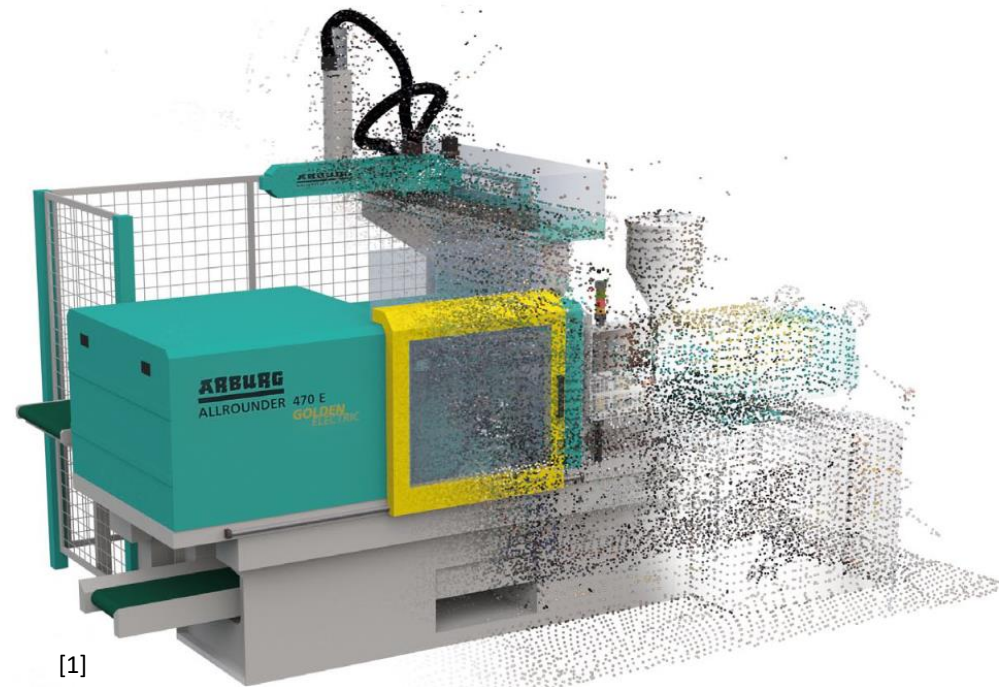


# Seminar- & Workshop-Reihe

## Digital Twin of Injection Molding (DIM)



[1]



# Digitale Zwillinge in der Kunststoffverarbeitung

23.11.2021



[1]



- **Begrüßung**
  - Vorstellung des Projektteams
  - Vorstellung der Fachgebiete MRT & IfW
- **Digitalisierung in der Kunststofftechnik**
- **Vorstellung des Projekts DIM**
- **Entwicklungs- und Transfermaßnahmen**
- **Überblick Workshopreihe**



## Forschungskonsortium

- Institut für Werkstofftechnik / FG Kunststofftechnik, Prof. Dr.-Ing. H.-P. Heim
- FG Mess- und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. A. Kroll



Marco Klute



+



Alexander Rehmer



+

Technischer  
Mitarbeiter



+

Studentische  
Hilfskräfte



## Kontakt:

- [dim@uni-kassel.de](mailto:dim@uni-kassel.de)
- [www.uni-kassel.de/go/DIM](http://www.uni-kassel.de/go/DIM)



## Forschungskonsortium

- Institut für Werkstofftechnik / FG Kunststofftechnik, Prof. Dr.-Ing. H.-P. Heim
- FG Mess- und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. A. Kroll

## Projektbeirat

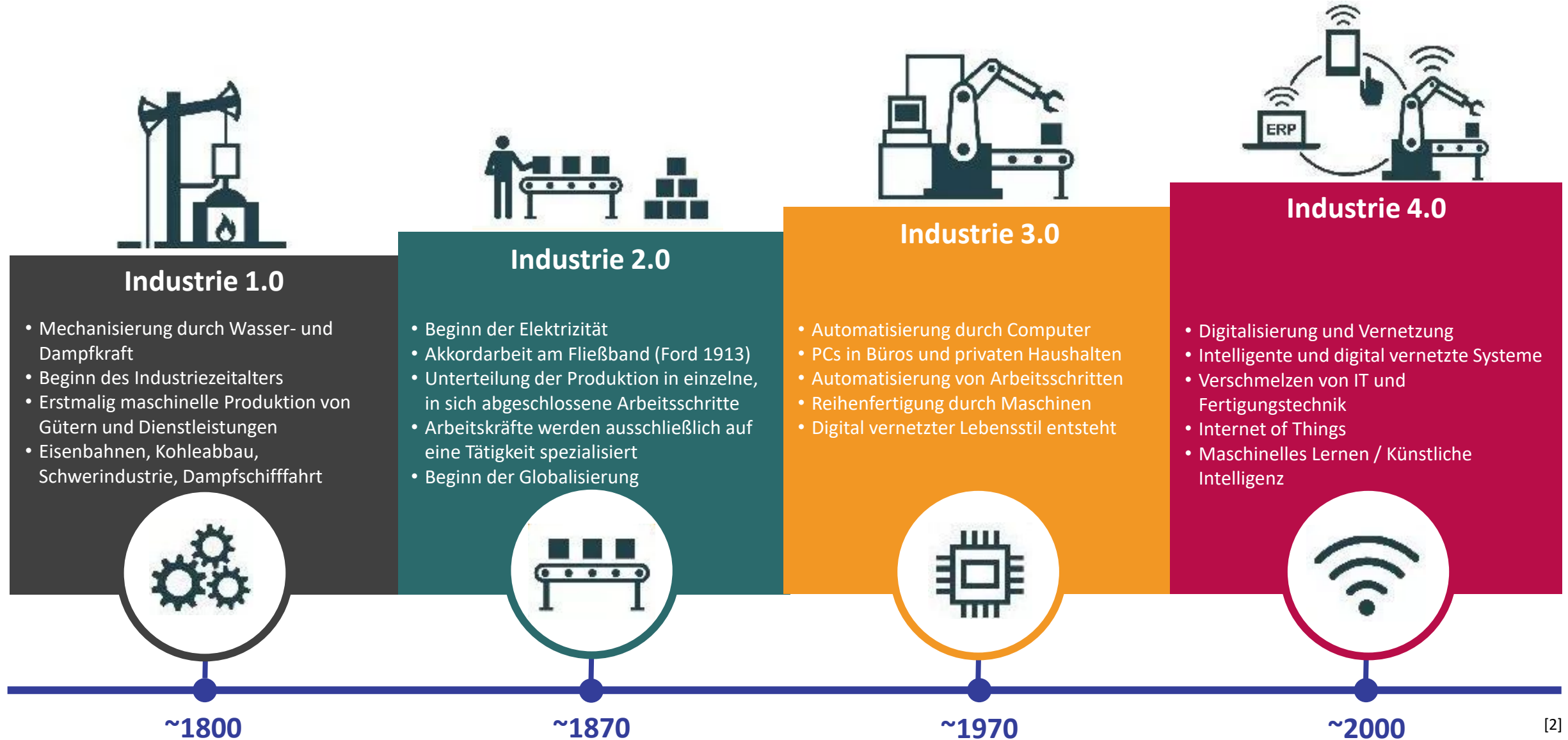
- Überwacht Entwicklungsarbeiten
- Besteht aus 7 Unternehmen



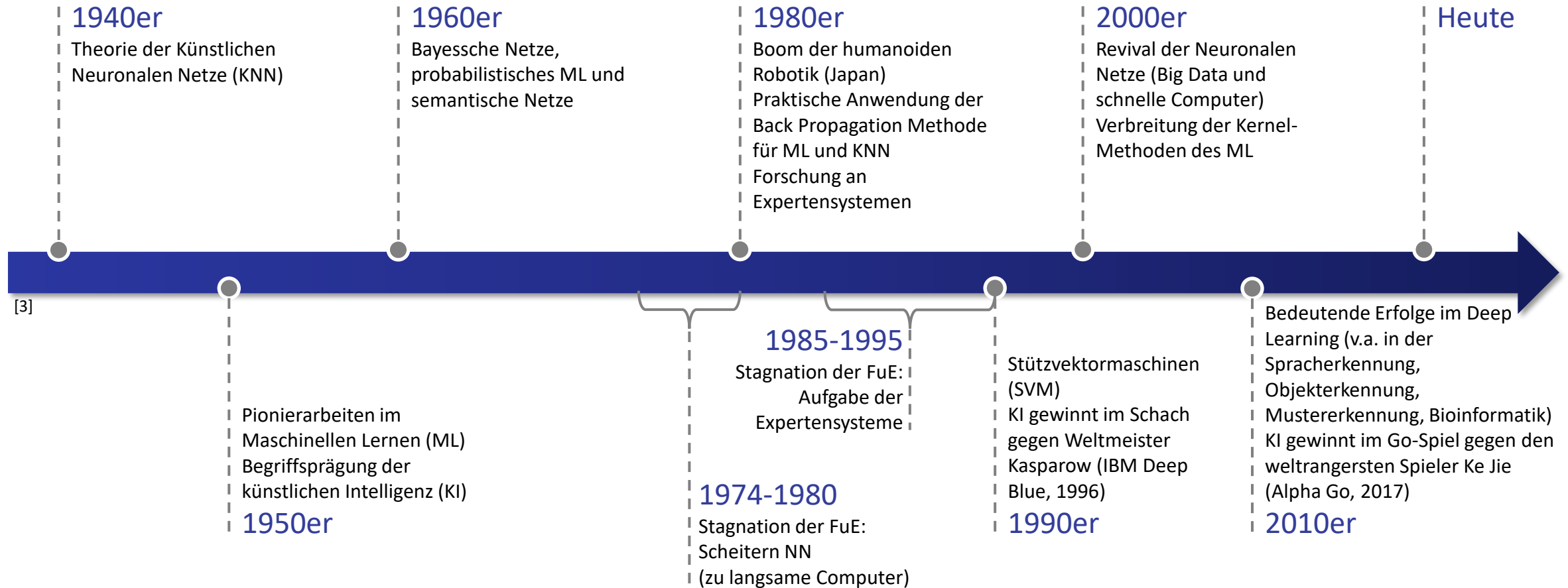


- Begrüßung
- **Digitalisierung in der Kunststofftechnik**
  - Geschichtlicher Hintergrund von I4.0 und KI
  - ML im Spritzgießprozess
- Vorstellung des Projekts DIM
- Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- Überblick Workshopreihe







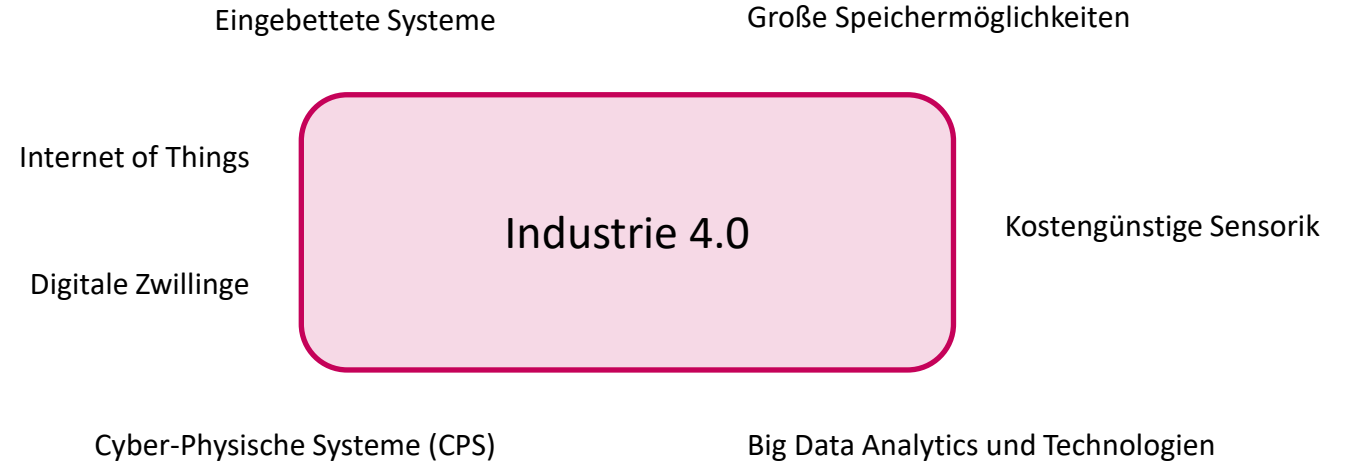




## Heute

- ML-basierte Systeme sind inzwischen in der Lage,
- radiologische Bilder so gut wie Mediziner zu analysieren
  - automatisch unklare Bilder zu vervollständigen
  - selbst KI-Software zu schreiben und zu trainieren
  - Börsengeschäfte anhand eigener Prognosen selbständig durchzuführen
  - in komplexen Spielen wie Go und Poker gegen Menschen zu gewinnen
  - sich selbst Wissen, Spiele und Strategien beizubringen

[3]

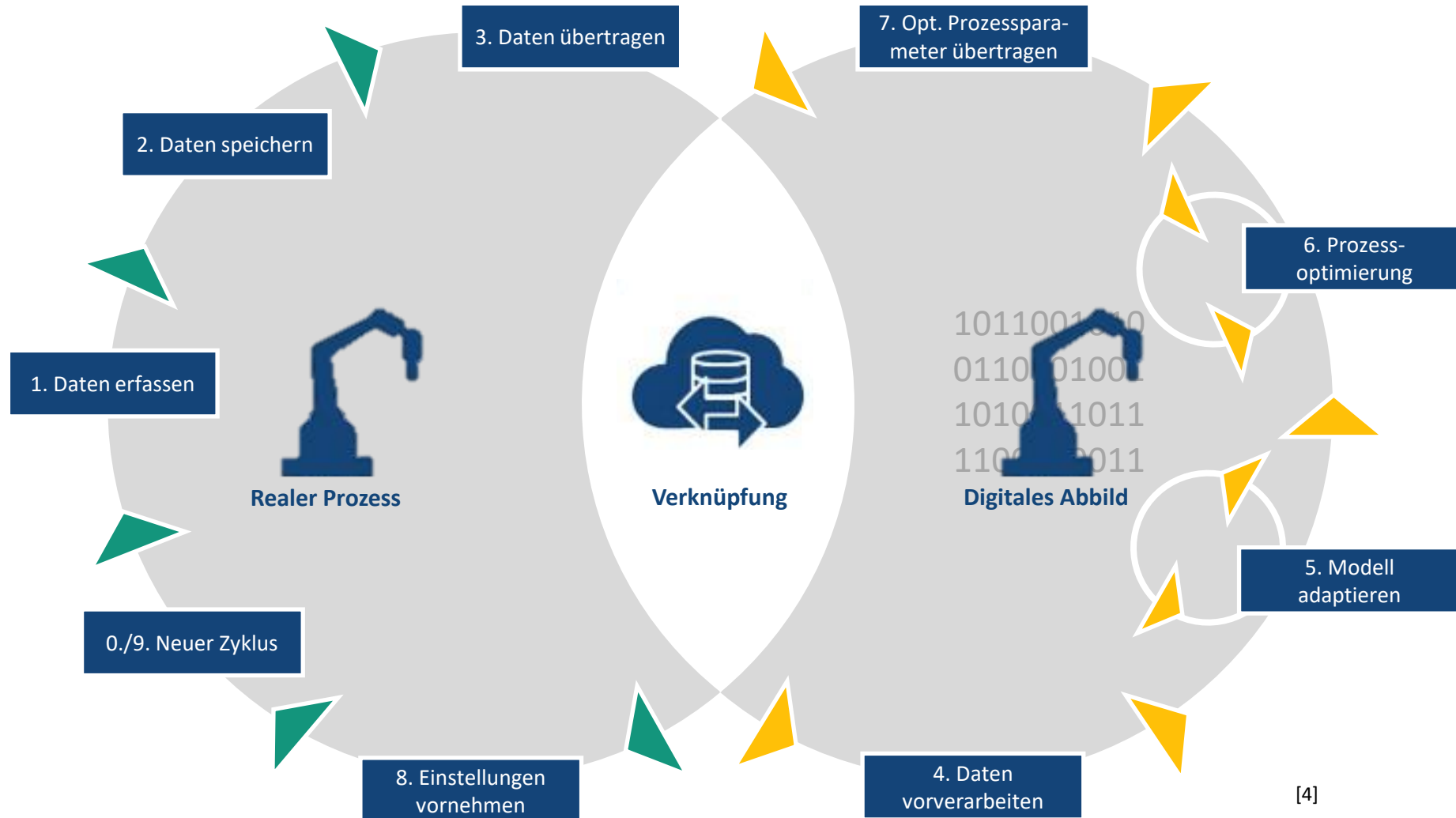


Zunehmende Digitalisierung und Vernetzung im Rahmen von Industrie 4.0 eröffnen innovative Möglichkeiten für die qualitätsorientierte und datengetriebene Weiterentwicklung und Optimierung von Produkten und Prozessen.

## Digitale Zwillinge

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





[4]



„Spritzgussbranche nimmt eine Vorreiterrolle in punkto Industrie 4.0 ein.“

– Michael Grupp, freier Journalist



[5]



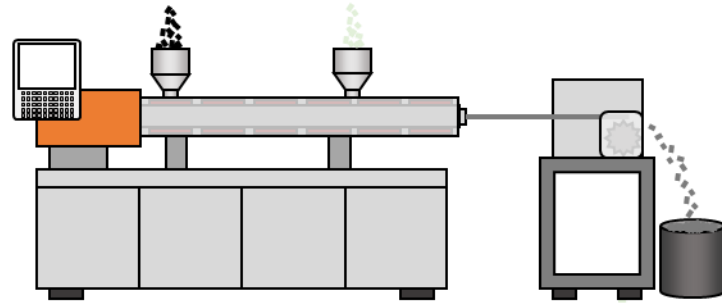
[6]



- Begrüßung
- Digitalisierung in der Kunststofftechnik
- **Vorstellung des Projekts DIM**
  - Motivation
  - Projektziele und Mehrwert
- Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- Überblick Workshopreihe



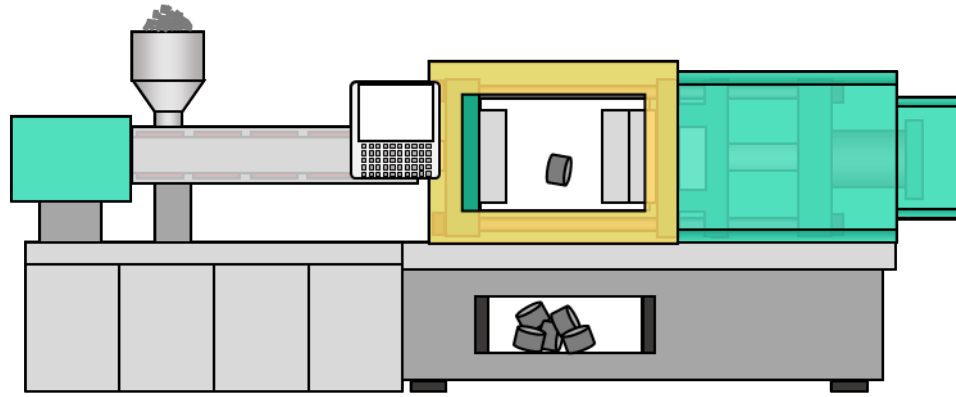
## Compoundierung



Rohmaterialien

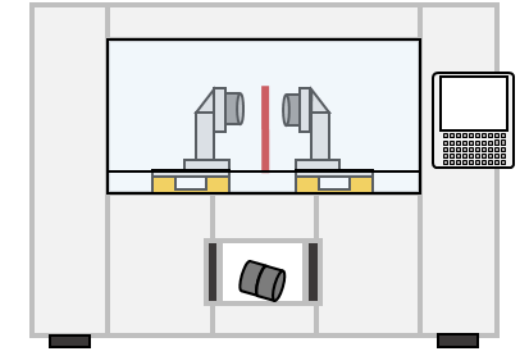
Verbundwerkstoff

## Spritzguss



Spritzgussteil

## Schweißen

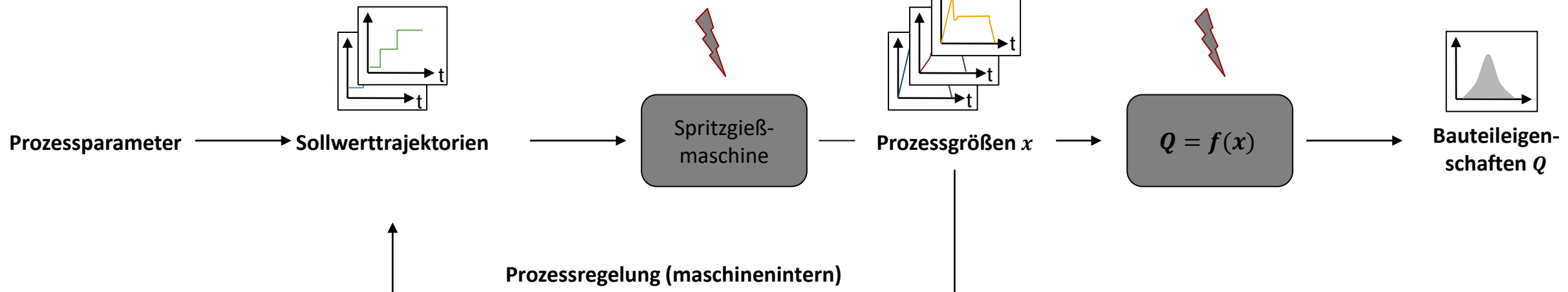


Endprodukt

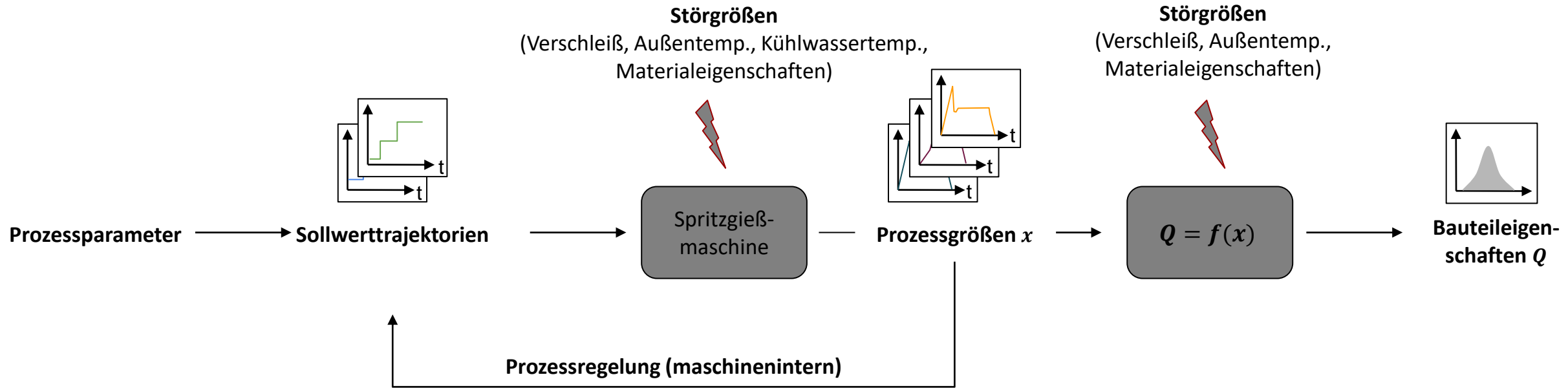
[7]

**Störgrößen**  
(Verschleiß, Außentemp., Kühlwassertemp.,  
Materialeigenschaften)

**Störgrößen**  
(Verschleiß, Außentemp.,  
Materialeigenschaften)







Übliche Ansätze zur Modellierung / Regelung / Steuerung der Bauteilqualität:

- **Regressionsmodelle** basierend auf DOE-Versuchsplänen: Vernachlässigen dynamische Zusammenhänge zwischen Prozessgrößentrajektorien und den resultierenden Bauteileigenschaften
- **Prozessregelung**: Regelung der Prozessgrößen unter der Annahme, dass deren Zusammenhang mit den Bauteileigenschaften unveränderlich sei, was bei Wirken äußerer Störgrößen (Materialeigenschaften, Außentemperatur, etc.) nicht der Fall sein muss
- **Eigenschaftsregelungen** wie bspw. Engel iQ weight control: Ebenfalls Prozessregelung, indirekte Regelung des eingespritzten Schmelzevolumens, Kompensation von Viskositätsschwankungen, keine Berücksichtigung weiterer Bauteileigenschaften

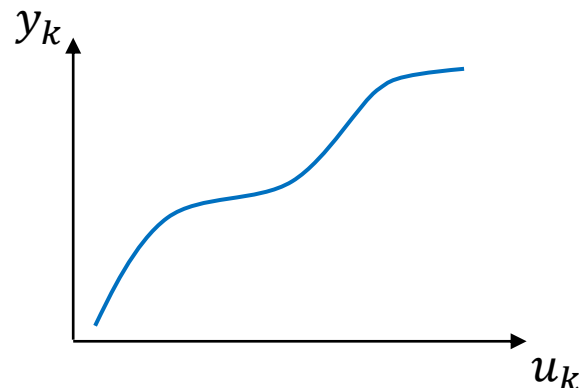


## Statische Modelle

- Werden beschrieben durch algebraische Gleichungen

$$y_k = f(u_k)$$

- Eingangsgröße  $u$  bewirkt ohne zeitliche Verzögerung eine Änderung der Ausgangsgröße  $y$
- Keine Beschreibung von zeitlichen Ausgleichsvorgängen möglich
- Lediglich Abbildung von Gleichgewichtszuständen nach Abschluss aller Ausgleichsvorgänge möglich

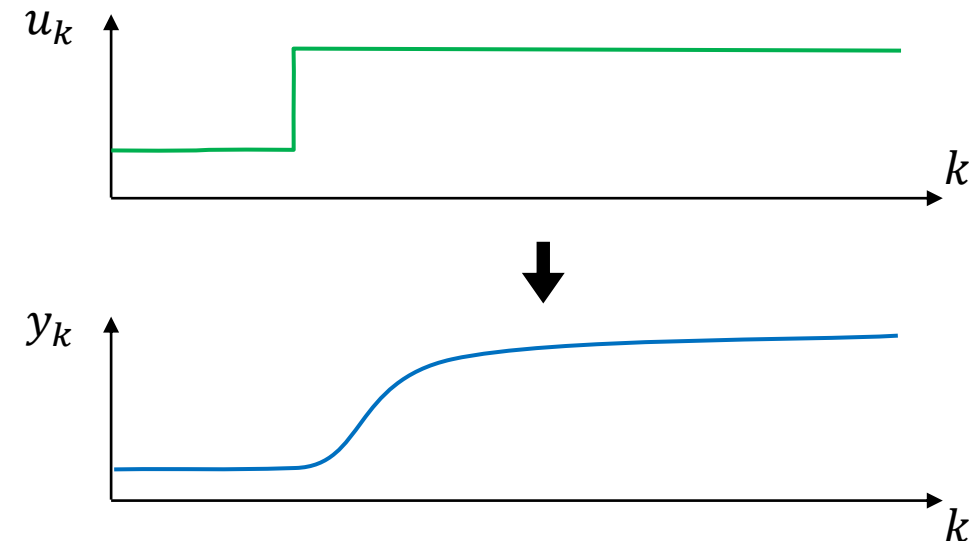


## Dynamische Modelle

- Werden beschrieben durch Differenzengleichungen

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k) \\ y_k &= g(x_k) \end{aligned}$$

- Eingangsgröße  $u$  wirkt zeitlich verzögert auf die Ausgangsgröße  $y$ , da interne Ausgleichsvorgänge stattfinden
- Beschreibung des gesamten Verhaltens eines Prozesses möglich, d.h. Eingangsgrößenverläufe werden auf Ausgangsgrößenverläufe abgebildet

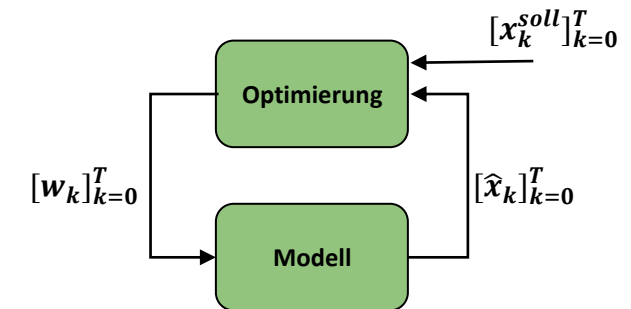
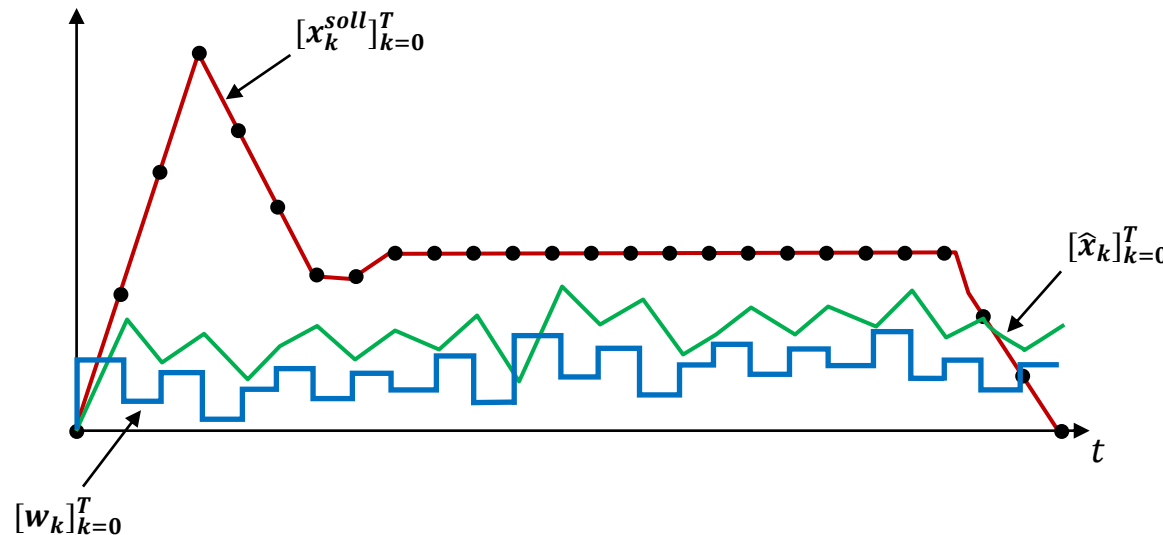




Ein numerisches Optimalsteuerungsproblem bezeichnet das Finden einer Eingangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{w}_k]_{k=0}^T$ , sodass eine vorgegebene Ausgangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{x}_k^{soll}]_{k=0}^T$  resultiert.

Für die Lösung von Optimalsteuerungsproblemen ist ein dynamisches Modell, welches die Ausgangsgröße  $[\hat{\mathbf{x}}_k]_{k=0}^T$  prädiziert, sowie ein Optimierungsverfahren erforderlich.

Handelt es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem, kann dieses nur iterativ gelöst werden.

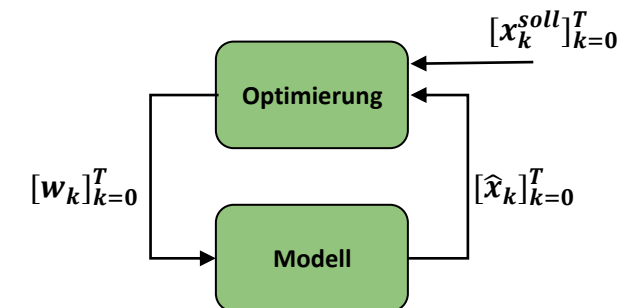
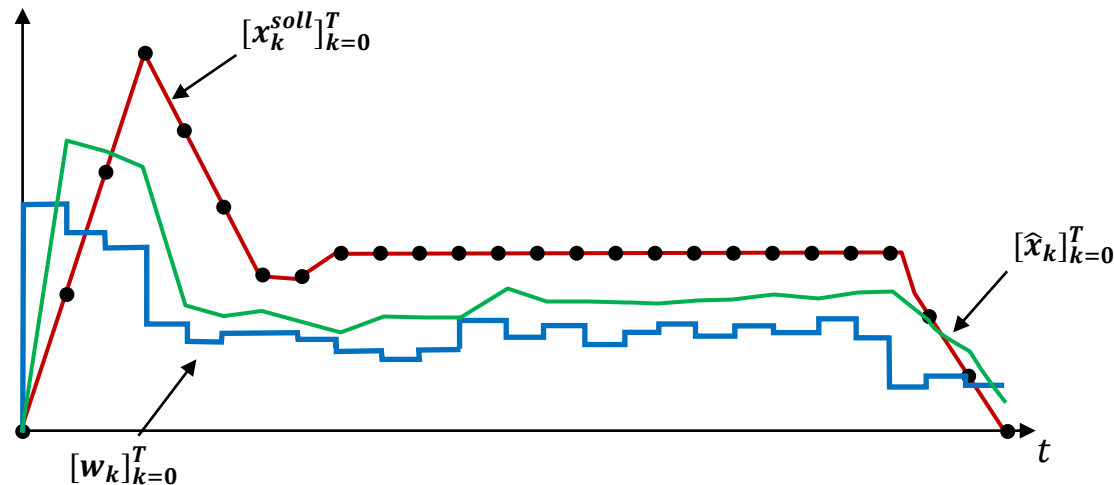




Ein numerisches Optimalsteuerungsproblem bezeichnet das Finden einer Eingangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{w}_k]_{k=0}^T$ , sodass eine vorgegebene Ausgangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{x}_k^{soll}]_{k=0}^T$  resultiert.

Für die Lösung von Optimalsteuerungsproblemen ist ein dynamisches Modell, welches die Ausgangsgröße  $[\hat{\mathbf{x}}_k]_{k=0}^T$  prädiziert, sowie ein Optimierungsverfahren erforderlich.

Handelt es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem, kann dieses nur iterativ gelöst werden.

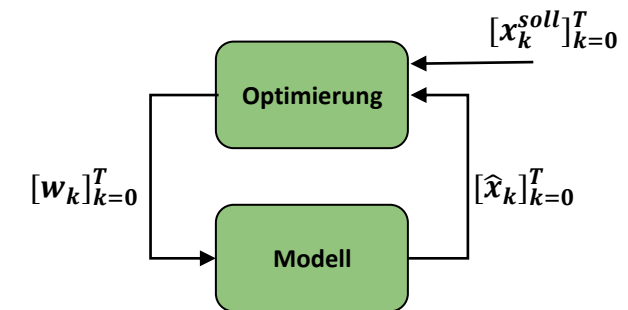
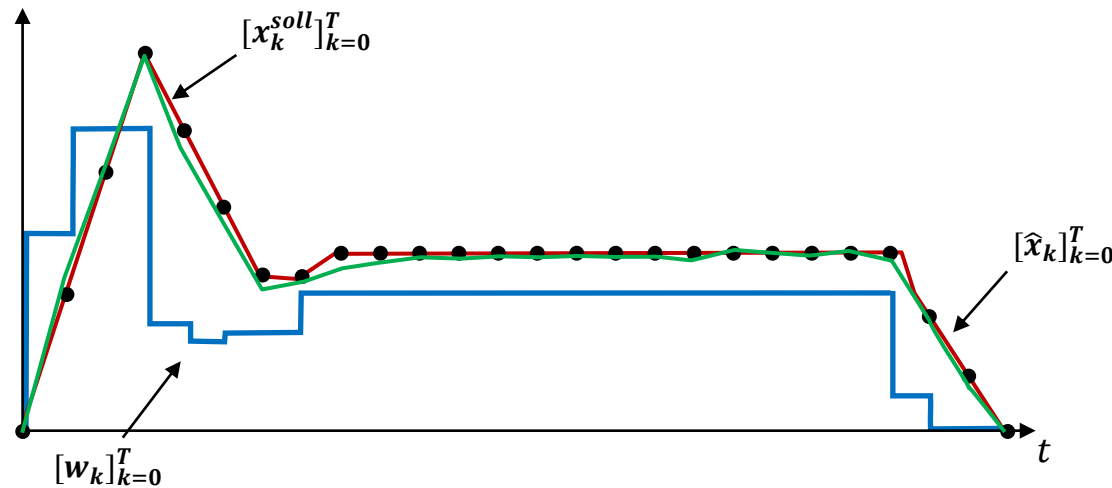




Ein numerisches Optimalsteuerungsproblem bezeichnet das Finden einer Eingangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{w}_k]_{k=0}^T$ , sodass eine vorgegebene Ausgangsgrößentrajektorie  $[\mathbf{x}_k^{soll}]_{k=0}^T$  resultiert.

Für die Lösung von Optimalsteuerungsproblemen ist ein dynamisches Modell, welches die Ausgangsgröße  $[\hat{\mathbf{x}}_k]_{k=0}^T$  prädiziert, sowie ein Optimierungsverfahren erforderlich.

Handelt es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem, kann dieses nur iterativ gelöst werden.

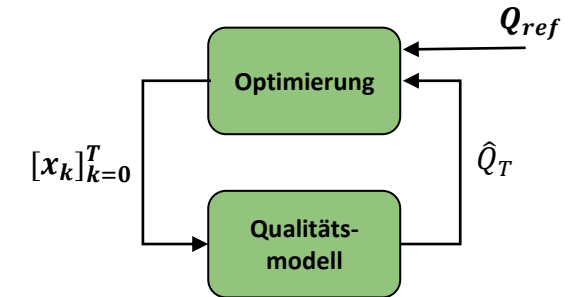




Das Problem des Erreichens einer vorgegebenen Bauteilqualität wird als Optimalsteuerungsproblem in zwei Schritten formuliert:

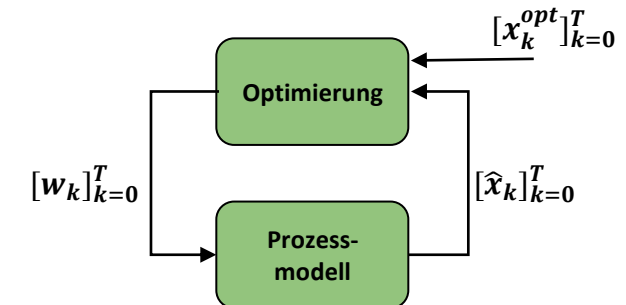
1. Es wird der optimale Verlauf der Prozessgrößen  $x$  ermittelt, um die vorgegebene Bauteilqualität  $Q_{ref}$  zu erzielen

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



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

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



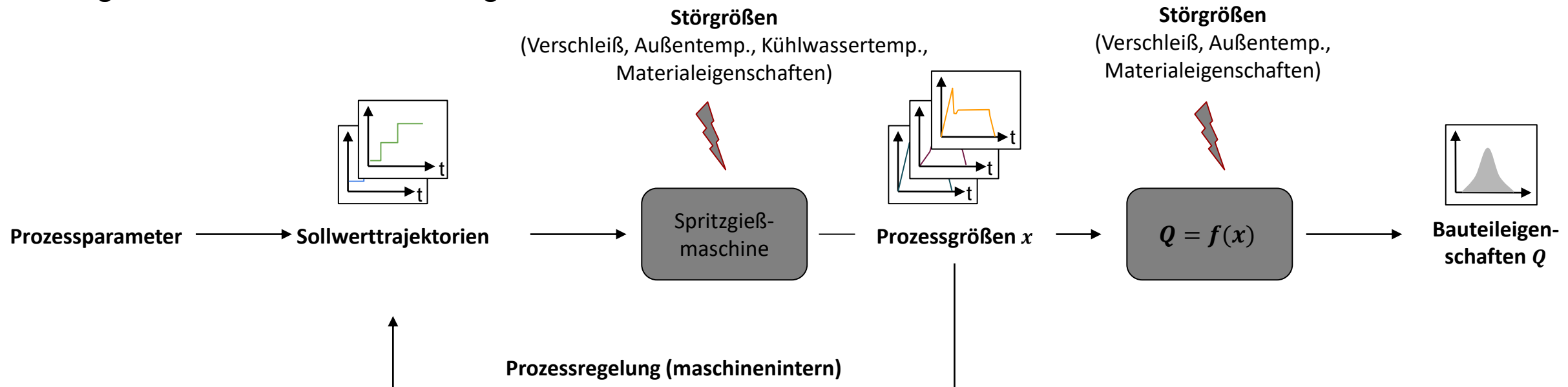
Die Optimalsteuerungsprobleme werden numerisch in Casadi (Python) formuliert und gelöst



## Ziel des Projektes

- Erfassung aller Prozessgrößen und prozesstaktnahe Erfassung der Qualitätsgrößen
- Bildung dynamischer Simulationsmodelle für den Spritzgießprozess und den qualitätsbildenden Prozess, welche die in den Zeitverläufen der Prozessgrößen enthaltenen Informationen ausnutzen
- Nutzung dieser Simulationsmodelle um eine modellbasierte Steuerung der Bauteileigenschaften vorzunehmen
- Automatisierte Adaption der Simulationsmodelle zur Kompensation von Störgrößen

**Randbedingung:** Das Verfahren muss in den bestehenden Produktionsprozess möglichst einfach integriert werden können, kein Eingriff in Maschinensoftware möglich





## Methoden & Konzepte

- Direkte Steuerung der Bauteileigenschaften, anstatt deren indirekte Einstellung durch maschineninterne Prozessgrößenregelung.
- Dynamische Modellierung des gesamten Spritzgießprozesses anstatt statischer Modellierung. Somit vollumfängliche Nutzung der in den erfassten Prozessgrößentrajektorien enthaltenen Information.
- Modelldaption ermöglicht Kompensation veränderter Wirkzusammenhänge durch während des Betriebes auftretender Störgrößen.

## Technologie- und Wissenstransfer

- Entwicklung und Transfer einer auf den Spritzgießprozess zugeschnittenen Toolbox für Messdatenerfassung, dynamische Modellbildung und numerische Optimalsteuerung
- Transfer umfangreichen Methodenwissens
- Leitfäden, welche den Entwicklungsprozess eines Digitalen Zwillings dokumentieren

## Untersuchungsergebnisse

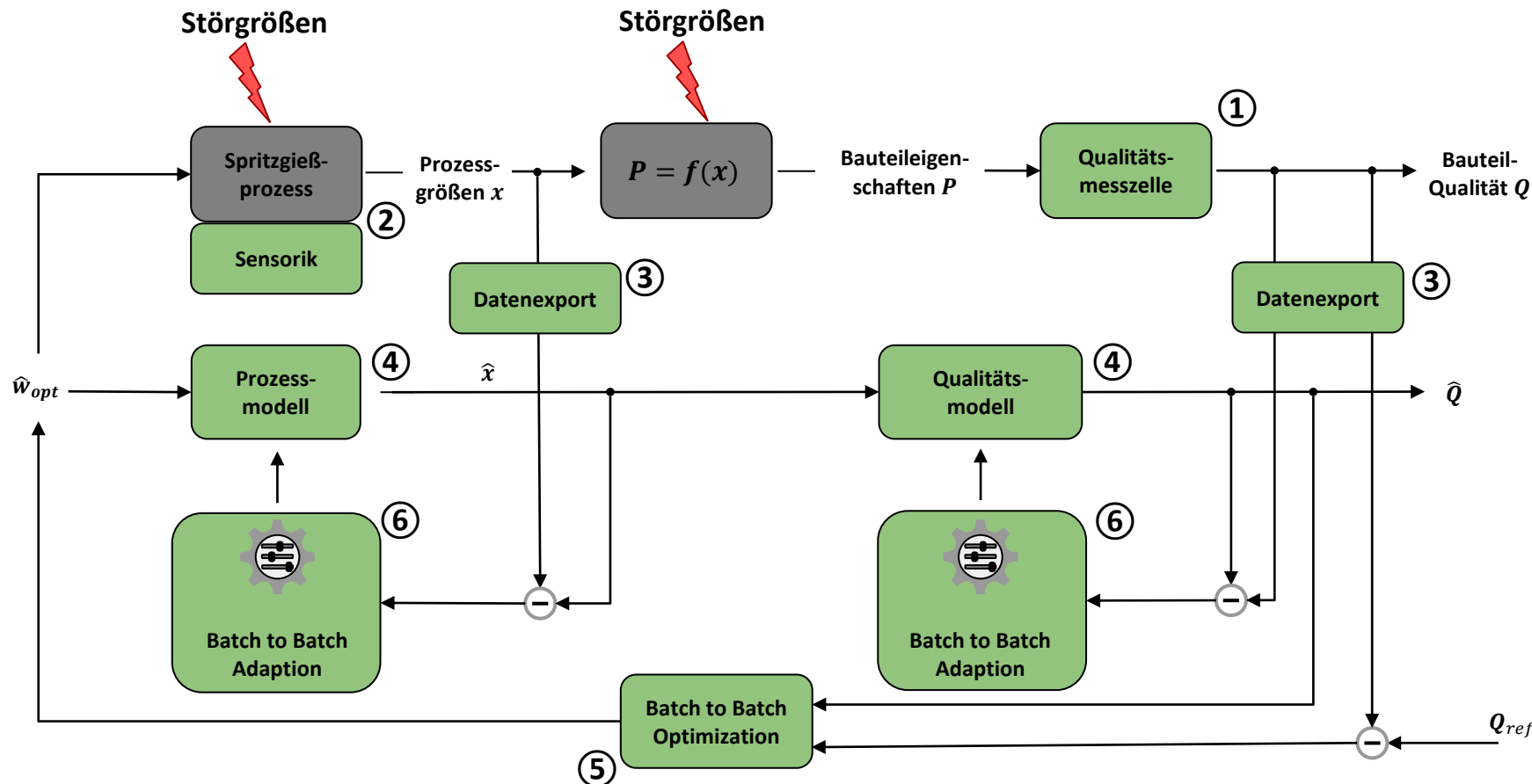
- Lohnt sich der Aufwand der dynamischen Modellierung?
- Ist die direkte Steuerung der Bauteileigenschaften gegenüber der Prozessregelung vorteilhaft?



- Begrüßung
- Digitalisierung in der Kunststofftechnik
- Vorstellung des Projekts DIM
- **Entwicklungs- und Transfermaßnahmen**
- Überblick Workshopreihe



## Konzept des Digitalen Zwillings



## Entwicklungsschritte:

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



## Entwicklung

- Nachrüsten von Sensoren zur Erfassung von Prozess- und Störgrößen
- Auswahl relevanter Prozessgrößen für die Modellbildung
- Aufbau einer Qualitätsmesszelle



## Transfer

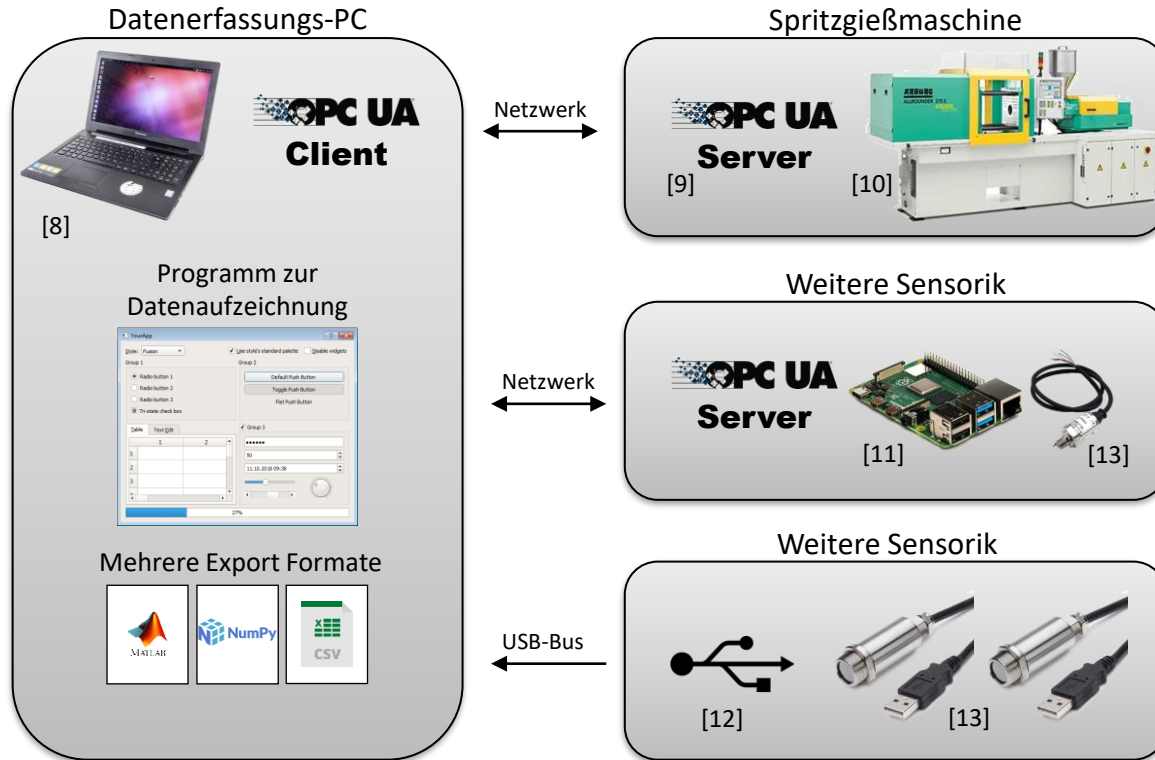
### Erfassung von Prozess- und Qualitätsgrößen

- Seminar (1 h)
- Auswahl der nötigen Prozessgrößen
- Sensorik zur Erfassung zusätzlicher Prozess- und Störgrößen
- Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen
- Aufbau einer Qualitätsmesszelle





## Entwicklung



## Transfer

### Python

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Vermittlung grundlegender und fortgeschrittener Programmierkenntnisse in Python um Anwendung und Anpassung der entwickelten Toolbox zu ermöglichen

### Datenaufzeichnung mit OPC-UA

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Anwendung und Funktionsweise der entwickelten Methoden zur Datenaufzeichnung

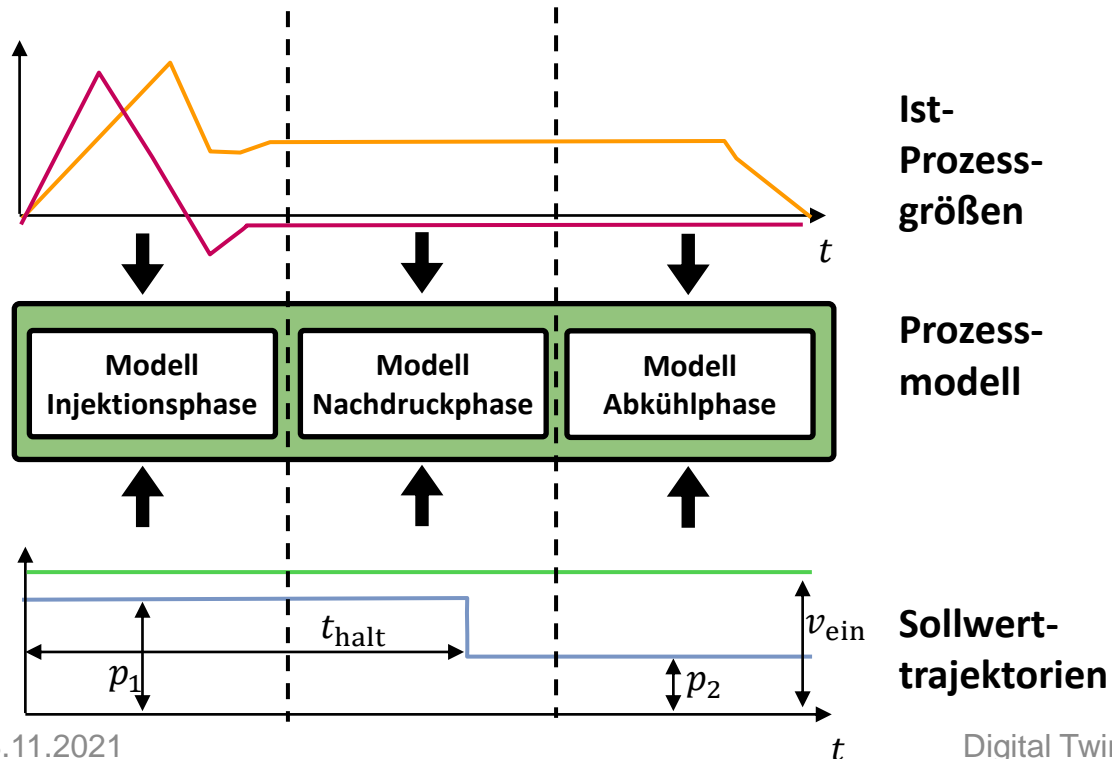
### OPC UA = Open Platform Communication United Architecture

- Datenaustauschstandard für industrielle Kommunikation
- Maschine-zu-Maschine- oder PC-zu-Maschine-Kommunikation
- Unabhängig von Hersteller, Betriebssystem, Programmiersprache



## Entwicklung

- Entwicklung von Modellarchitekturen und Methoden zur dynamischen Modellierung des Spritzgießprozesses
- Modelle bilden Sollwerttrajektorien auf tatsächlich resultierende Prozessgrößentrajektorien ab
- Implementierung in Python
- Optimierung mit Casadi



## Transfer

### Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Vermittlung der Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung und nichtlinearen Optimierung
- Einführung in das Optimierungsframework Casadi
- Lösung kleiner Fallstudien

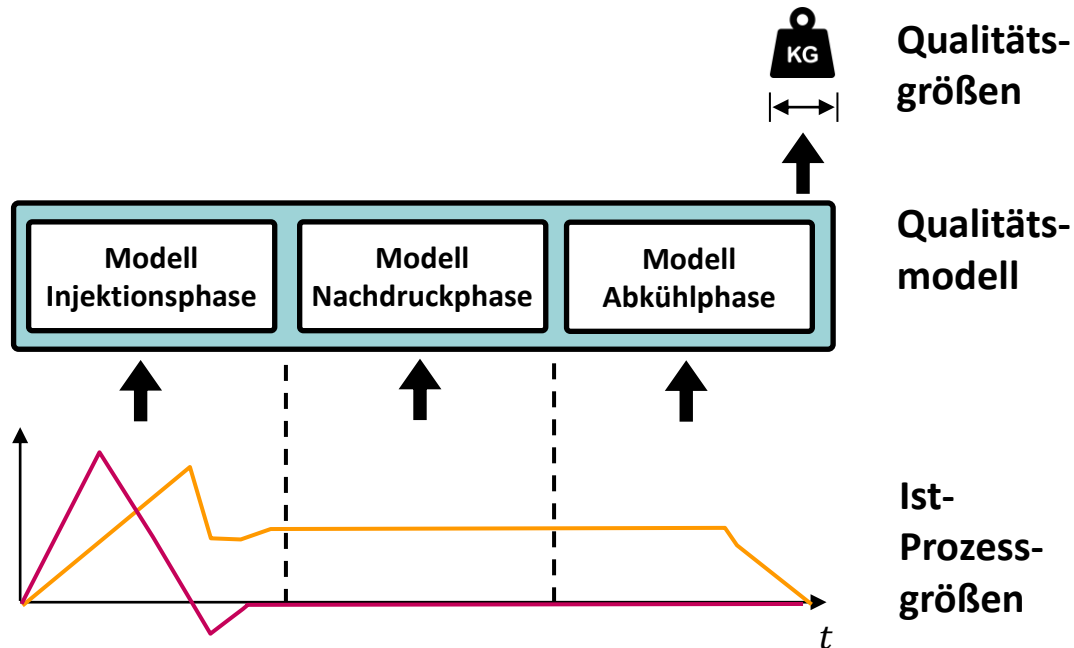
### Datengetriebene Modellbildung des Spritzgießprozesses

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Modellierung des prozessgeregelten Spritzgießprozesses
- Anwendung und Funktionsweise der entwickelten Methoden zur Bildung des Prozessmodells
- Lösung kleiner Fallstudien



## Entwicklung

- Entwicklung von Modellarchitekturen und Methoden zur dynamischen Modellierung des qualitätsbildenden Prozesses
- Modelle bilden Prozessgrößentrajektorien auf die resultierenden Qualitätsgrößen ab
- Spezieller Modellansatz: Rekurrente Modellstrukturen (bspw. Rekurrente Neuronale Netze)
- Implementierung in Python
- Optimierung mit Casadi



## Transfer

### Datengetriebene Modellbildung des qualitätsbildenden Prozesses

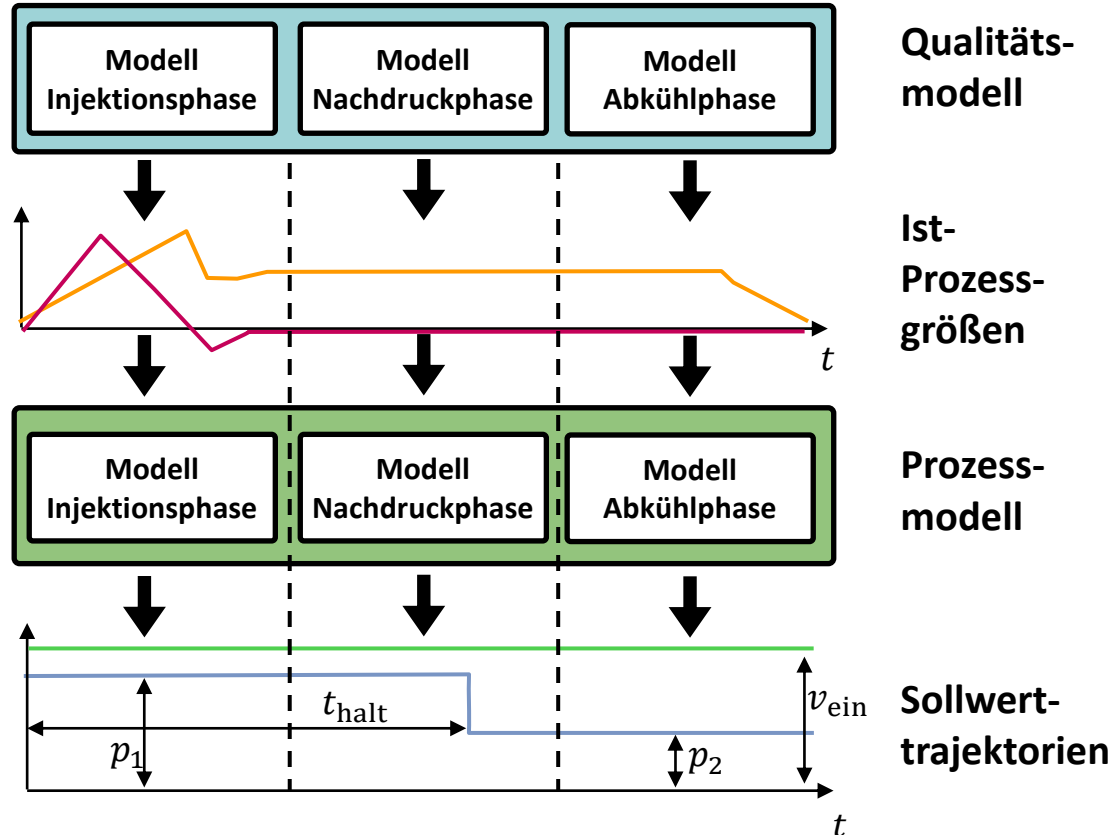
- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Einführung in rekurrente Modellstrukturen
- Anwendung und Funktionsweise der entwickelten Methoden zur Bildung des Qualitätsmodells
- Lösung kleiner Fallstudien

### Datengetriebene Modellbildung des Spritzgießprozesses

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Online Modelladaption
- Anwendung der entwickelten Methoden auf Messdaten der Demonstratoranlage



## Entwicklung



- Methoden zur modellbasierten Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses
- Modelle werden verwendet, um die Sollwert-Trajektorien zur Erreichung der geforderten Qualitätsgrößen zu berechnen

## Transfer

### Grundlagen der numerischen Optimalsteuerung

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Grundlagen der numerischen Optimalsteuerung
- Optimalsteuerung mit Casadi
- Lösung kleiner Fallstudien

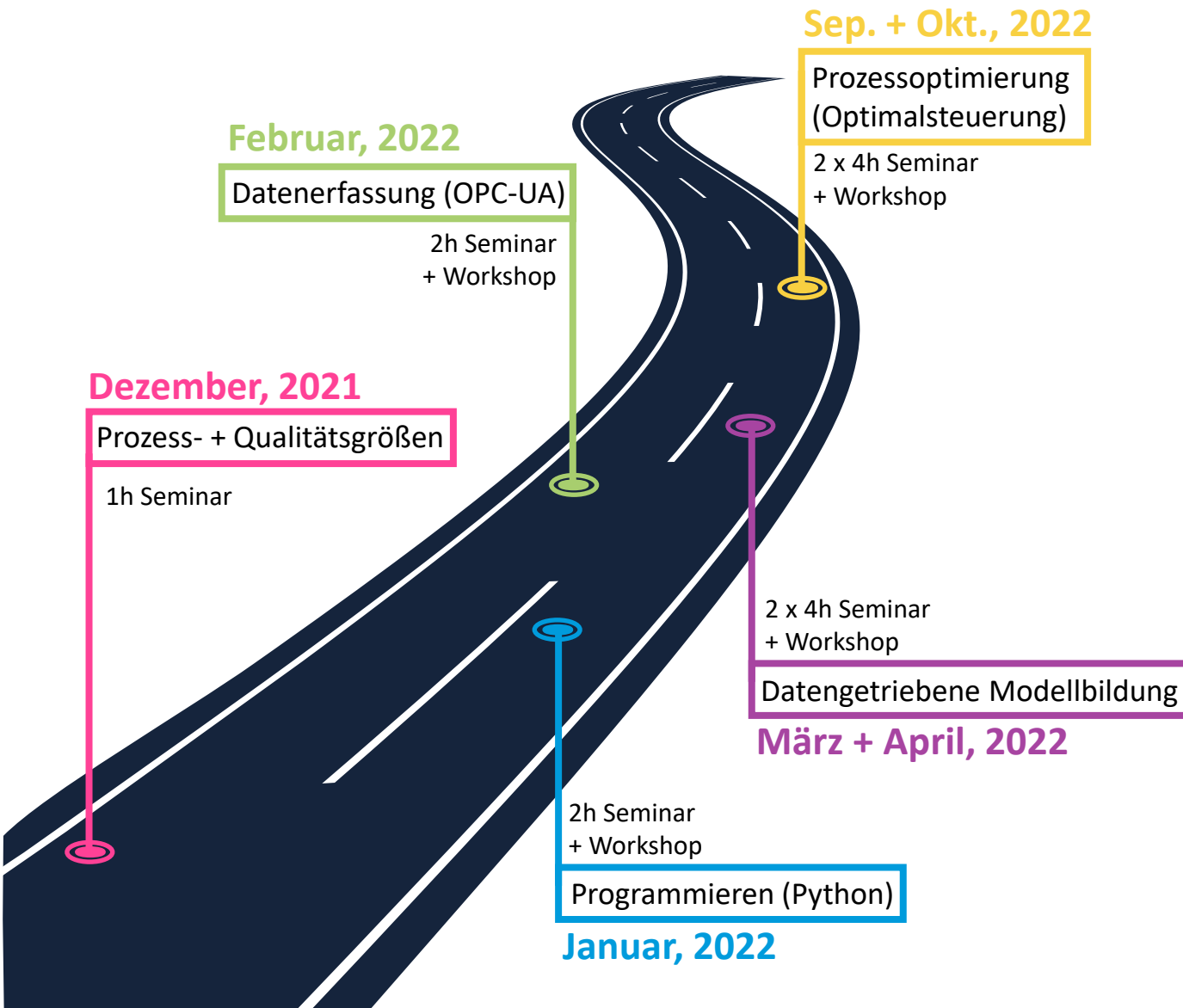
### Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses

- Seminar & Hands-on Workshop (jeweils 1 h)
- Funktionsweise der entwickelten Methoden und Anwendung auf Messdaten der Demonstratoranlage



- Begrüßung
- Digitalisierung in der Kunststofftechnik
- Vorstellung des Projekts DIM
- Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- **Überblick Workshopreihe**





- **Erfassung von Prozess- und Qualitätsgrößen**
  - Prozessgrößen- und Sensorauswahl
  - Auslesen von Daten aus der Maschinensteuerung
  - Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen
  - Aufbau einer Qualitätsmesszelle
- **Programmieren mit Python**
  - Grundlegende und fortgeschrittene Aspekte der objektorientierten Programmierung mit Python
- **Datenerfassung mit OPC-UA**
  - Überblick über die Funktionsweise des Python-Skripts zur Datenaufzeichnung
  - Anpassung/Erweiterung zur Erfassung gewünschter Prozessparameter
- **Datengetriebene Modellbildung**
  - Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung und nichtlinearen Optimierung
  - Modellbildung des Spritzgießprozesses
- **Prozessoptimierung mittels numerischer Optimalsteuerung**
  - Grundlagen der numerischen Optimalsteuerung
  - Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses



## Termine der nächsten Workshops

- 14.12.2021 um 15-16 Uhr: Erfassung von Prozess- und Qualitätsgrößen
- 11.01.2022 um 15-17 Uhr: Programmieren mit Python
- 25.01.2022 um 15-17 Uhr: Datenerfassung und -export mit OPC-UA & Python

## Organisatorisches

- Die Anmeldung erfolgt über die Projektwebseite
- Die Teilnahme an allen Workshops ist kostenlos
- Teilnahmebescheinigungen werden jeweils für die drei Blöcke
  - Erfassung von Prozess- und Qualitätsgrößen, Programmieren mit Python, Datenerfassung und -export mit OPC-UA
  - Datengetriebene Modellbildung Teil 1 & 2
  - Prozessoptimierung Teil 1 & 2

ausgestellt



- [1] <https://hmq-laserscanning.ch/referenzen/644/spritzgiessmaschine.html>
- [2] <https://y6b8k9e7.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2018/09/The-four-industrial-revolutions.jpg>
- [3] Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf, Fraunhofer-Gesellschaft, BMBF-Bericht, Förderkennzeichen: 01IS17019
- [4] <https://muenchen.digital/blog/digitaler-zwilling-in-muenchen-ein-leuchtturmprojekt-auf-dem-weg-zur-digitalen-metropole/>
- [5] Arburg GmbH & Co. KG
- [6] Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH
- [7] Schmitt et al. „Digitaler Zwilling in der Kunststofftechnik“. In: Industrie 4.0 Management 37 (2021) 2, p. 17-20
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Notebook>
- [9] <https://opcfoundation.org/>
- [10] [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/bilder/presse\\_300dpi/arburg\\_091335\\_allrounder\\_370h.jpg](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/bilder/presse_300dpi/arburg_091335_allrounder_370h.jpg)
- [11] [https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)
- [12] [https://de.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](https://de.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus)
- [13] <https://www.omega.de/pptst/OS-MINIUSB.html>