. Ausarbeitung Transfermaßnahmen Qualitätsschleife & Datenaufzeichnung
3. Präsentation der Demonstratoranlage & Ausarbeitung Transfermaßnahmen Modellbildung
4. Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung & Planung Entwicklungsmaßnahmen Prozessoptimierung
5. Rückkopplung Transfermaßnahmen Modellbildung & Planung Transfermaßnahmen Prozessoptimierung
6. Präsentation der entwickelten Software (ggf. Demonstration an Demonstratoranlage)
7. Abschlusstreffen

- [1] <https://hmq-laserscanning.ch/referenzen/644/spritzgiessmaschine.html>
- [2] Schmitt et al. „Digitaler Zwilling in der Kunststofftechnik“. In: Industrie 4.0 Management 37 (2021) 2, p. 17-20
- [3] <https://www.rspinc.com/wp-content/uploads/2019/10/poly-vs-plastic.jpg>
- [4] <https://www.sartorius.com/resource/image/337832/16x9/510/286/b604e45a8625a2493b7935deec9ea037/BW/wl0194d2-wh.jpg>
- [5] https://www.gwk.com/assets/images/7/PR7_teco%20mit%20vtc-130c0d07.jpg
- [6] <https://www.sartorius.com/resource/image/323214/16x9/330/186/c1b3035d70f732b3e3cdfc9997cc5e3f/th/cubis-ii-balance-composition-analytical-balance.jpg>
- [7] https://www.keyence.de/img/products/model/AS_86669_L.jpg
- [8] https://www.zwickroell.com/zrmedia/_processed_/5/0/csm_CTA135805_TVM1353236_569bd0dde4.png
- [9] <https://de.wikipedia.org/wiki>Notebook>
- [10] <https://opcfoundation.org/>
- [11] https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/bilder/presse_300dpi/arburg_091335_allrounder_370h.jpg
- [12] https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
- [13] https://de.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus
- [14] <https://www.omega.de/pptst/OS-MINIUSB.html>
- [15] Reiter at al. „Model Predictive Control of Cavity Pressure in an Injection Moulding Process“. In: *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*. August 24-29, 2014