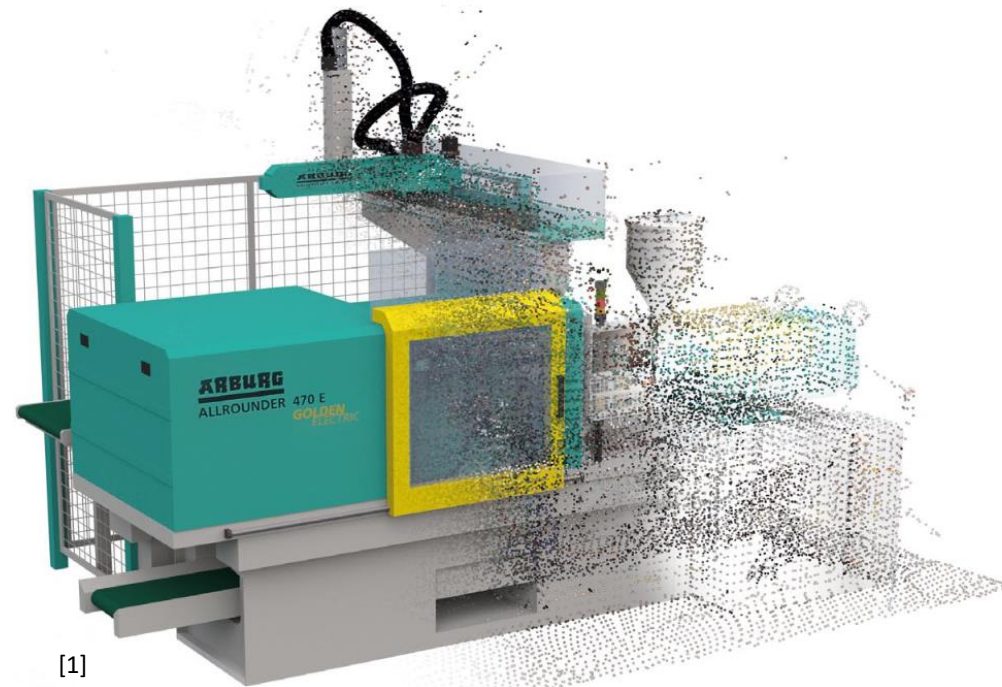


# Lenkungskreistreffen 5

## Digital Twin of Injection Molding (DIM)

21.09.2022



[1]

■ 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

## Rückblick auf letztes Projekttreffen:

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

■ 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																											

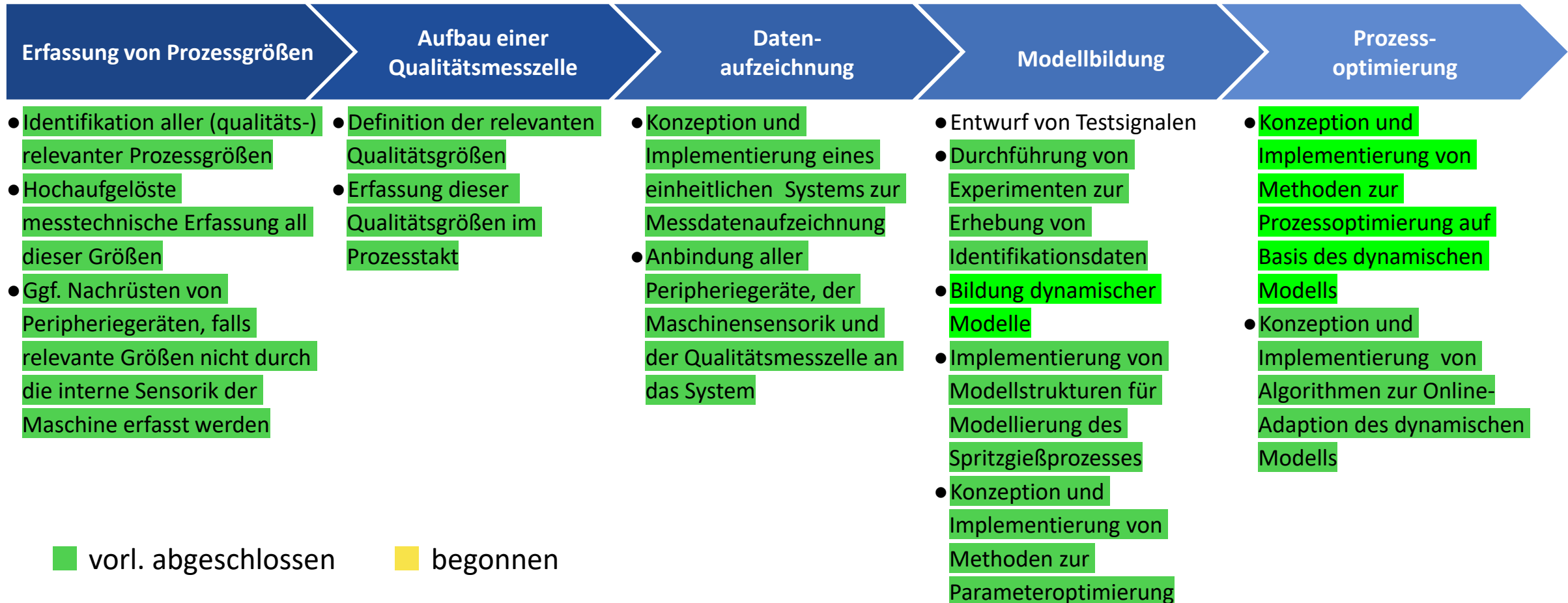
21.09.2022

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

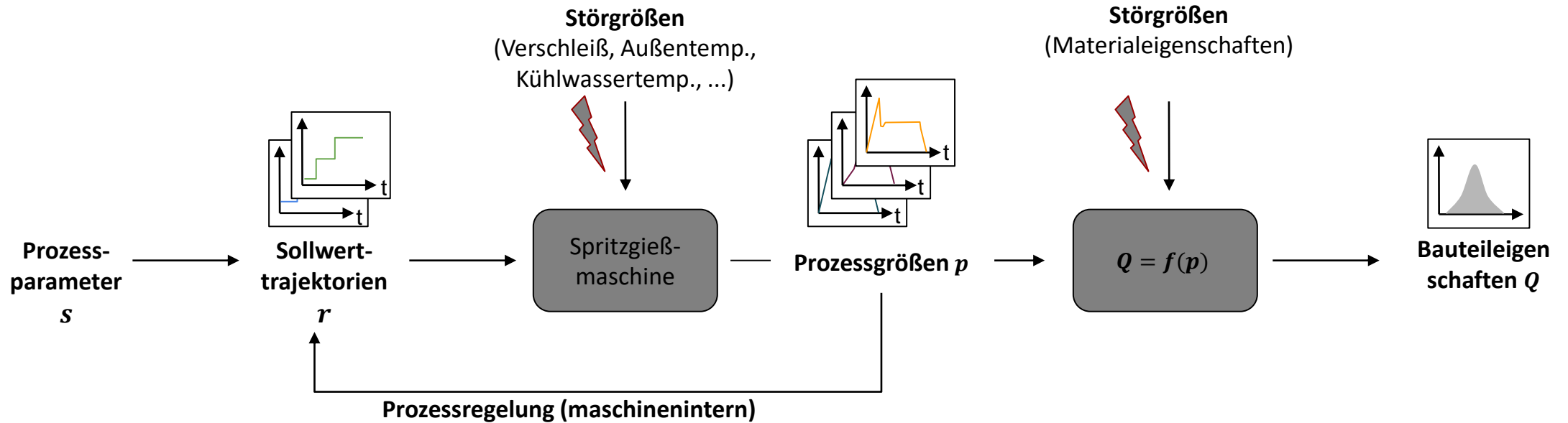
- MS1: Demonstratoranlage aufgebaut
- MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

## Agenda:

- Übersicht Projektstand DIM
- Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten
- Ausblick Entwicklungstätigkeiten
- Rückkopplung Transfermaßnahmen
- Ausblick Transfermaßnahmen
- Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit

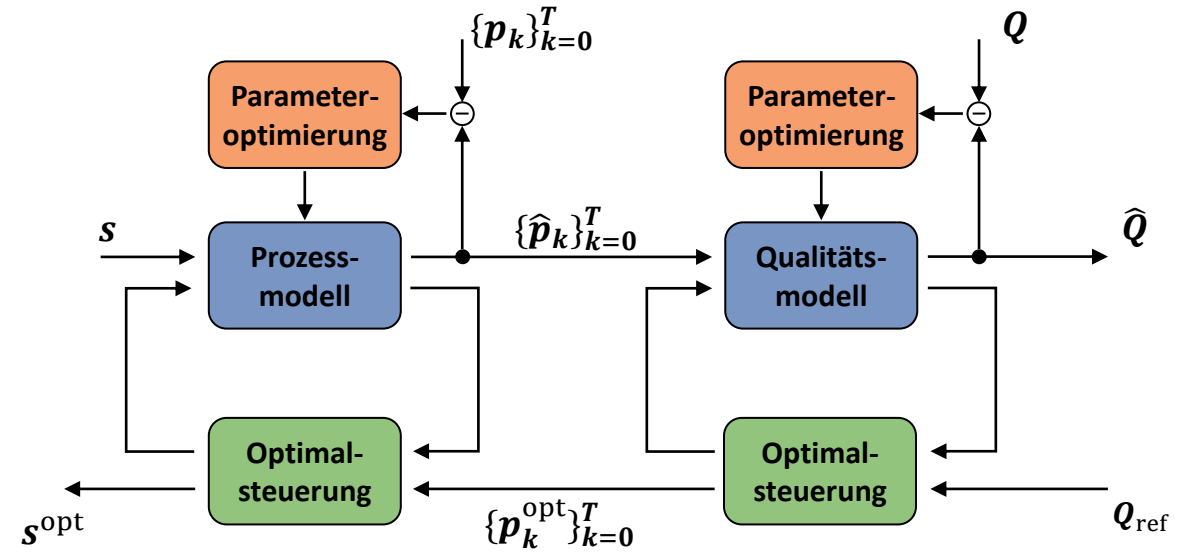


- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten**
  - Modellbildung
  - Toolbox
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
  - Statischer Digitaler Zwilling
  - Versuchsplanung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
  - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
  - Optimalsteuerung
- **Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit**
  - Abschlusstreffen

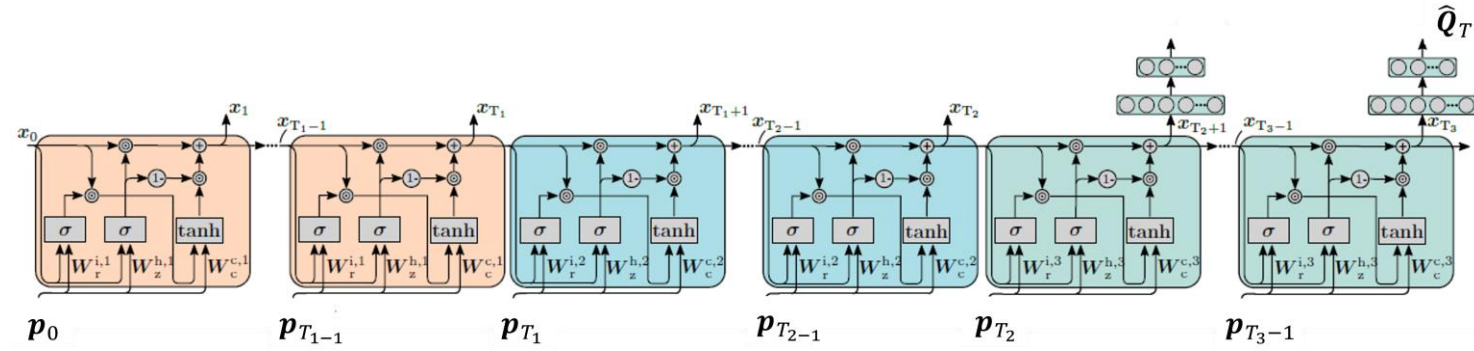


- Eingestellte Prozessparameter (Setpoints)  $s$  an der Maschine bestimmen den Verlauf der Prozessgrößen  $p$   
--> Modellierung durch Prozessmodell
- Der Verlauf der Prozessgrößen  $p$  bestimmt die resultierenden Bauteileigenschaften  $Q$   
--> Modellierung durch Qualitätsmodell
- Wirken Störgrößen auf den Prozess, sollte dies den Verlauf der Prozessgrößen  $p$  beeinflussen --> Vorteil des Qualitätsmodells gegenüber einem statischen Modell

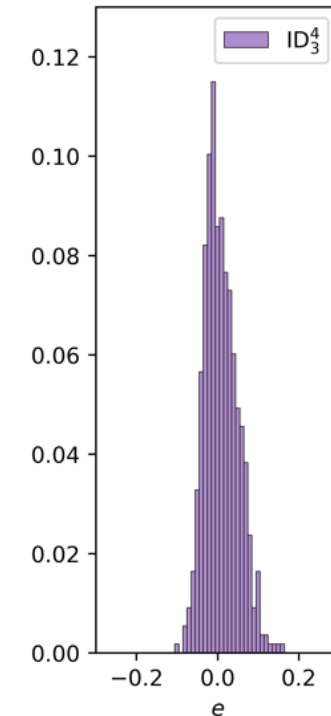
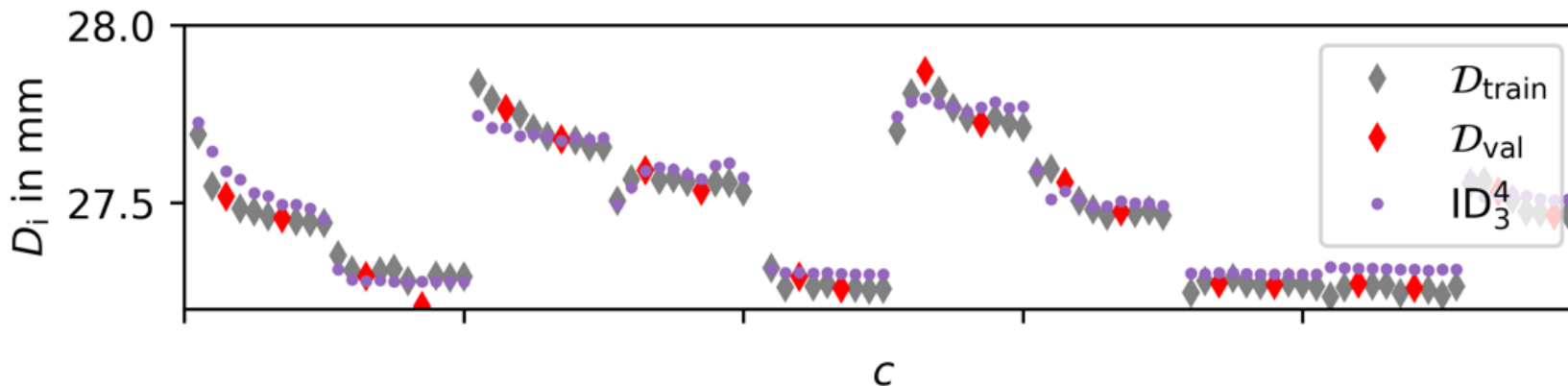
- 1. Modellbildung:** Bildung eines dynamischen Prozessmodells und eines dynamischen Qualitätsmodells
- 2. Optimalsteuerung:** Verwendung des Qualitätsmodells um die optimalen Prozessgrößenverläufe  $\{p_k^{opt}\}_{k=0}^T$  für eine geforderte Bauteilqualität  $Q_{ref}$  zu ermitteln. Verwendung des Prozessmodells um die erforderlichen Prozessparameter  $s^{opt}$  zu ermitteln, um diese Prozessgrößenverläufe zu realisieren.
- 3. Parameteroptimierung:** Um die Modelle an Verschleiß und andere schleichende Störungen anzupassen, sollen die Parameter im laufenden Betrieb nachgeschätzt werden falls erforderlich.



**Modellstruktur:** Aus drei dynamischen Teilmodellen bestehendes Modell, dass bei der Prädiktion von einem Teilmodell auf das nächste umschaltet.



**Ergebnis:** Hohe Modellgüte, mehr als 90 % der Varianz der Validierungsdaten können erklärt werden, absoluter Fehler meist deutlich unter 0,1 mm

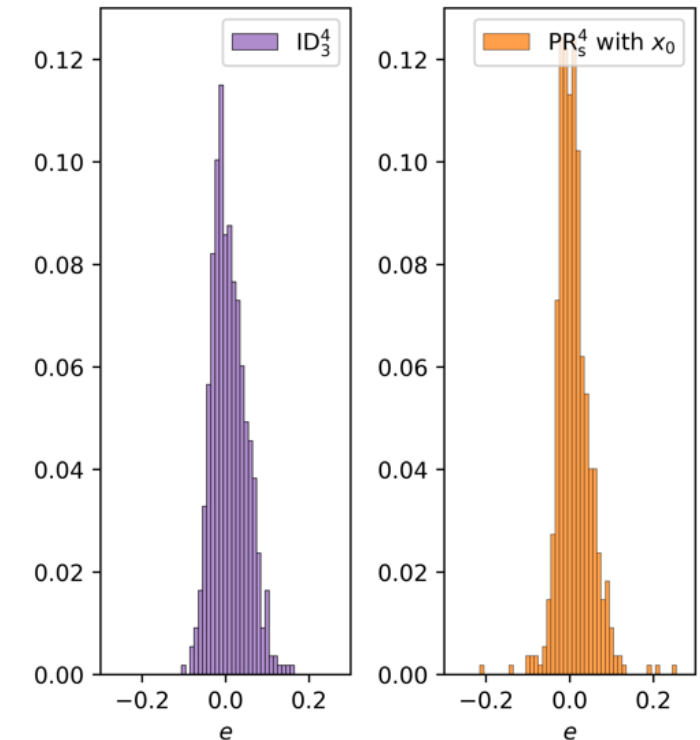
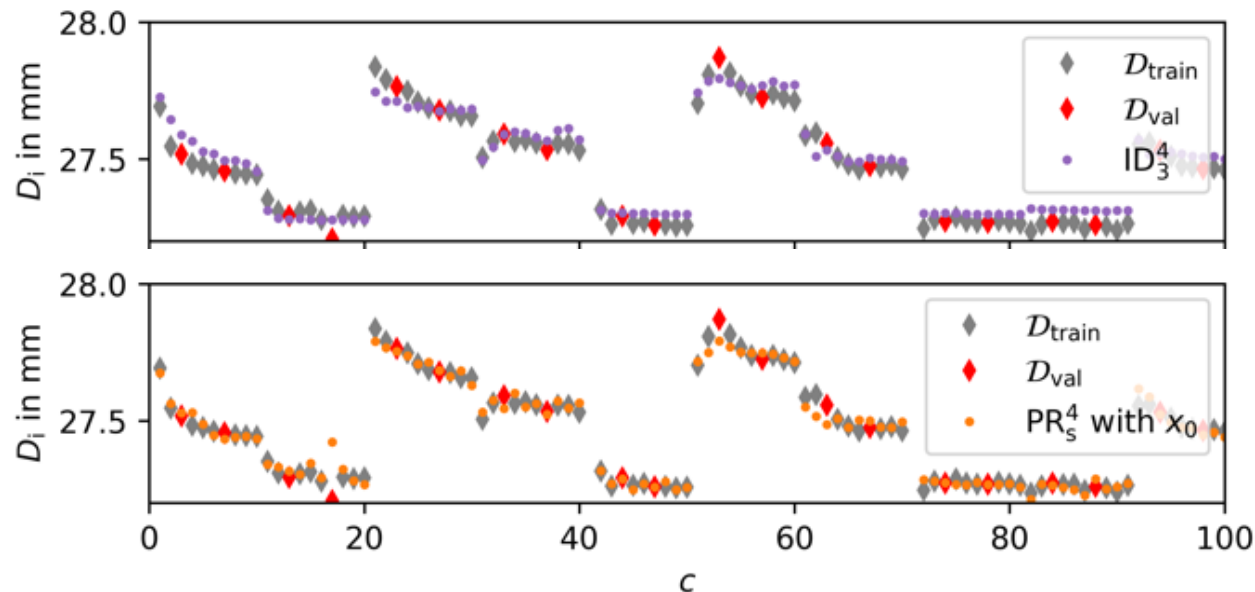




**Vergleichsmodell:** Polynom 4. Ordnung, welches als Eingangsgrößen

- Eingestellte Prozessparameter: Umschaltzeitpunkt, Soll-Einspritzgeschwindigkeit, Soll-Düsentemperatur, etc.
- Messwerte der Prozessgrößen zum Zyklusbeginn  $x_0$ : Ist-Temperatur der Kavität bei  $t = 0$ , Ist-Position der Schnecke bei  $t = 0$ , Hydraulikdruck bei  $t = 0$

erhält.



**Ergebnis:** Dynamisches Modell marginal besser, Aufwand ist aber um ein vielfaches höher.

**Analyse der Residuen:** Residuen  $e = \hat{Q} - Q$  sollten normalverteilt sein, dann werden alle deterministischen Zusammenhänge in den Daten vom Modell abgebildet

Visuelle Analyse des Prädiktionsfehlers  $e$  aufgetragen über den wahren Bauteildurchmesser  $D_i$  zeigt einen schwachen aber eindeutigen deterministischen Zusammenhang.

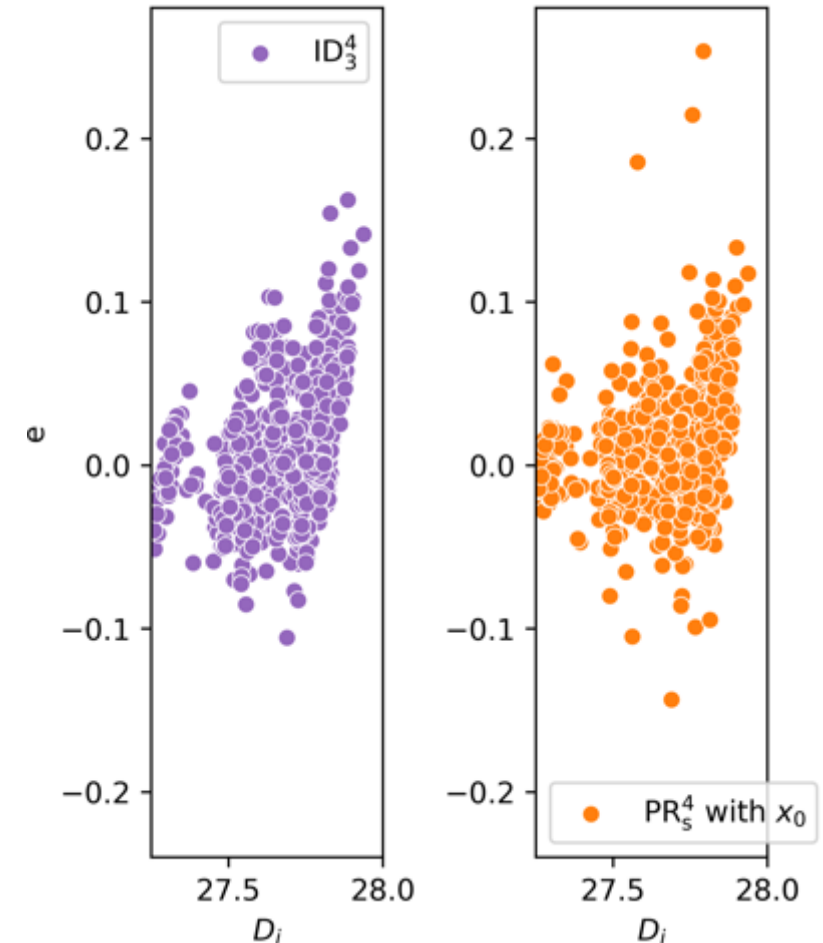
Innerhalb der drei Cluster werden kleinere Durchmesser überschätzt und größere Durchmesser unterschätzt.

Auch einen Normalverteilungstest bestehen die Residuen nicht.

--> Es existiert ein deterministischer Zusammenhang in den Daten, der nicht modelliert werden konnte. Mögliche Ursachen:

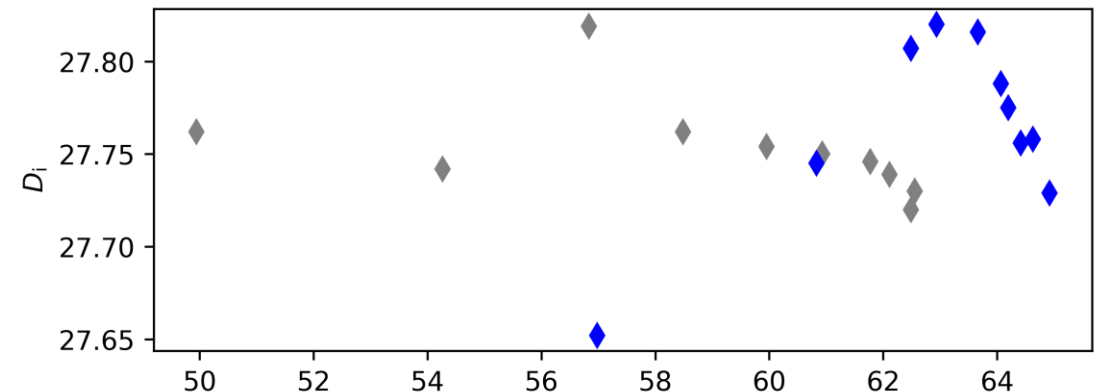
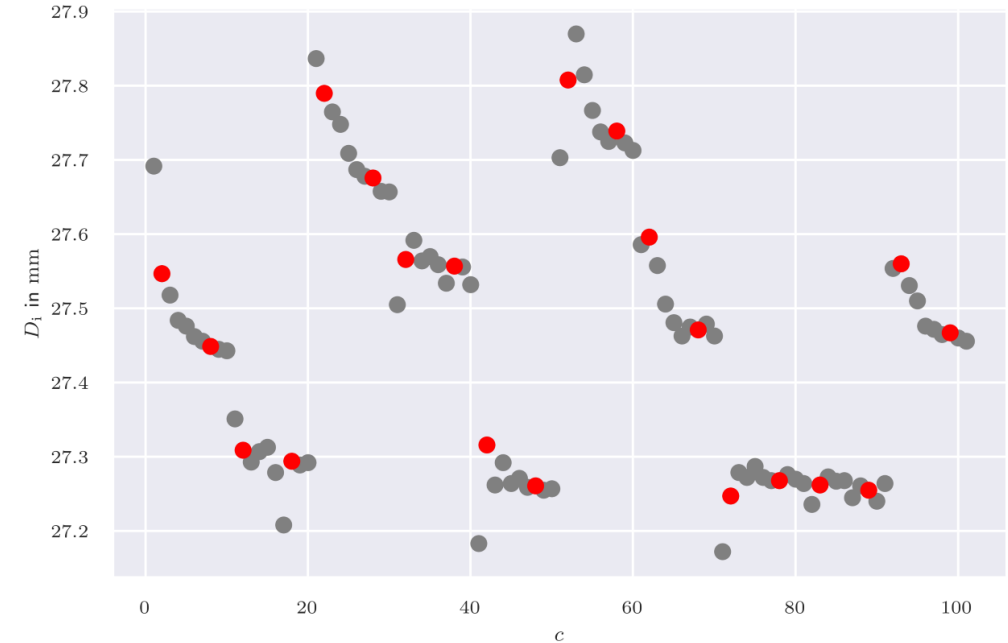
- Modell nicht ausreichend komplex/flexibel
- Fehlende Eingangsgrößen

Erinnerung: Modellgüte mit über 90 % bereits hoch.



- Bei den durchgeführten Versuchen gibt es kurze Pausen durch das Einstellen neuer Prozessparameter
- Hierdurch kühlt die Form ab und man kann transientes Verhalten beobachten
- Ein dynamisches oder statisches Modell kann dieses transiente Verhalten durchaus erklären
- Eine Analyse der Daten zeigt aber, dass sich das temperaturabhängige Verhalten nicht reproduzieren lässt
- Bei aufeinanderfolgenden Versuchsreihen á 10 Wiederholungen mit identischen Prozessparametern ändert sich dieser Temperaturgang signifikant
- Charge 131 (grau) wurde am 07.10. von 8:47 – 8:52 gefahren
- Charge 144 (blau) wurde am 07.10. von 13:04 – 13:09 gefahren

Kandidaten: Außentemperatur, Betriebszeit der Maschine



Die Toolbox stellt drei grundlegende Funktionalitäten bereit:

- Modellstrukturen
- Methoden für die Parameteroptimierung
- Methoden zur Prozessoptimierung

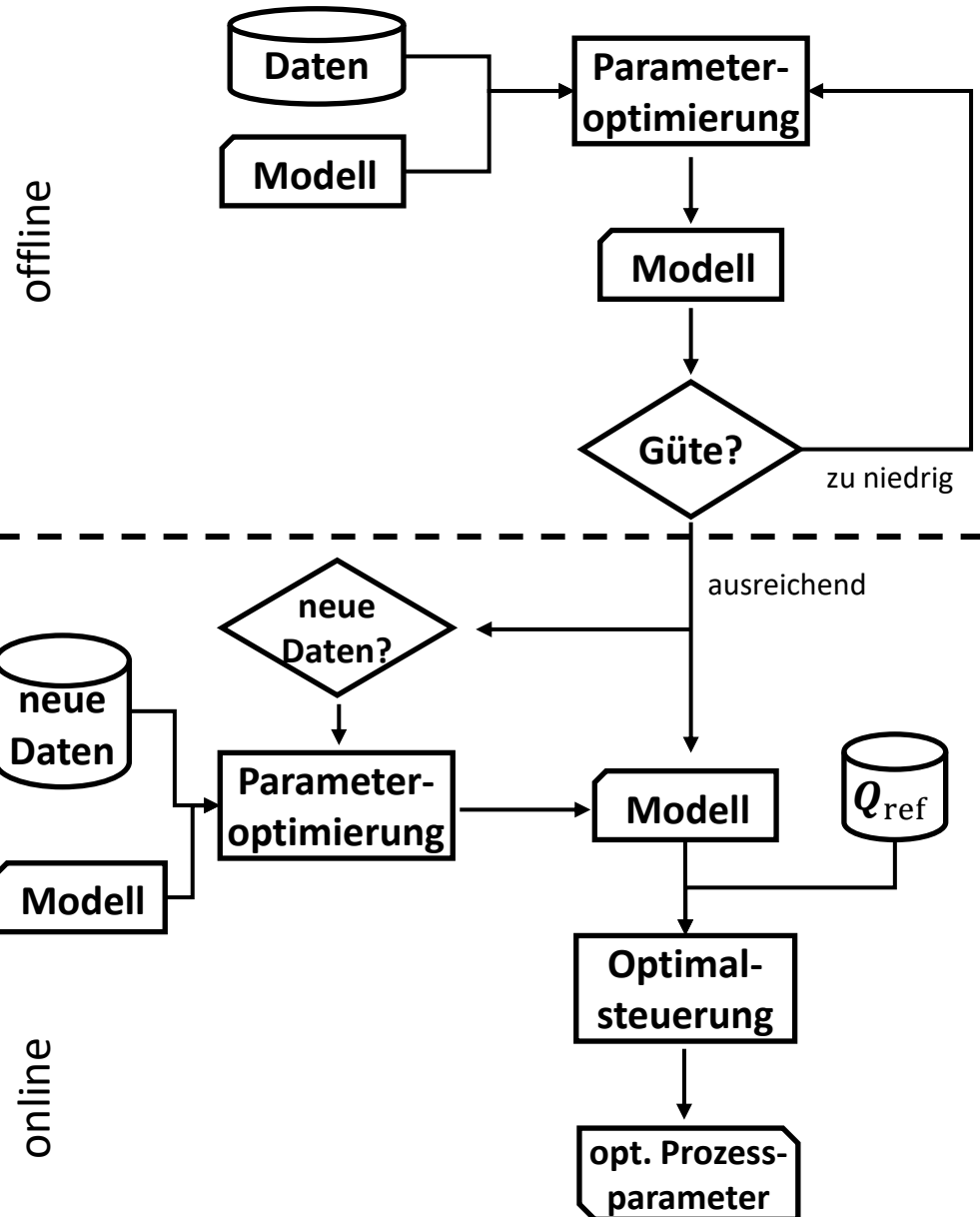
Die Toolbox stellt dementsprechend drei Klassen bereit:

Model	
-dim_u:	int
-dim_y:	int
-...	
-name:	str
+one_step_prediction()	

ParamOptimizer	
-model:	Model
-data_train:	data
-data_val:	data
-...	
+optimize()	
+...	

ControlOptimizer	
-model:	Model
-target:	array
-...	
+optimize()	
+...	

- Das Objekt der Klasse `Model` repräsentiert ein (statisches oder dynamisches) mathematisches Modell des Spritzgießprozesses
- Dieses Objekt wird an ein Objekte der Klasse für `ParamOptimizer` gegeben, um die Modellparameter an tatsächliche Messdaten anzupassen
- Um die bestmöglichen Prozessparameter zu berechnen, wird das Modell zusammen mit der Wunsch-Qualität `target` an ein Objekt der Klasse `ControlOptimizer` gegeben.



# Lade Daten

```
data_train, data_test = pickle.load(open('data.pkl', 'rb'))
```



# Initialisiere Modell

```
u_label = ['Düsentemperatur', 'Werkzeugtemperatur', 'Einspritzgeschwindigkeit', ...]
y_label = ['Durchmesser_innen']
```

```
model = Static_Multi_MLP(dim_u=8, dim_out=1, dim_hidden=dim_hidden,
                        layers=2, u_label=u_label, y_label=y_label, name='MLP',
                        init_proc='xavier')
```



# Optimierte Modell

```
p_optimizer = ParamOptimizer(model, data_train, data_val, initializations=20,
                             mode='static')
```

```
model_opt = optimizer.optimize()
```



# Ermittle optimale Prozessparameter

```
c_optimizer = ControlOptimizer(model_opt, target=27.5)
```

```
setpoints_opt = optimizer.optimize()
```



- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten**
  - Modellbildung
  - Toolbox
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
  - Statischer Digitaler Zwilling
  - Versuchsplanung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
  - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
  - Optimalsteuerung
- **Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit**
  - Abschlusstreffen

### Statisches Modell

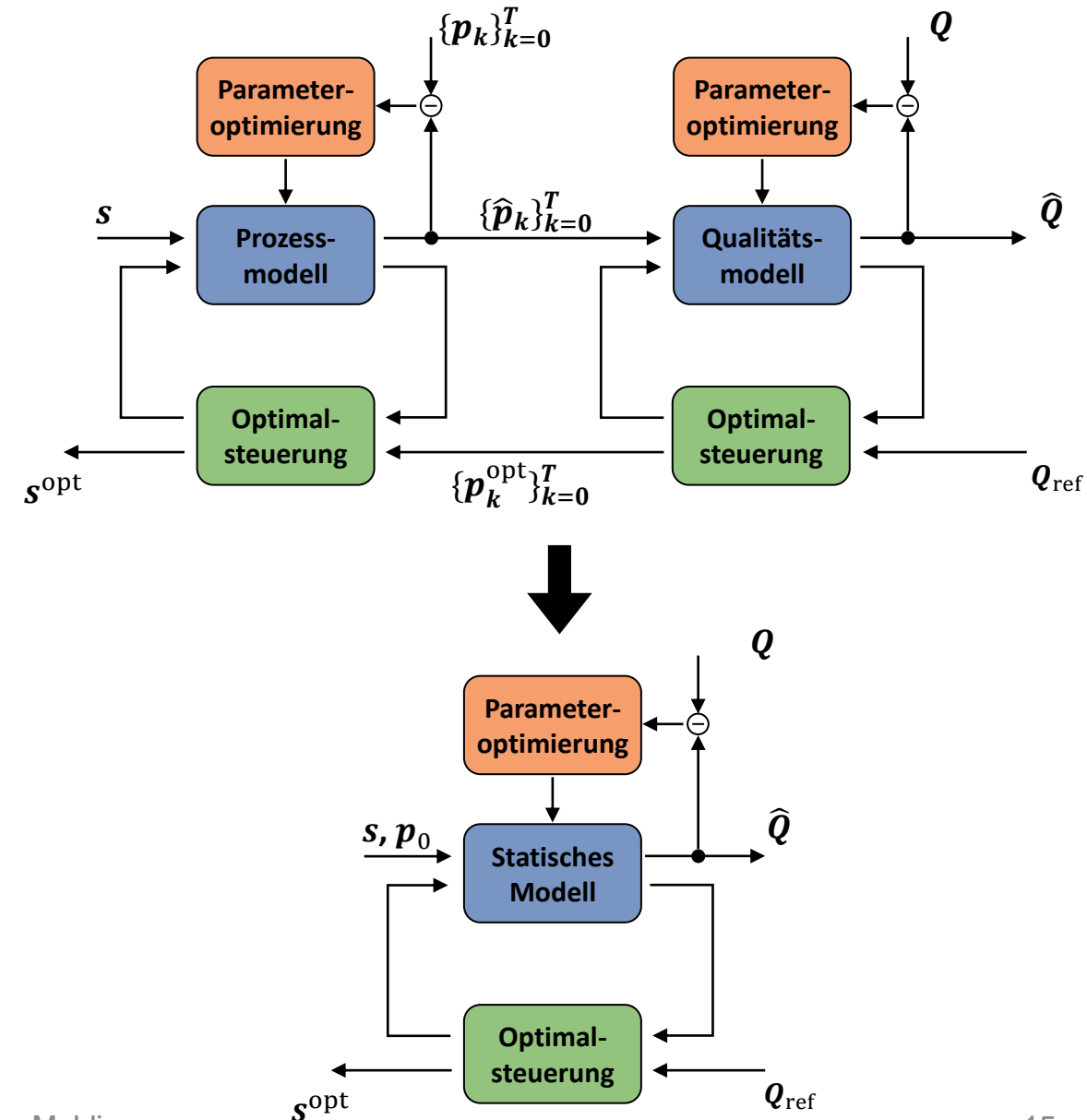
- Anstatt zweier dynamischer Modelle wird ein statisches Modell gebildet.
- Das statische Modell erhält die Prozessparameter  $s$  sowie die Prozessgrößenwerte zum Zyklusbeginn  $p_0$  (insbesondere  $T_0^{cav}$ ) als Modelleingänge und prädiziert direkt die Bauteilqualität.

### Optimalsteuerung

- Die optimalen Prozessparameter werden nur noch unter Verwendung des statischen Modells bestimmt.
- Dieses statische Optimierungsproblem ist einfacher und schneller zu lösen, als ein dynamisches.

### Parameteroptimierung

- Die Parameteroptimierung statischer Modelle stellt ein einfacheres Optimierungsproblem dar
- Werden LiP Modelle verwendet ist die Schätzung auch robuster, da globales Optimum ermittelt werden kann

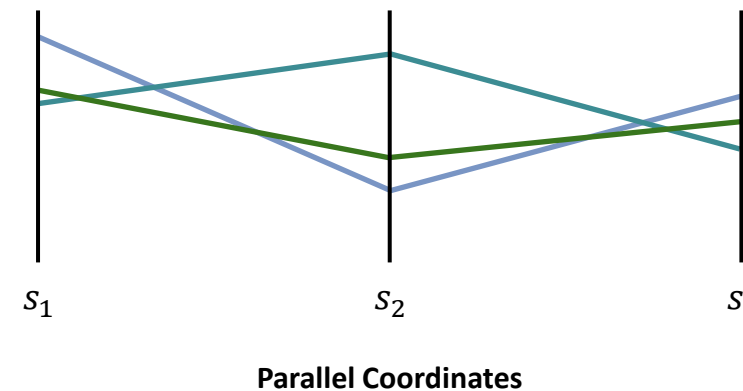
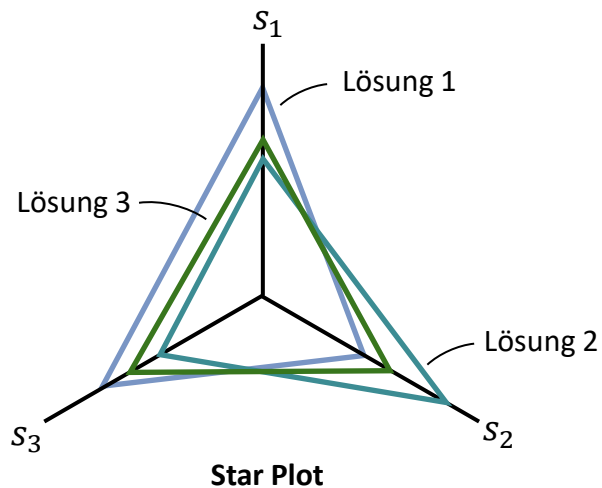


## Live-Qualitätsprädiktion

- Prädiktion der Bauteilqualität im laufenden Betrieb basierend auf den eingestellten Prozessparametern  $s$  und Prozessgrößen zum Zyklusbeginn  $p_0$  (insbesondere  $T_0^{cav}$ ) zum Zyklusbeginn durch das statische Modell.

## Qualitätsoptimierung

- Gegeben eine geforderte Bauteilqualität  $Q_{ref}$  Anfangsbedingungen  $p_0$  kann dem Anlagenfahrer eine bestimmte Einstellung an Prozessparametern  $s$  vorgeschlagen werden
- Es ist möglich, dass mehr als eine Einstellung an Prozessparametern  $s$  zur gewünschten Qualität führt. Dem Anlagenfahrer können die verschiedenen Lösungsvorschläge dann bspw. in einem Parallel Coordinates Plot oder Star Plot präsentiert werden. Basierend auf seiner Expertise sucht der Anlagenfahrer dann den geeignetsten aus





## Live-Modellupdate

- Beeinflussen schleichende Störungen den Prozess oder werden Prozessparameter eingestellt, die das Modell vorher nicht kannte, wird das Modell im laufenden Betrieb nachgelernt.
- Das Nachlernen eines statischen Modells geht schneller als das eines dynamischen Modells, und falls Polynome zur Modellbildung verwendet werden, kann sogar das globale Optimum bestimmt werden (sehr robust).

Kandidaten für mögliche bisher unberücksichtigte Einflussgrößen sind:

- Die Laufzeit der Maschine (als Repräsentant für alle "Einschwingvorgänge")
- Die Außentemperatur

Durchführung von Versuchen, in denen der Einfluss dieser Größen auf den Temperaturgang systematisch untersucht wird.

Versuchsablauf:

- Screening: Wiederholtes Aufnehmen des Temperaturganges bei konstanten Prozessparametern durch Wechsel zwischen einer definierten Anzahl an Produktionszyklen und definierten Abkühlphasen. Aufzeichnung der Außentemperatur und Betriebsdauer.
- Falls ein Einfluss quantifiziert werden kann wird ein umfassender Versuchsplan abgefahren, in dem die Betriebsdauer als Faktor variiert wird (mehrtägig).

(Alternative: Auf Beschreibung des transienten Verhaltens gänzlich verzichten und nur noch stationären Betrieb modellieren)

- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten**
  - Modellbildung
  - Toolbox
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
  - Statischer Digitaler Zwilling
  - Versuchsplanung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
  - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
  - Optimalsteuerung
- **Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit**
  - Abschlusstreffen

## Seminar- & Workshop Teil 1 (2+2 Stunden):

- Einführung in datengetriebene Modellbildung
- Einführung in nichtlineare Optimierung
- Einführung in CasADi
  
- Modellbildung an Fallstudien mit CasADi

## Seminar- & Workshop Teil 1 (1+1 Stunden):

- Vorstellung der entwickelten Methoden
- Datengetriebene Modellbildung des Spritzgießprozesses
  
- Demonstration der Anwendung der entwickelten Methoden mit Jupyter Notebooks
- Bildung datengetriebener Qualitätsmodelle des Spritzgießprozesses

## Feedback:

- Funktionalität der entwickelten Methoden demonstrieren ist wertvoller als Hands-on Workshops
- → Besser Demo als Hands-on Workshop

## Feedback:

- ...
- ...

**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  
2 h Seminar  
2 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

- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten**
  - Modellbildung
  - Toolbox
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
  - Statischer Digitaler Zwilling
  - Versuchsplanung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
  - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
  - Prozessoptimierung
- **Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit**
  - Abschlusstreffen



Technologien

Maschinenprotokolle	Messgeräte zur Qualitätsüberwachung	1 Softwaremodul zur Datenaufzeichnung	1 Softwaremodul zur datengetriebenen Modellbildung	1 Softwaremodul zur modellbasierten Prozessoptimierung
---------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	--	--

Wissen

<p><b>1 Seminar</b> zu den Themen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessgrößenauswahl</li> <li>• Sensorapplikation</li> <li>• Auslesung der Daten aus der Maschinensteuerung</li> </ul> <p><b>1 Leitfaden</b> in dem alle Entwicklungsschritte dokumentiert sind.</p>	<p><b>1 Seminar</b> zu den Themen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufbau Qualitätsmesszelle</li> <li>• Messung von Qualitätsgrößen im Prozesstakt</li> </ul> <p><b>1 Leitfaden</b> in dem alle Entwicklungsschritte dokumentiert sind.</p>	<p><b>1 Seminar</b> zu den relevanten Kommunikationsprotokollen (z.B. OPC-UA)</p> <p><b>1 Workshop</b> zu den Themen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundlagen der Programmierung mit Python</li> <li>• Datenaufzeichnung mit Python und OPC-UA</li> </ul>	<p><b>1 Seminar</b> zur datengetriebenen Modellbildung</p> <p><b>1 Workshop</b> zur Anwendung der entwickelten Software</p> <p><b>1 Leitfaden</b> zur datengetriebenen Modellbildung des Spritzgießprozesses</p>	<p><b>1 Seminar</b> zum Thema Optimalsteuerung</p> <p><b>1 Workshop</b> zur Anwendung der entwickelten Software</p> <p><b>1 Leitfaden</b> zur Optimierung des Spritzgießprozesses</p>
--	--	---	--	---

- 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"><li>• Einführung: Numerische Lösung von Optimalsteuerungsproblemen</li><li>• Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses</li><li>• Vorstellung der entwickelten Methoden</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Optimalsteuerung mit CasADi</li><li>• Anwendung der entwickelten Methoden zur Optimalsteuerung auf akademische Fallstudie.</li><li>• Anwendung der entwickelten Methoden zur Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses auf realitätsnahe Fallstudie</li></ul> |

Im letzten Lenkungsreis wurde eine Reduktion des Hands-on Teils vereinbart. Die 2 Veranstaltungen á 4 Stunden können hierdurch deutlich reduziert werden.

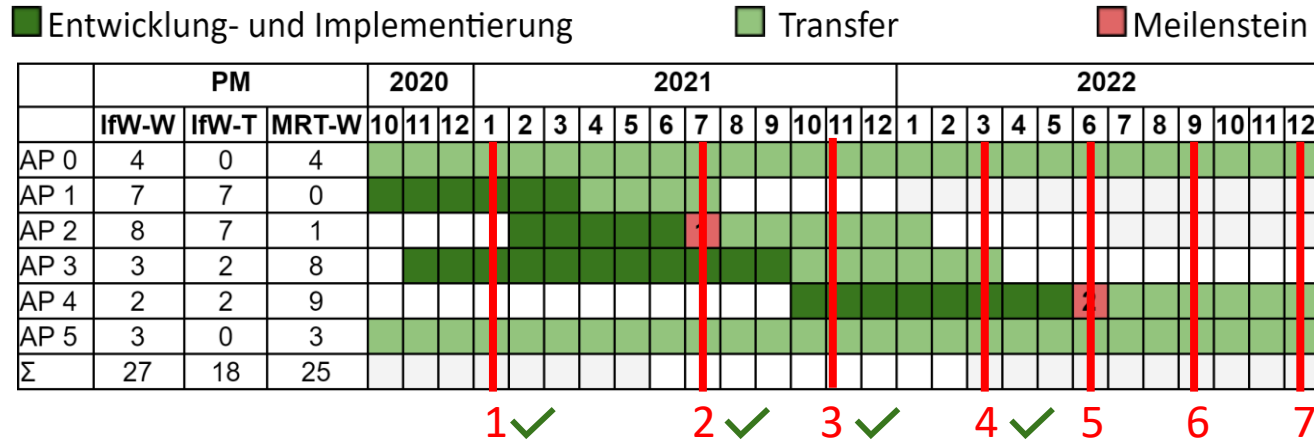
**Vorschlag:** 1 h Seminar und 1 h Workshop, entweder in einer oder zwei separaten Veranstaltungen.

Termin: Ende Oktober – Mitte November



- **Übersicht Projektstand DIM**
- **Rückkopplung Entwicklungstätigkeiten**
  - Modellbildung
  - Toolbox
- **Ausblick Entwicklungstätigkeiten**
  - Statischer Digitaler Zwilling
  - Versuchsplanung
- **Rückkopplung Transfermaßnahmen**
  - Modellbildung
- **Ausblick Transfermaßnahmen**
  - Prozessoptimierung
- **Zukünftige Organisation der Zusammenarbeit**
  - Abschlusstreffen

- Abschlusstreffen: Soll genutzt werden, um Demonstratoranlage zu präsentieren oder bspw. um Projekt Revue passieren zu lassen und Ideen für ein Folgeprojekt zu sammeln?
- Vorschlag:
  - Abschlusstreffen ist das nächste und letzte Treffen des Lenkungskreises
  - Demonstratoranlage wird präsentiert, Feedback des Lenkungskreises
  - Diskussion eines Folgeprojektes an einem gesonderten Termin



- 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