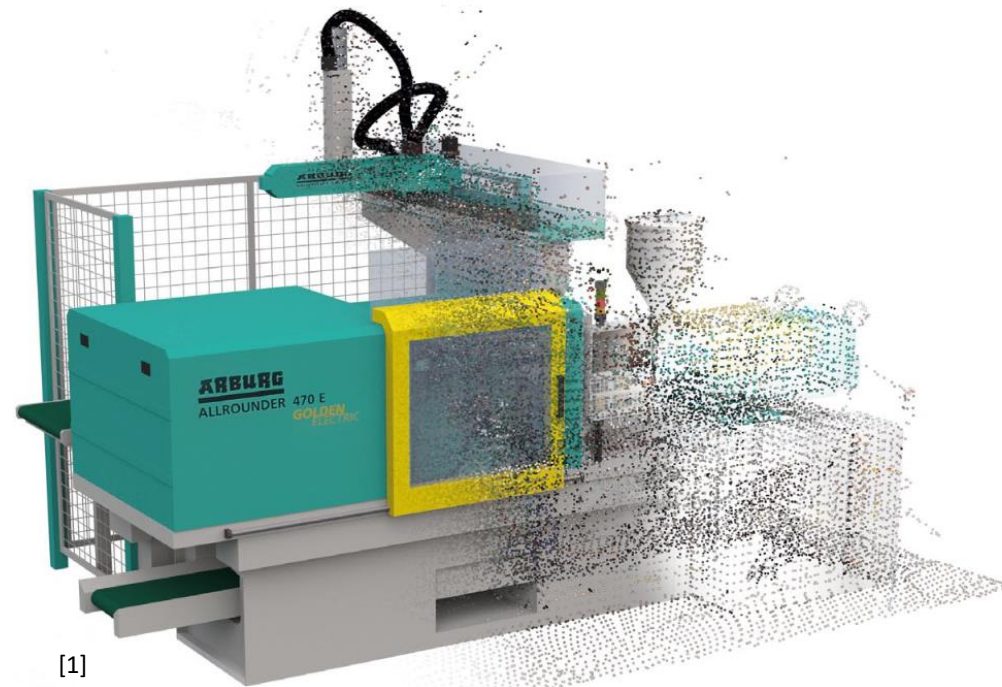


Lenkungskreistreffen 4

Digital Twin of Injection Molding (DIM)

28.03.2022



■ Entwicklung- und Implementierung ■ Transfer ■ Meilenstein

	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																											

02.11.2021

- AP0: Projektlenkungskreis
- AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle
- AP2: Datenaufzeichnung
- AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling
- AP4: Prozessoptimierung
- AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

- MS1: Demonstratoranlage aufgebaut
- MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

Rückblick auf letztes Projekttreffen:

- Vorstellung der Demonstratoranlage
- Versuchsplanung
- Vorstellung Datenauslesung
- Dynamisches Modellbildungskonzept
- Workshopreihe

■ Entwicklung- und Implementierung ■ Transfer ■ Meilenstein

	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																											

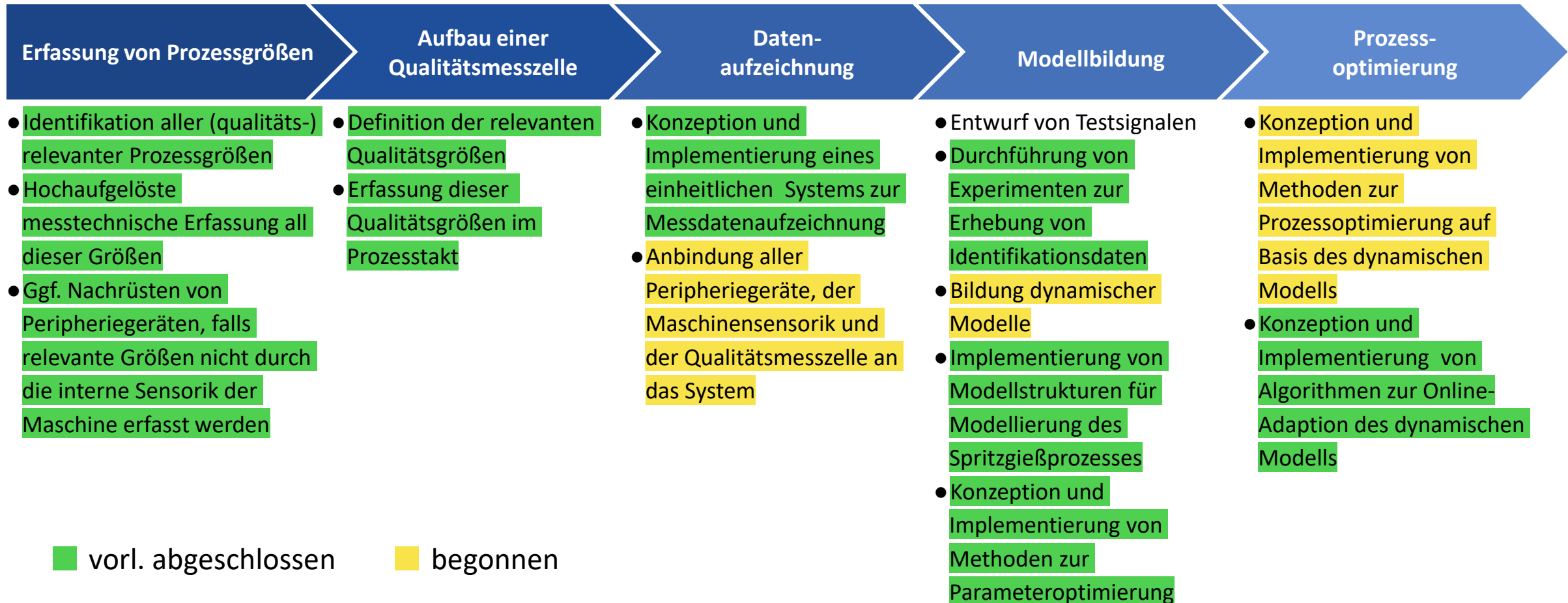
28.03.2022

- AP0: Projektlenkungskreis
- AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle
- AP2: Datenaufzeichnung
- AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling
- AP4: Prozessoptimierung
- AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

- MS1: Demonstratoranlage aufgebaut
- MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

Agenda:

- Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung
- Ausblick Entwicklungstätigkeiten
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- Rückkopplung Transfermaßnahmen
 - Datenaufzeichnung
 - Programmieren mit Python
 - Modellbildung
- Ausblick Transfermaßnahmen



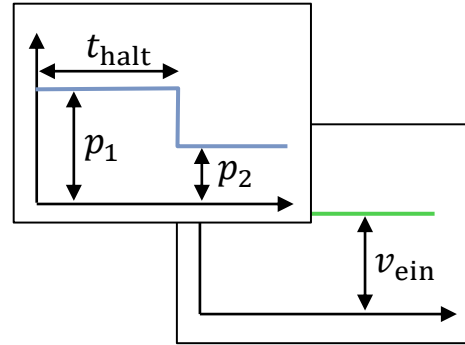
- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung**
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
 - Geplante Fallstudien
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
 - Datenaufzeichnung
 - Programmieren mit Python
 - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
- **Ausblick**

Prozessparameter

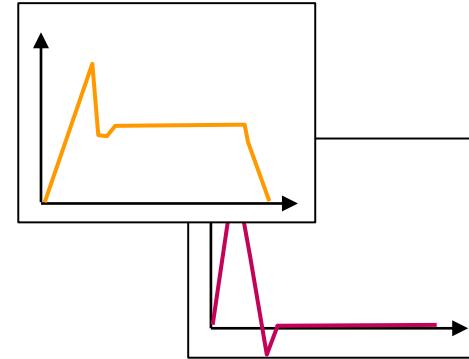
$$\begin{bmatrix} v_{\text{ein}} \\ p_1 \\ t_{\text{halt}} \\ p_2 \end{bmatrix}$$



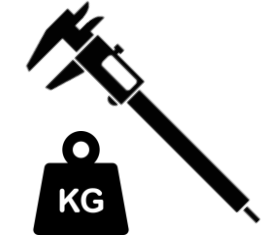
Sollwerttrajektorien



Prozessgrößenverläufe p_k



Qualitätsgrößen Q



- Werden an der Maschine eingestellt
- Bestimmen Sollwerttrajektorien eindeutig

- Sollwerttrajektorien der maschineninternen Regler
- Dynamische Eingangsgrößen des Spritzgießprozesses

- Aus Sollwerttrajektorien resultierende Ist- Prozessgrößen
- Annahme: Verlauf der Prozessgrößen bestimmt die Bauteilqualität

- Resultat der auf das Bauteil wirkenden Prozessgrößen
- Wert erst am Ende des Prozesses bekannt.



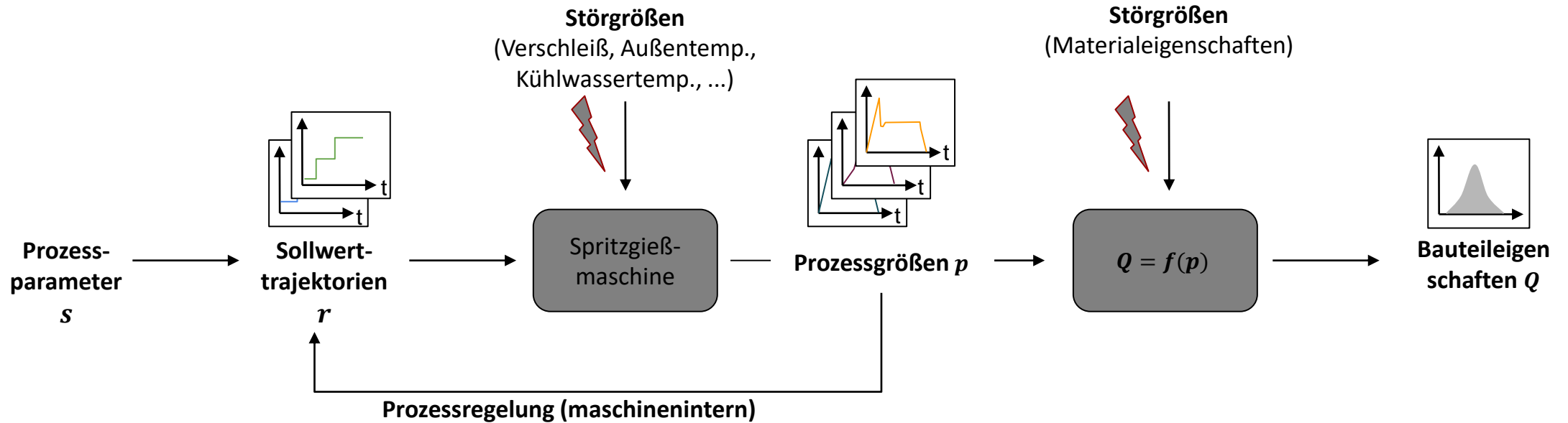
bekannte statische
Abbildung



dynamisches Modell für
Spritzgießprozess



dynamisches Modell für
Qualitätsprozess



Stand der Technik

- Setpoint Modell: Direkte Abbildung von Prozessparametern s auf Qualitätsmerkmale Q
- Feature Modell: Extraktion von Features aus Prozessgrößen p basierend auf Expertenwissen und deren Abbildung auf Qualitätsmerkmale Q

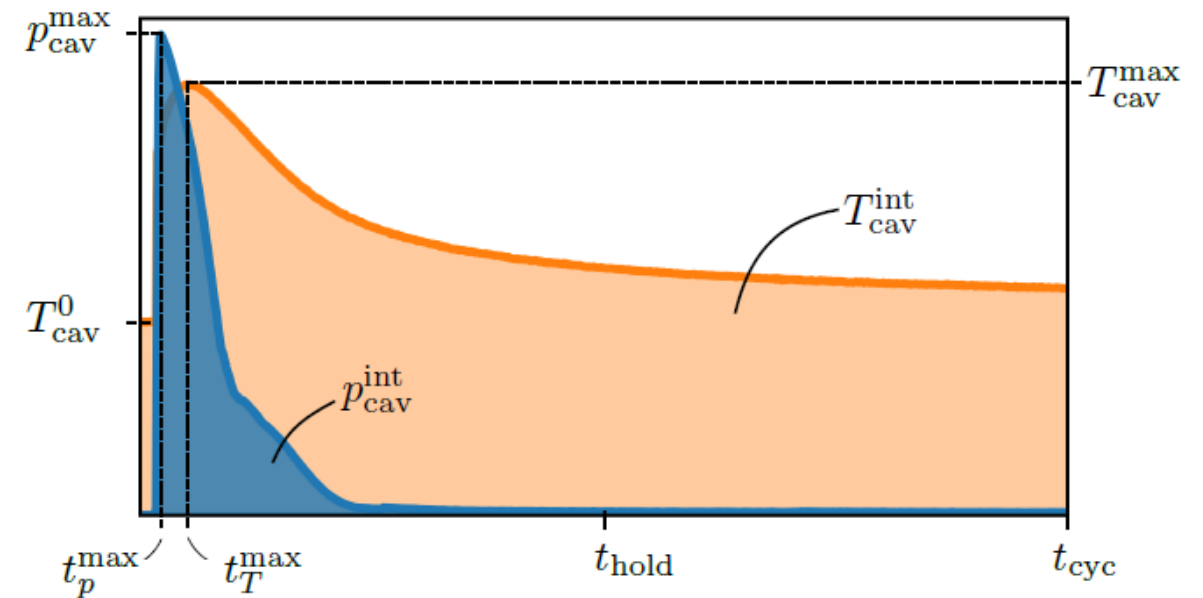
Eigener Ansatz

- Internes Dynamikmodell: Abbildung der Prozessgrößen p auf Qualitätsmerkmale Q

- Aus Werkzeuginnendruck und Werkzeugtemperatur (Prozessgrößen p) werden auf Expertenwissen basierende Features extrahiert.
- Die Features f werden mittels eines statischen Modells (Polynom, Neuronales Netz) auf die Bauteilqualität Q abgebildet

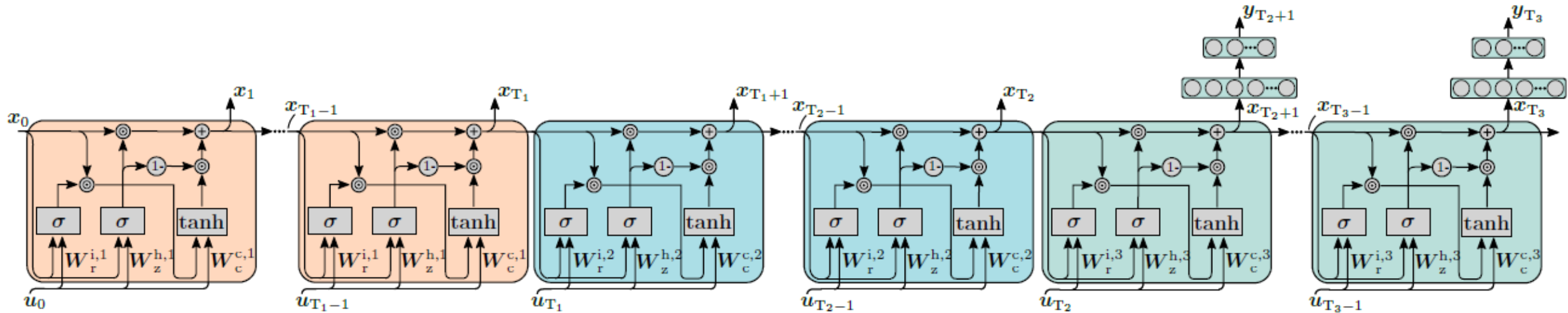
Definition extrahierter Features

Feature	Definition	Feature	Definition
p_{cav}^{max}	$\max(p_{cav})$	T_{cav}^{int}	$\sum_{k=0}^{t_{cyc}} p_{cav}$
t_p^{max}	$\arg \max_k(p_{cav})$	t_T^{max}	$\arg \max_k(T_{cav})$
p_{cav}^{int}	$\sum_{k=0}^{t_{cyc}} p_{cav}$	T_{cav}^{max}	$\max(T_{cav})$
p_{cav}^{drop}	$\frac{1}{t_{cyc} - t_{hold}} \sum_{k=t_{hold}}^{t_{cyc}} p_{cav}$		



Visualisierung extrahierter Features

- Keine Extraktion von Features, die Werkzeuginnendruck und Werkzeugtemperatur (Prozessgrößen p) werden direkt als Zeitreihe auf die Bauteilqualität Q abgebildet
- Für jede Phase (Einspritz-, Nachdruck-, Abkühlphase) wird ein dediziertes Modell gebildet

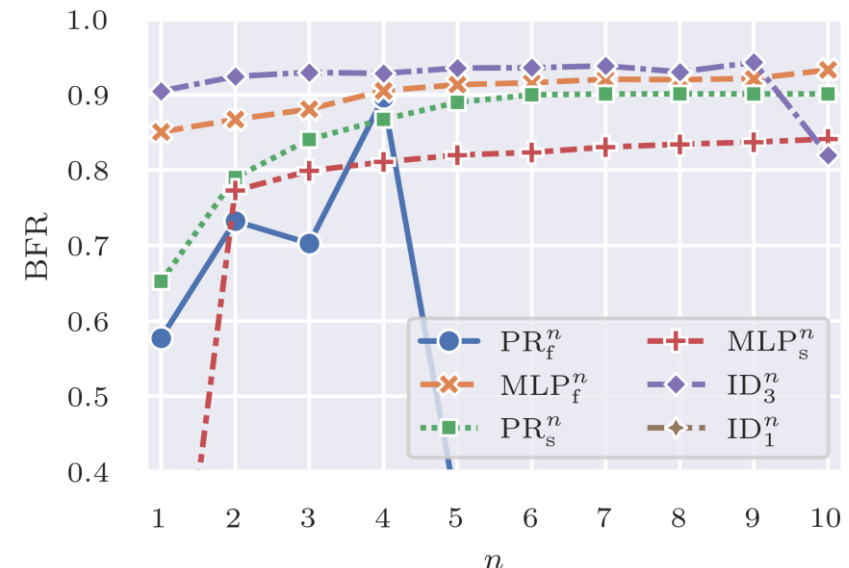


- Die Modelle sind am den Umschaltpunkten durch Gleichheit des internen Zustandes x miteinander gekoppelt

- Keine Extraktion von Features, die Werkzeuginnendruck und Werkzeugtemperatur (Prozessgrößen p) werden direkt als Zeitreihe auf die Bauteilqualität Q abgebildet
- Für jede Phase (Einspritz-, Nachdruck-, Abkühlphase) wird ein dediziertes Modell gebildet

Modellstrukturen

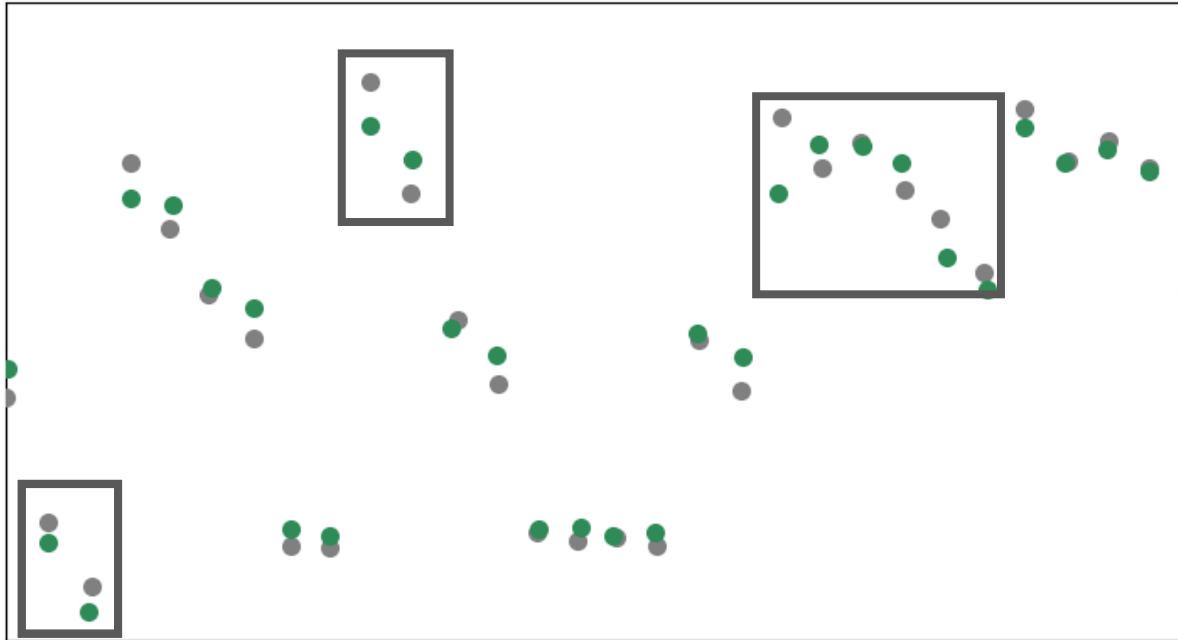
Label	Definition
$PR_{s,f}^n$	n -th degree polynomial regression model mapping either process setpoints s or process measurement features f to product quality D_i .
$MLP_{s,f}^n$	MLP with n neurons in single hidden layer mapping either process setpoints s or process measurement features f to product quality D_i .
ID_i^n	Internal dynamics model consisting of i subsystems mapping process measurements p to product quality D_i . The recurrent model part is realized via GRUs with n internal states. The mapping from internal state to product quality D_i is realized via an MLP with 10 tanh neurons in the hidden layer.



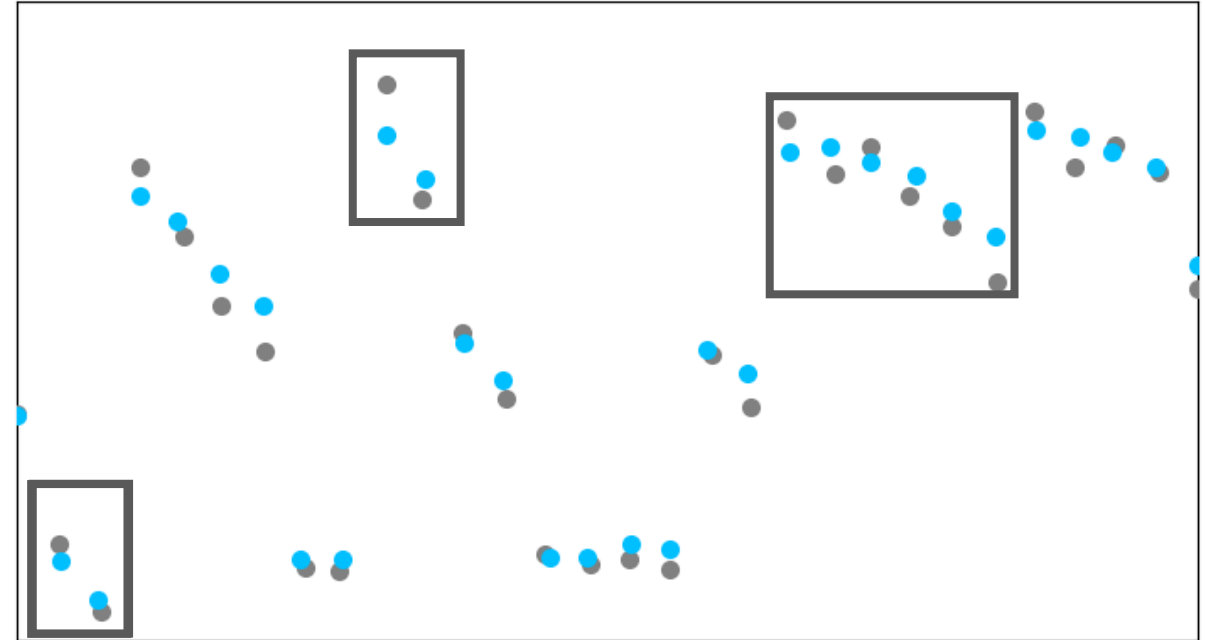
Modellgüte (BFR) in Abhängigkeit der Modellkomplexität n

- Interner Dynamikansatz besser (geringfügig) als übliche Modellansätze
- Einfachster Modellansatz PR_s^n erklärt bereits 90 % der Varianz in der Ausgangsgröße
 - Abwesenheit von Störgößen lässt direkte Abbildung von s auf Q zu
 - Bauteil oder Bauteileigenschaft unempfindlich gegenüber Prozessgrößenverlauf

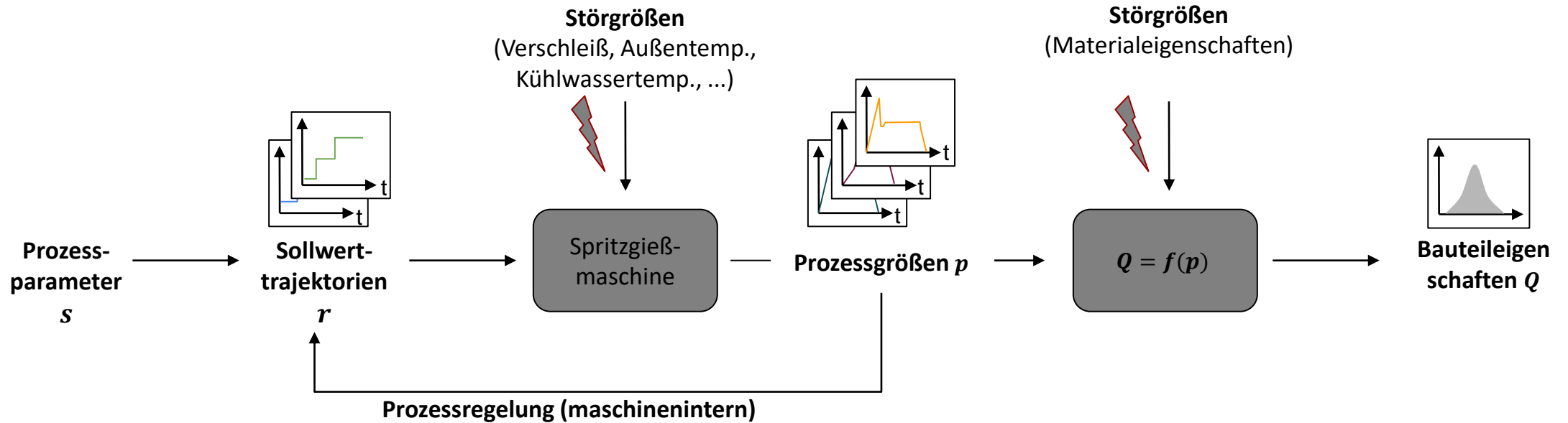
Feature Modell



Internes Dynamikmodell
Setpoint Modell



- Übersicht Projektstand DIM
- Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
 - Geplante Fallstudien
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
 - Datenaufzeichnung
 - Programmieren mit Python
 - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
- **Abschlussdiskussion**



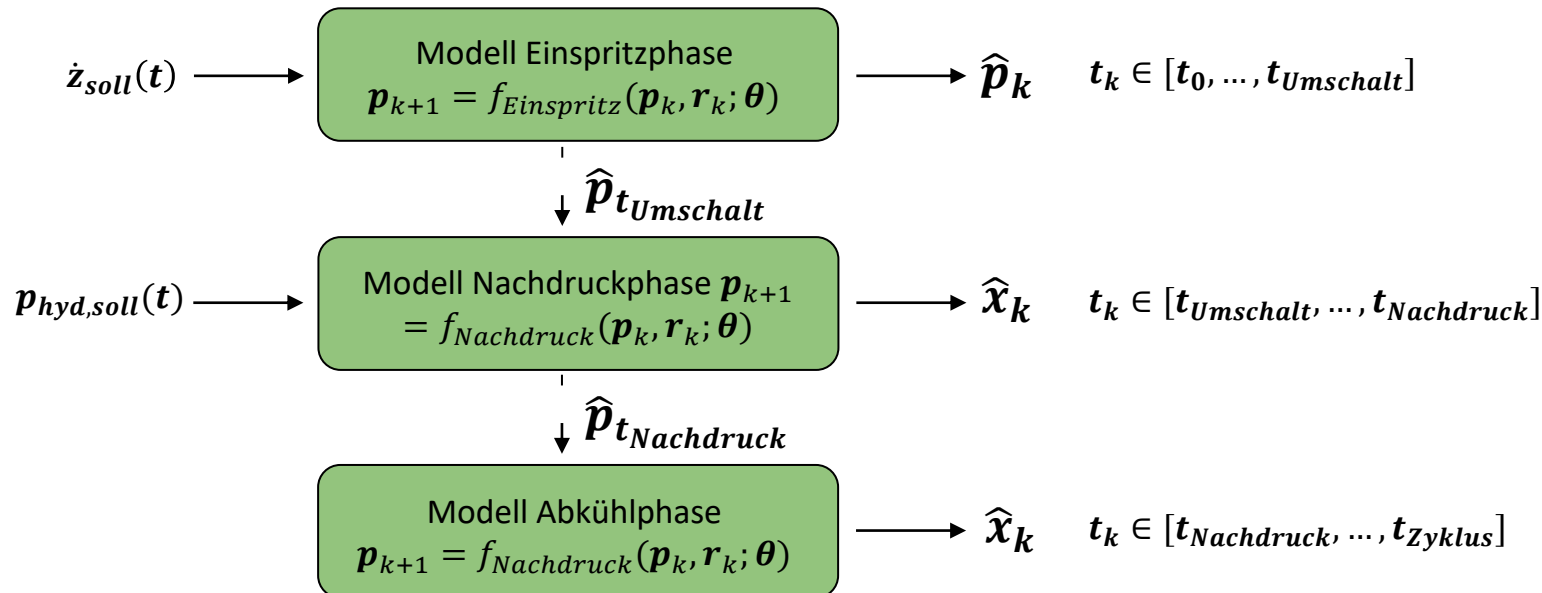
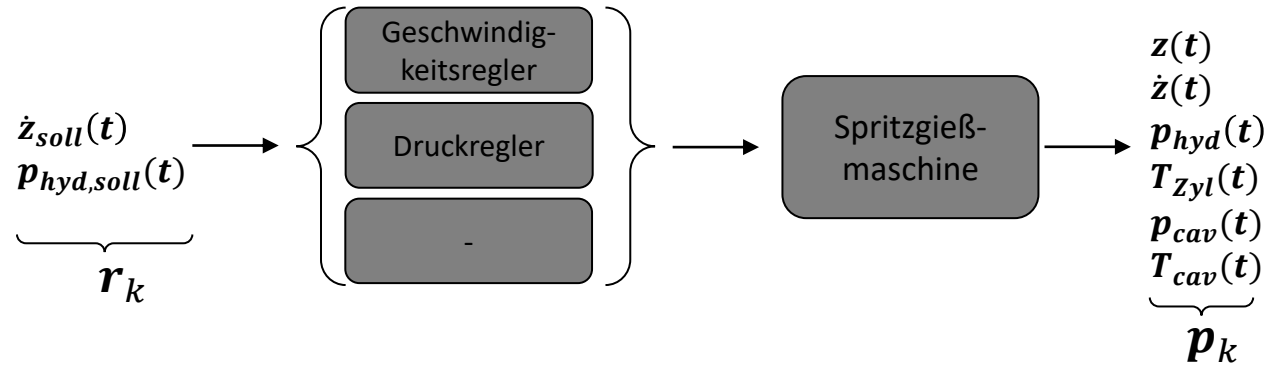
1. Durchführung von Versuchen mit externen Störgrößen, die auf den Prozess wirken

- Setpoint Modelle werden dann nicht mehr in der Lage sein Q aus s zu prädictieren
- Feature und interne Dynamik Modelle (prädictieren Q aus p) sollten im Idealfall Bauteilqualität korrekt prädictieren.
- Aber: Bei Extraktion von Features f aus p findet ein Informationsverlust statt, das ist bei internen Dynamikmodellen nicht der Fall.

2. Prädiktion anderer Qualitätsmerkmale

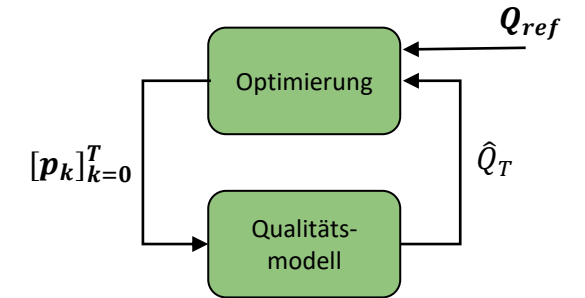
- In bisherigen Versuchen wurden geometrische Merkmale und das Gewicht prädictiert
- Diese Größen sind unter Umständen relativ unempfindlich gegenüber dem Prozessgrößenverlauf
- In folgenden Versuchen wird die Bruchfestigkeit als Qualitätsmerkmal erhoben **Marco fragen ob das plausibel eher von Verlauf abhängt

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



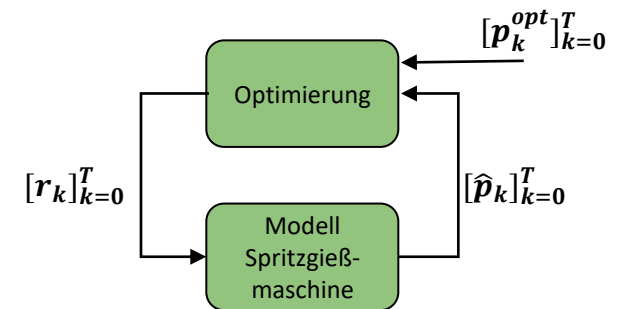
- Jede Phase wird durch ein dediziertes Modell beschrieben
- Die Phasenmodelle sind im Umschaltzeitpunkt durch Kontinuität der Zustände gekoppelt
- Als Modellansätze werden lineare und nichtlineare Modelle (physikalisch motiviert und Black-Box) gewählt

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



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

$$\arg \min_p \|Q_{ref} - \hat{Q}_T(\mathbf{p})\| \rightarrow [\mathbf{p}_k^{opt}]_{k=0}^T$$

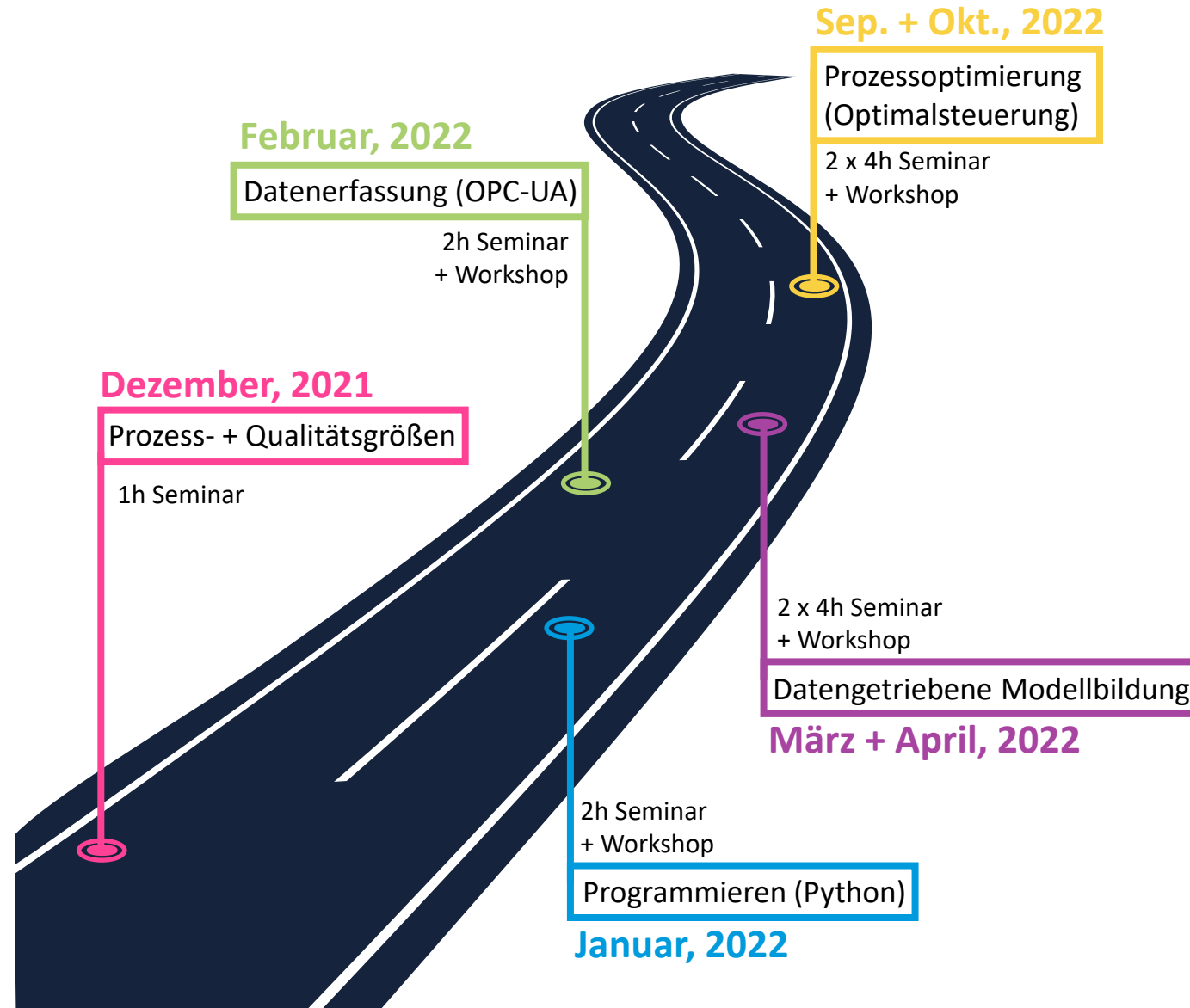


2. Es werden die einzustellenden Führungsgrößen \mathbf{r}_{opt} ermittelt, um den optimalen Prozessgrößenverlauf \mathbf{p}_{opt} zu erhalten

$$\arg \min_r \|[\mathbf{p}_k^{opt}]_{k=0}^T - [\hat{\mathbf{p}}_k(r)]_{k=0}^T\| \rightarrow [\mathbf{r}_k^{opt}]_{k=0}^T$$

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

- Übersicht Projektstand DIM
- Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
 - Geplante Fallstudien
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
 - Datenaufzeichnung
 - Programmieren mit Python
 - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
- **Ausblick**



Seminar zu den Inhalten:

- Vorstellung des Projektteams und der Fachgebiete
- Digitalisierung in der Kunststofftechnik
- Vorstellung des Projektes DIM
- Entwicklungs- und Transfermaßnahmen
- Überblick Workshopreihe

Teilnehmerzahlen:

- 16 (3 von Uni Kassel)

Feedback:

Seminar zu den Inhalten:

- Prozessgrößen- und Sensorauswahl
- Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen
- Aufbau einer Qualitätsmesszelle

Teilnehmerzahlen:

- 12 (4 von Uni Kassel)

Feedback:

Seminar & Workshop zu den Inhalten:

- Rückblick: Prozessgrößenauswahl
- OPC-UA
- Einstellungen an der Spritzgießmaschine
- Ermittlung der Node-IDs
- Aufbau und Funktionen des Python-Skripts
- Anpassung und Demonstration des Skripts

Teilnehmerzahlen:

- Seminar: 12 (5 von Uni Kassel)
- Workshop: 12 (5 von Uni Kassel)

Feedback:

Seminar & Workshop zu den Inhalten:

- Datentypen
- Objekte
- Funktionen
- Klassen & Methoden
- Flow Control
- Nutzung von Bibliotheken

Teilnehmerzahlen:

- Seminar: 13 (6 von Uni Kassel)
- Workshop: 13 (6 von Uni Kassel)

Feedback:

Seminar- & Workshop zu den Inhalten:

- Einführung in datengetriebene Modellbildung
- Einführung in nichtlineare Optimierung
- Einführung in CasADi

- Bildung datengetriebener Qualitätsmodelle des Spritzgießprozesses im Workshop

Teilnehmerzahlen:

- Seminar: 10 (7 von Uni Kassel)
- Workshop: 7 (7 von Uni Kassel)

Feedback:

- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung**
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
 - Geplante Fallstudien
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
- **Ausblick**



Ziel: In zwei aufeinanderfolgenden Veranstaltungen werden zunächst die Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung und nichtlinearen Optimierung erläutert und durch die Bearbeitung kleiner Fallstudien veranschaulicht. Darauf aufbauend werden die in der Toolbox implementierten Methoden zur datengetriebenen Modellbildung des Spritzgießprozesses vorgestellt und auf Messdaten der Demonstratormaschine angewendet.

Umfang: 2 Veranstaltungen mit jeweils
1,5 h Seminar
1,5 h Hands-on Workshop

Inhalt: Seminar

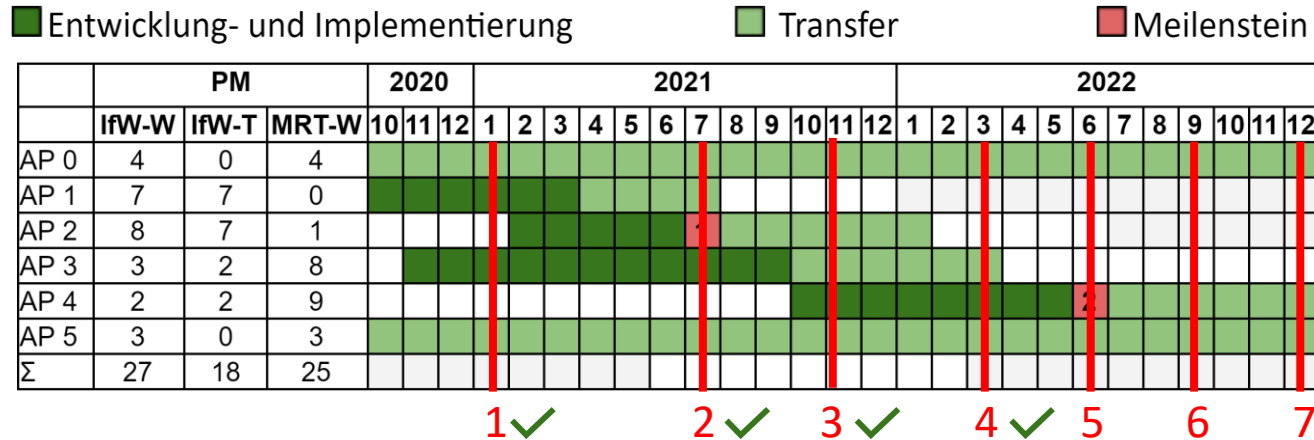
- ~~• Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung~~
- ~~• Grundlagen der nichtlinearen Optimierung~~
- Datengetriebene Modellbildung des Spritzgießprozesses
- ~~• Einführung in CasADi~~
- Vorstellung der entwickelten Methoden

Hands-on Workshop

- ~~• Parameteroptimierung mit CasADi~~
- Anwendung der entwickelten Methoden zur Modellbildung in akademischen Fallstudien.
- Anwendung der entwickelten Methoden zur Modellbildung des Spritzgießprozesses mit realen Messdaten

- Ziel:** In zwei aufeinanderfolgenden Veranstaltungen werden zunächst die Grundlagen der numerischen Optimalsteuerung erläutert und durch die Bearbeitung einer kleinen Fallstudie veranschaulicht. Darauf aufbauend werden die in der Toolbox implementierten Methoden zur Optimierung des Spritzgießprozesses vorgestellt und zur Lösung einer realitätsnahen Fallstudie angewendet.
- Umfang:** 2 Veranstaltungen mit jeweils
2 h Seminar
2 h Hands-on Workshop
- Inhalt:**
- | Seminar | Hands-on Workshop |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Einführung: Numerische Lösung von Optimalsteuerungsproblemen• Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses• Vorstellung der entwickelten Methoden | <ul style="list-style-type: none">• Optimalsteuerung mit CasADi• Anwendung der entwickelten Methoden zur Optimalsteuerung auf akademische Fallstudie.• Anwendung der entwickelten Methoden zur Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses auf realitätsnahe Fallstudie |

- Übersicht Projektstand DIM
- Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten Modellbildung
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
 - Geplante Fallstudien
 - Modellbildung
 - Prozessoptimierung
- Rückkopplung Transfermaßnahmen
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
- **Ausblick**



- AP0: Projektlenkungskreis
- AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle
- AP2: Datenaufzeichnung
- AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling
- AP4: Prozessoptimierung
- AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

- MS1: Demonstratoranlage aufgebaut
- MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

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