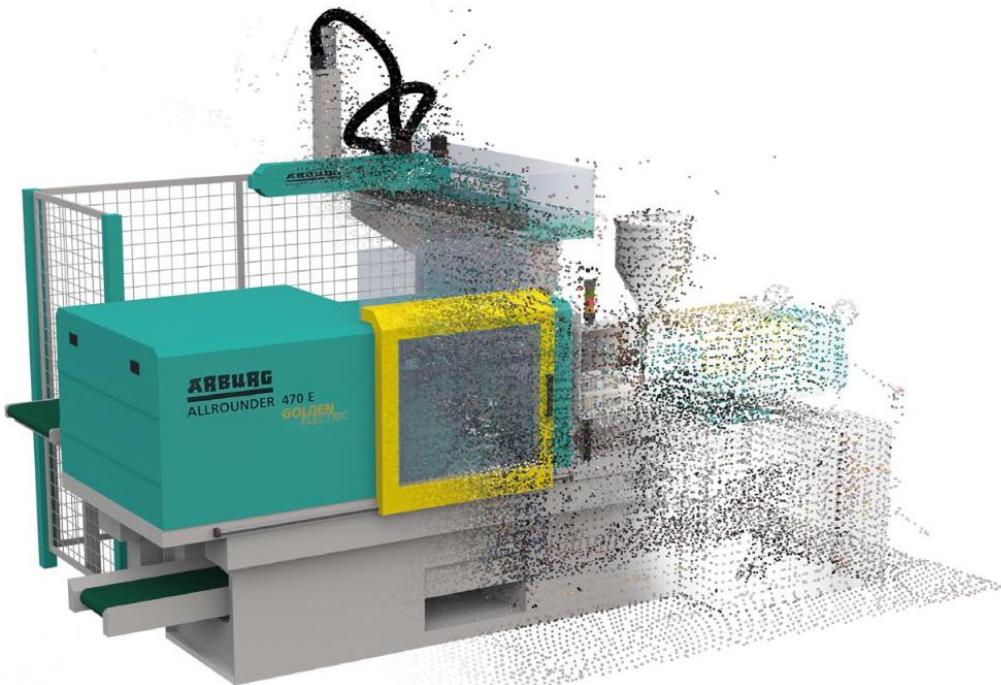


# Lenkungskreistreffen 3

## Digital Twin of Injection Molding (DIM)

02.11.2021



[Quelle: HMQ AG]

■ Entwicklung- und Implementierung

■ Transfer

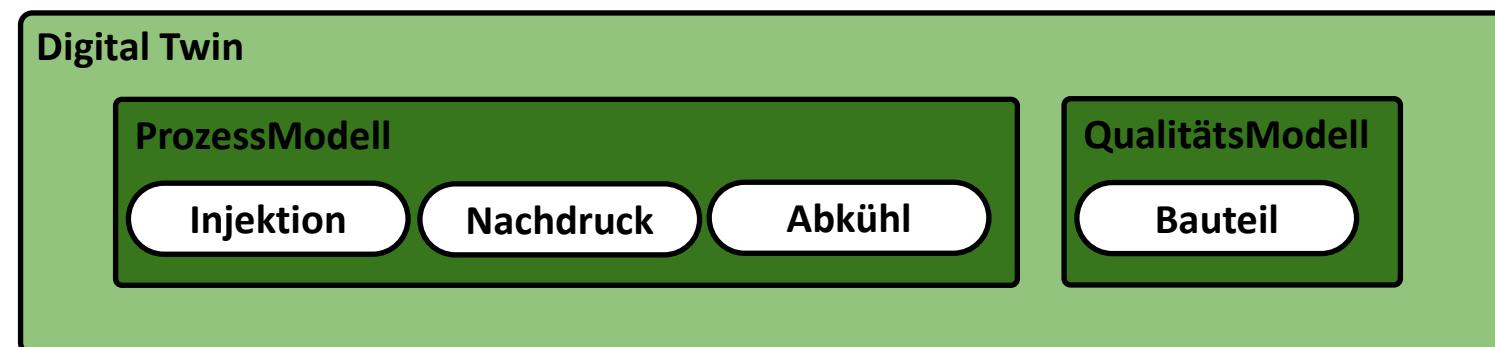
■ Meilenstein

	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																											

15.07.2021

## Rückblick auf letztes Projekttreffen:

- Vorstellung der Datenaufzeichnung
- Softwarestruktur Toolbox zur Modellbildung und Prozessoptimierung



AP0: Projektlenkungskreis

AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle

AP2: Datenaufzeichnung

AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling

AP4: Prozessoptimierung

AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

MS1: Demonstratoranlage aufgebaut

MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

■ 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

## Agenda:

- MS1, Vorstellung der Demonstratoranlage
- Versuchsplanung
- Vorstellung Datenauslesung
- Dynamisches Modellbildungskonzept
- Workshopreihe

AP0: Projektlenkungskreis

AP1: Aufbau der Qualitätsmesszelle

AP2: Datenaufzeichnung

AP3: Modellbildung Digitaler Zwilling

AP4: Prozessoptimierung

AP5: Verbreitung der Projektergebnisse

MS1: Demonstratoranlage aufgebaut

MS2: Softwareentwicklung abgeschlossen

- Übersicht Projektstand DIM

- **Vorstellung Demonstratoranlage**

- Spritzgießmaschine + Bauteil
- Qualitätsmesszelle
- Versuchsplanung
- Datenauslesung

- Dynamisches Modellbildungskonzept

- Workshopreihe

- Abschlussdiskussion

**Arburg Allrounder 470S:**

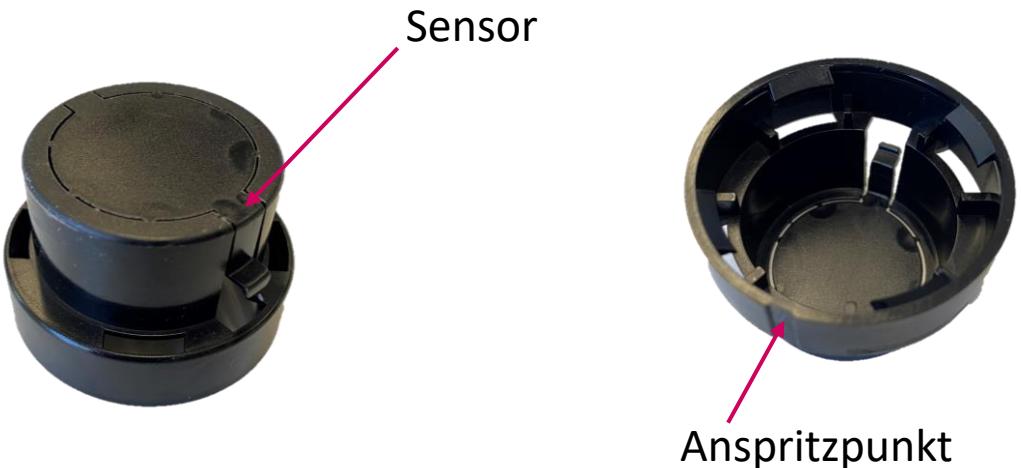
- Vollhydraulische 2K-Spritzgießmaschine in L-Stellung
- Zuhaltekraft: 1100 kN
- Schneckendurchmesser: ø25 mm und ø35 mm
- Zusätzlicher Messverstärker: Priamus Amplifier 5060
- Kombinierter Forminnendruck- und Temperatursensor: Kistler Typ 6190C



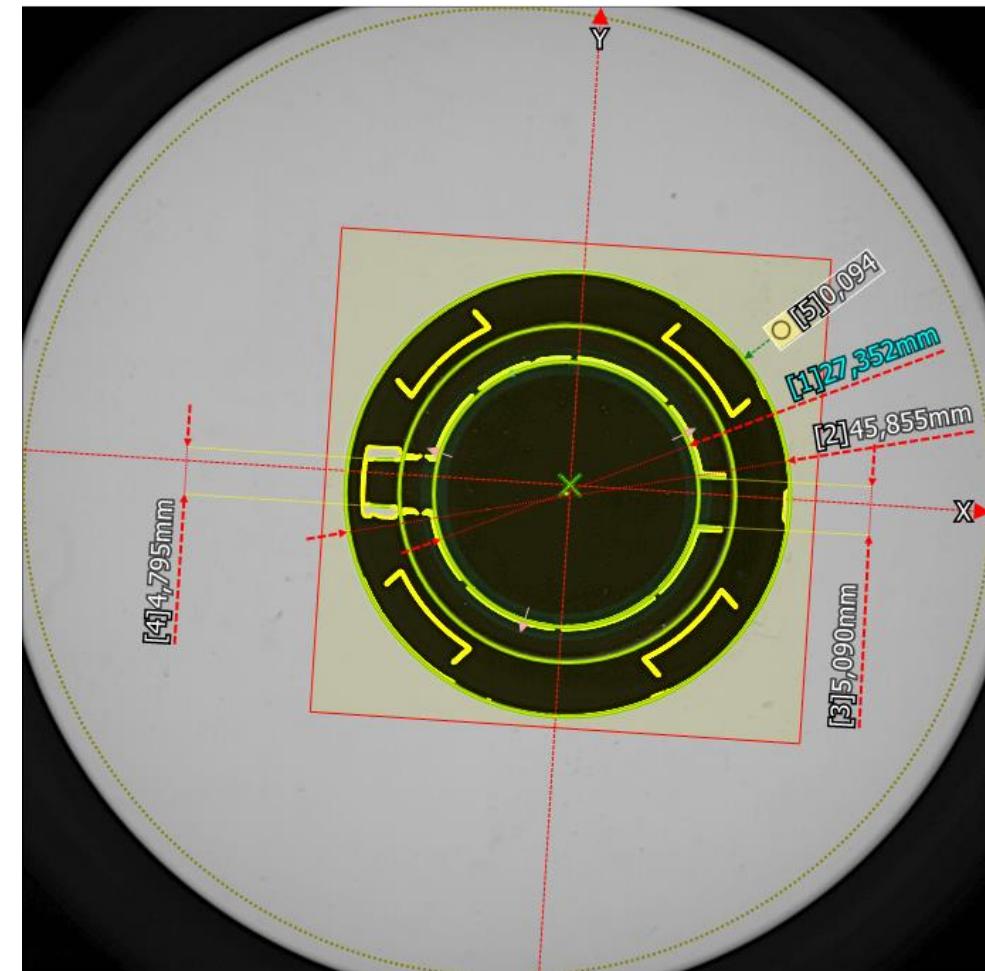
[Quelle: Arburg GmbH + Co KG]

**Originalitätsverschluss:**

- Spritzgießwerkzeug wurde durch Partnerunternehmen bereitgestellt
- Eine Kavität mit direkt messendem Sensor
- Automatische Angusstrennung durch Abstreiferplatte



- [1] Durchmesser\_innen
- [2] Durchmesser\_aussen
- [3] Stegbreite\_Gelenk
- [4] Breite\_Lasche
- [5] Rundheit\_aussen

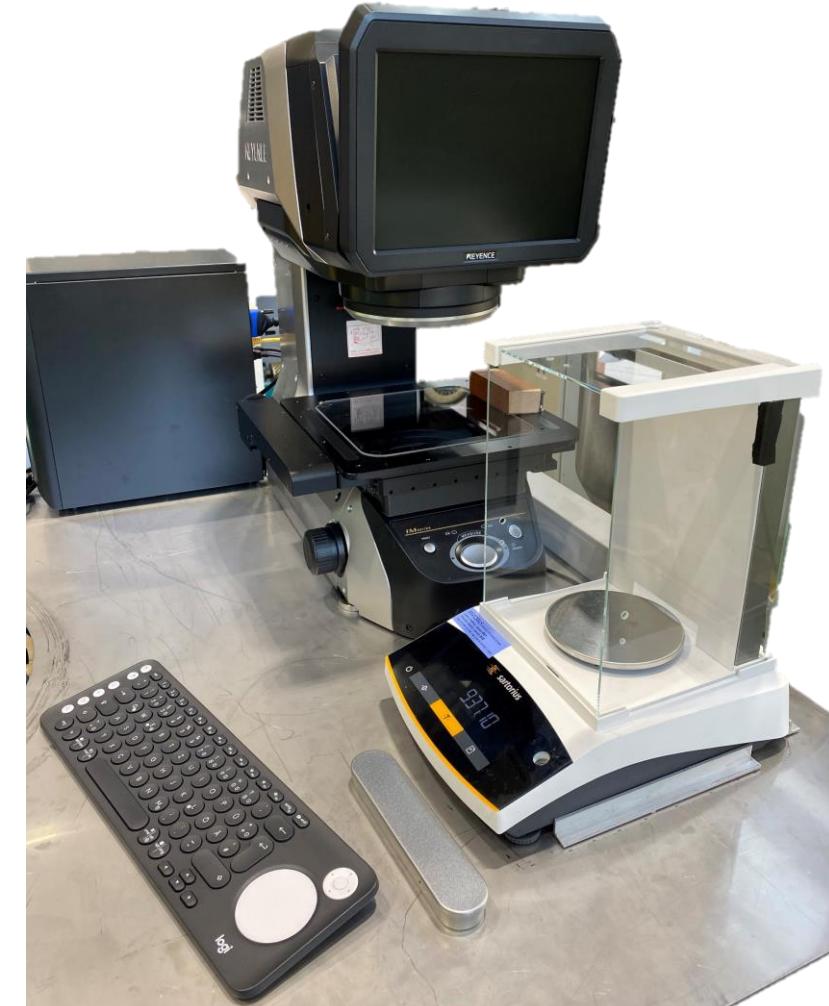


## Digitaler Messprojektor:

- Keyence IM-7020
- Messfeldgröße: 200 mm x 200 mm
- Automatische Geometrieerkennung
- Simultane Erfassung von bis zu 300 vorgegebenen Maßen
- Mehrere Bauteile können gleichzeitig vermessen werden
- Messzeit ca. 2-3 Sekunden
- LAN und USB Schnittstelle zur Datenübertragung

## Laborwaage:

- Sartorius Entris II
- Maximale Wiegekapazität: 320 g
- Reproduzierbarkeit: 1 mg
- Typische Stabilisierungszeit:  $\leq 1$  s
- Interne Kalibrierung und Justierung (isoCAL)
- USB-C Schnittstelle zur Datenübertragung



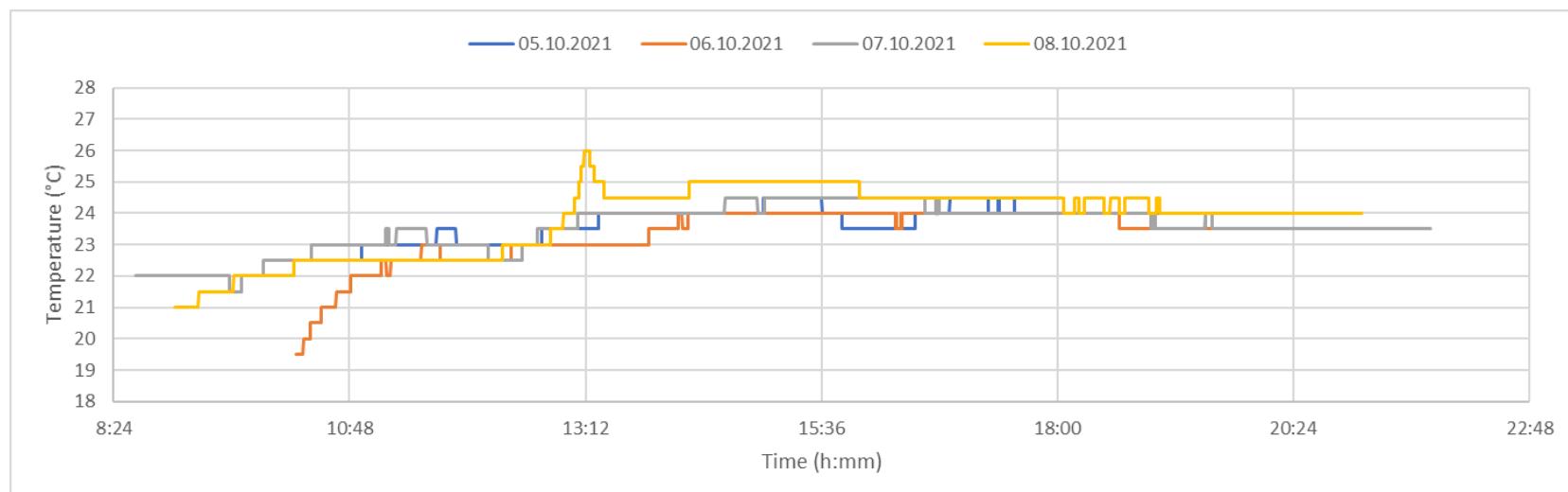
## Temperatur und Luftfeuchtigkeit:

- Aufzeichnung durch Datenlogger

Datum	Temperatur (°C)	Rel. Luftfeuchtigkeit (%)
05.10.2021	23,73 ± 0,53	45,29 ± 1,12
06.10.2021	23,34 ± 0,85	41,37 ± 1,94
07.10.2021	23,52 ± 0,75	43,19 ± 2,53
08.10.2021	23,79 ± 1,10	40,65 ± 1,29

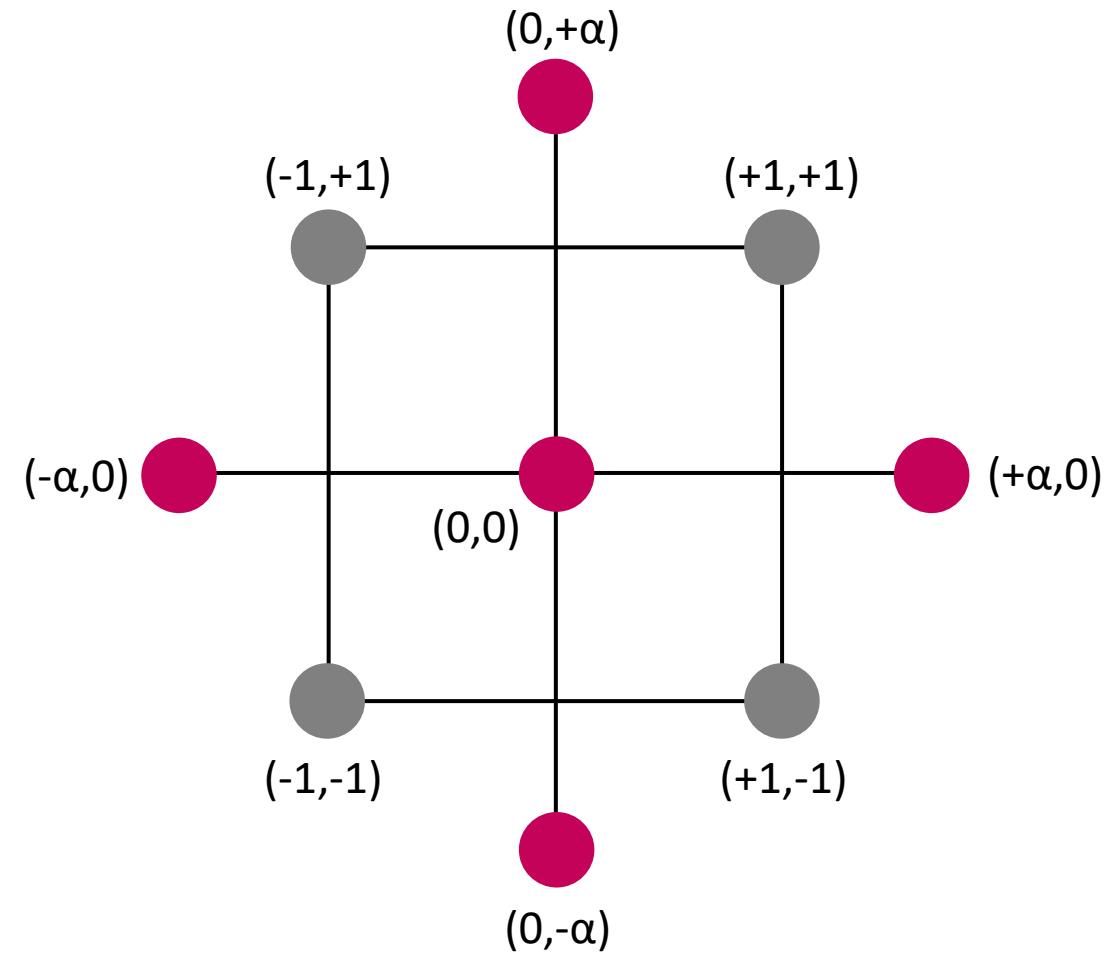
## Granulat Restfeuchtigkeit:

- Trocknung in mobilen Granulattrockner
- 80 °C für 5 Stunden, danach 30 °C
- Nachfüllen einer definierten Granulatmenge nach 20 Zyklen



**Wirkungsflächenversuchsplan:**

- Zentral zusammengesetzter Versuchsplan (Central Composite Design – CCD)
- Erweiterung eines vollfaktoriellen Versuchsplan durch einen mittigen Stern
- Orthogonale Versuchsanordnung mit zweistufigen Aufbau
- Durch Stern können quadratische und/oder kubische Modelle abgebildet werden
- Für  $\alpha=1$  liegen die Sternpunkte auf den Flächen (Central Composite Face – CCF)



**Wirkungsflächenversuchsplan:**

- Zentral zusammengesetzter Versuchsplan (Central Composite Design – CCD)
- Erweiterung eines vollfaktoriellen Versuchsplan durch einen mittigen Stern
- Orthogonale Versuchsanordnung mit zweistufigen Aufbau
- Durch Stern können quadratische und/oder kubische Modelle abgebildet werden
- Für  $\alpha=1$  liegen die Sternpunkte auf den Flächen (Central Composite Face – CCF)

*2 Faktorstufen<sup>8 Parameter</sup> = 256 Eckpunkte*

*+*

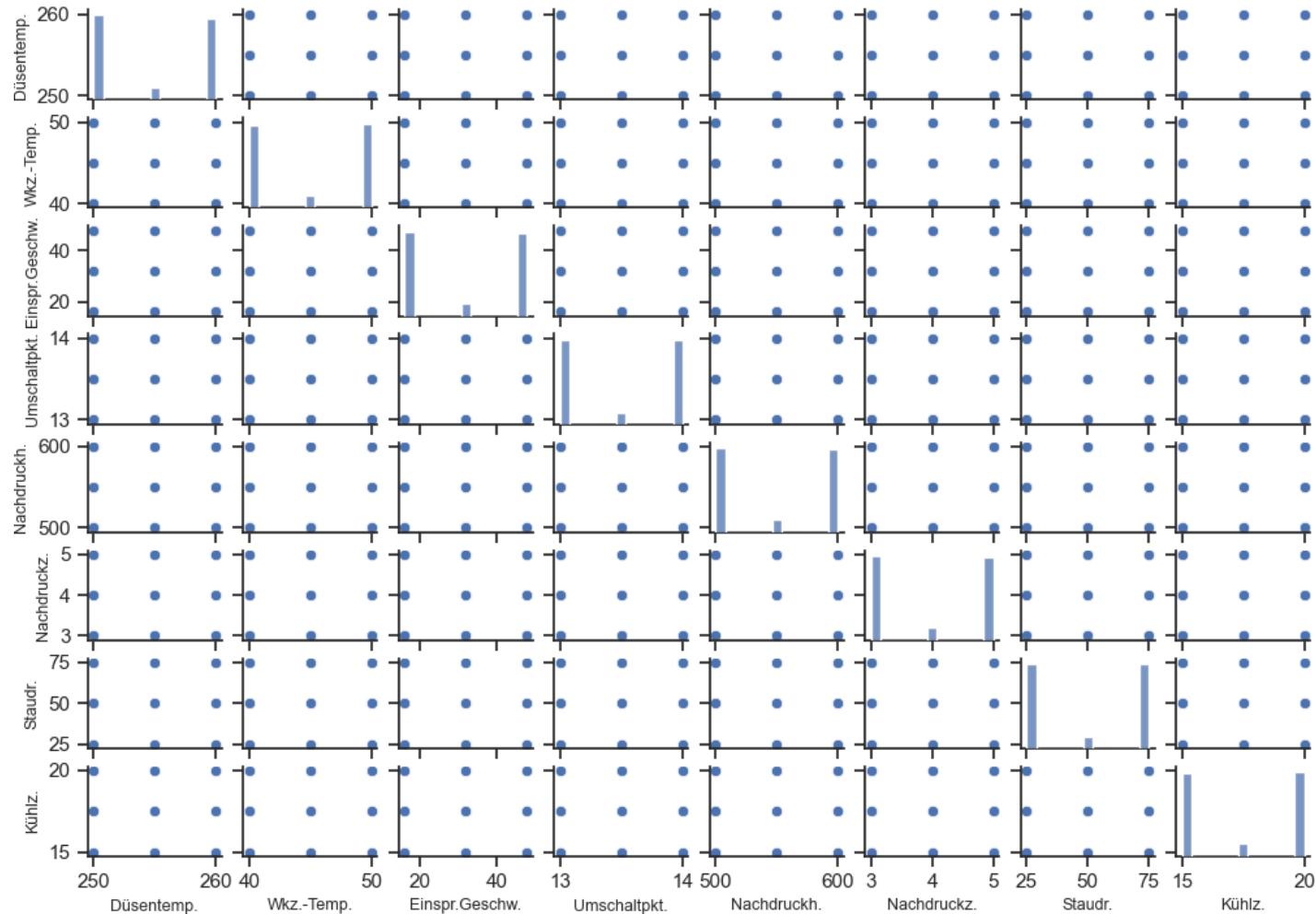
*2 Faktorstufen \* 8 Parameter = 16 Eckpunkte*

*+*

*2 Wiederholungen des Zentralpunktes*

*=*

*274 Chargen (à 10 Bauteile)*



## Prozessparameter für Versuchsplan:

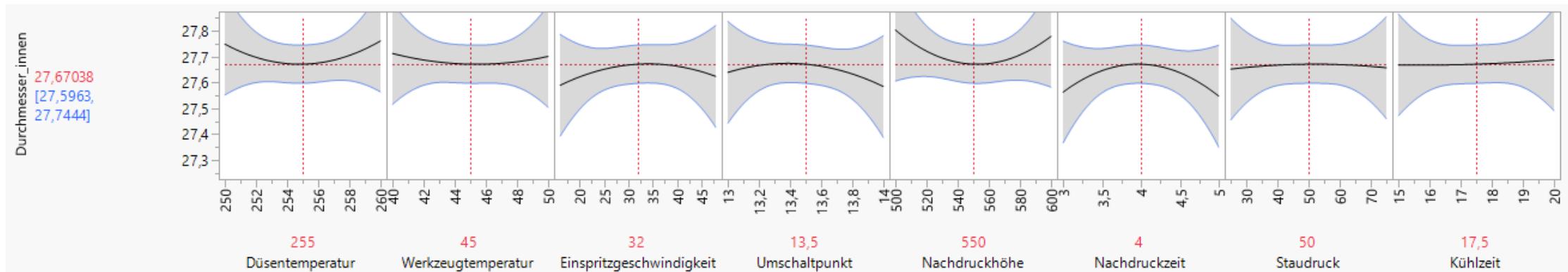
Parameter	-1	0	1
Düsentemperatur	250 °C	255 °C	260 °C
Werkzeugtemperatur	40 °C	45 °C	50 °C
Einspritzgeschwindigkeit	16 cm³/s	32 cm³/s	48 cm³/s
Umschaltpunkt	13 cm³	13,5 cm³	14 cm³
Nachdruckhöhe	500 bar	550 bar	600 bar
Nachdruckzeit	3 s	4 s	5 s
Staudruck	25 bar	50 bar	75 bar
Restkühlzeit	15 s	17,5 s	20 s

## Auswertung durch JMP:

1. Erstellen des Versuchsplans
2. Eingabe der gemittelten Qualitätsgrößen
3. Analyse der Haupteffekte und Wechselwirkungen
4. Erstellen der Vorhersageformeln der einzelnen Qualitätsgrößen

Quelle	Log-Wertigkeit	P-Wert
Umschaltpunkt(13, 14)	2,655	0,00221
Einspritzgeschwindigkeit(16, 48)	1,277	0,05282
Einspritzgeschwindigkeit*Nachdruckhöhe	1,234	0,05830
Düsentemperatur*Nachdruckzeit	1,205	0,06238
Werkzeugtemperatur*Staudruck	1,100	0,07951
Düsentemperatur*Kühlzeit	0,836	0,14596
Werkzeugtemperatur*Nachdruckhöhe	0,818	0,15204
Nachdruckhöhe*Kühlzeit	0,813	0,15377
Werkzeugtemperatur*Kühlzeit	0,774	0,16810
Nachdruckhöhe(500, 600)	0,759	0,17401 ^
Nachdruckhöhe*Nachdruckhöhe	0,689	0,20485
Umschaltpunkt*Kühlzeit	0,661	0,21823

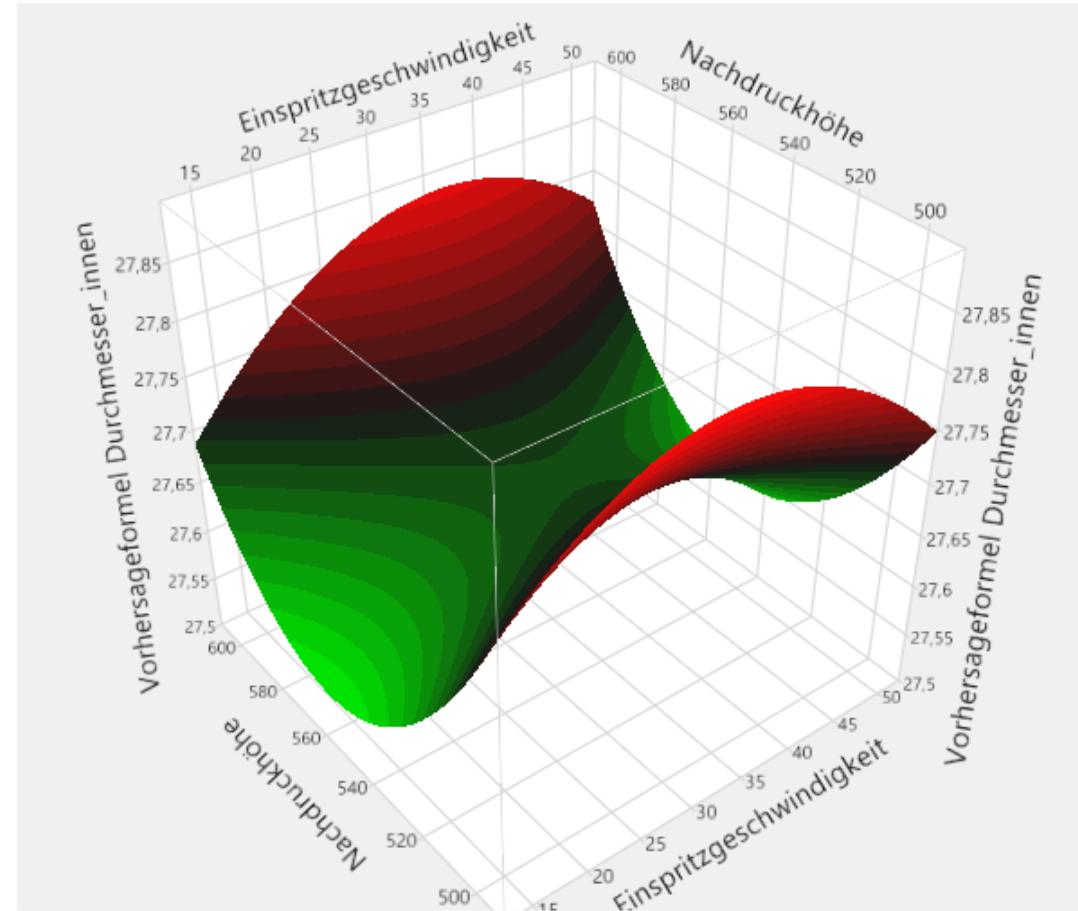
Gewichtung der Einflussgrößen nach Signifikanz



Darstellung der Haupteffekte auf die Zielgröße Durchmesser\_innen

**Auswertung durch JMP:**

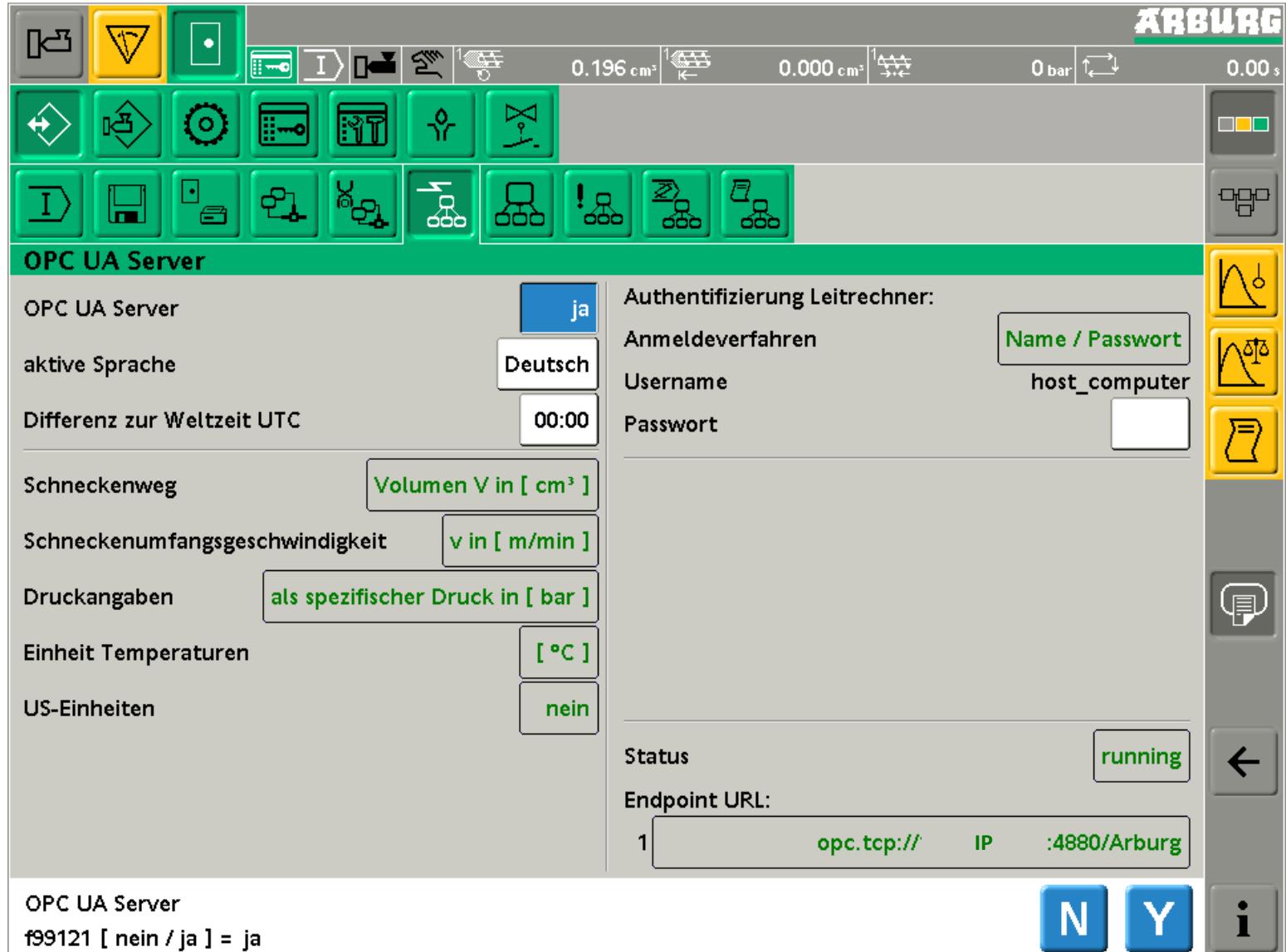
1. Erstellen des Versuchsplans
2. Eingabe der gemittelten Qualitätsgrößen
3. Analyse der Haupteffekte und Wechselwirkungen
4. Erstellen der Vorhersageformeln der einzelnen Qualitätsgrößen



Wirkungsflächendiagramm

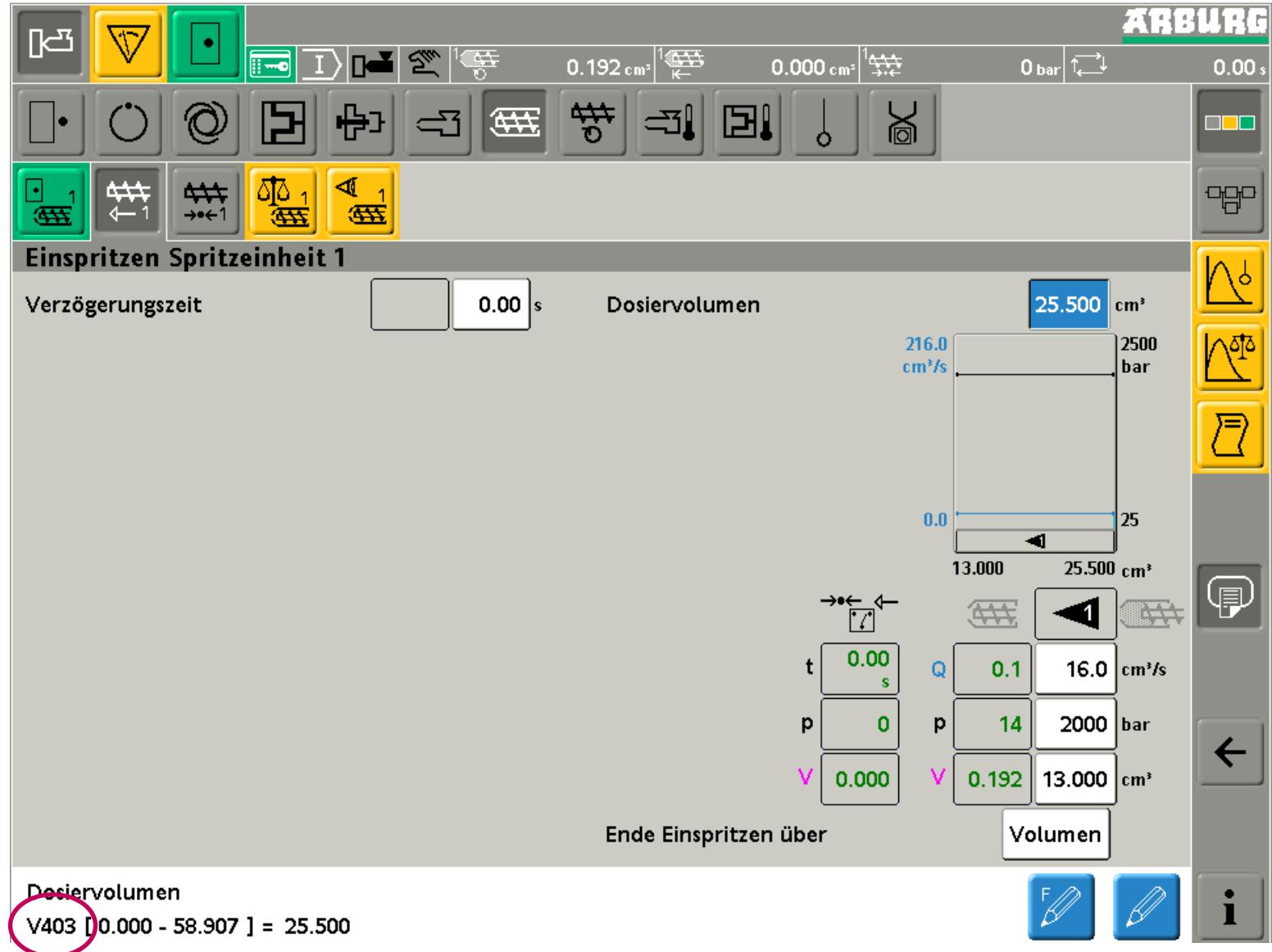
**Auslesen über OPC UA:**

1. OPC UA Server aktivieren  
(Status = running)
2. Username, Passwort und  
Endpoint URL übernehmen



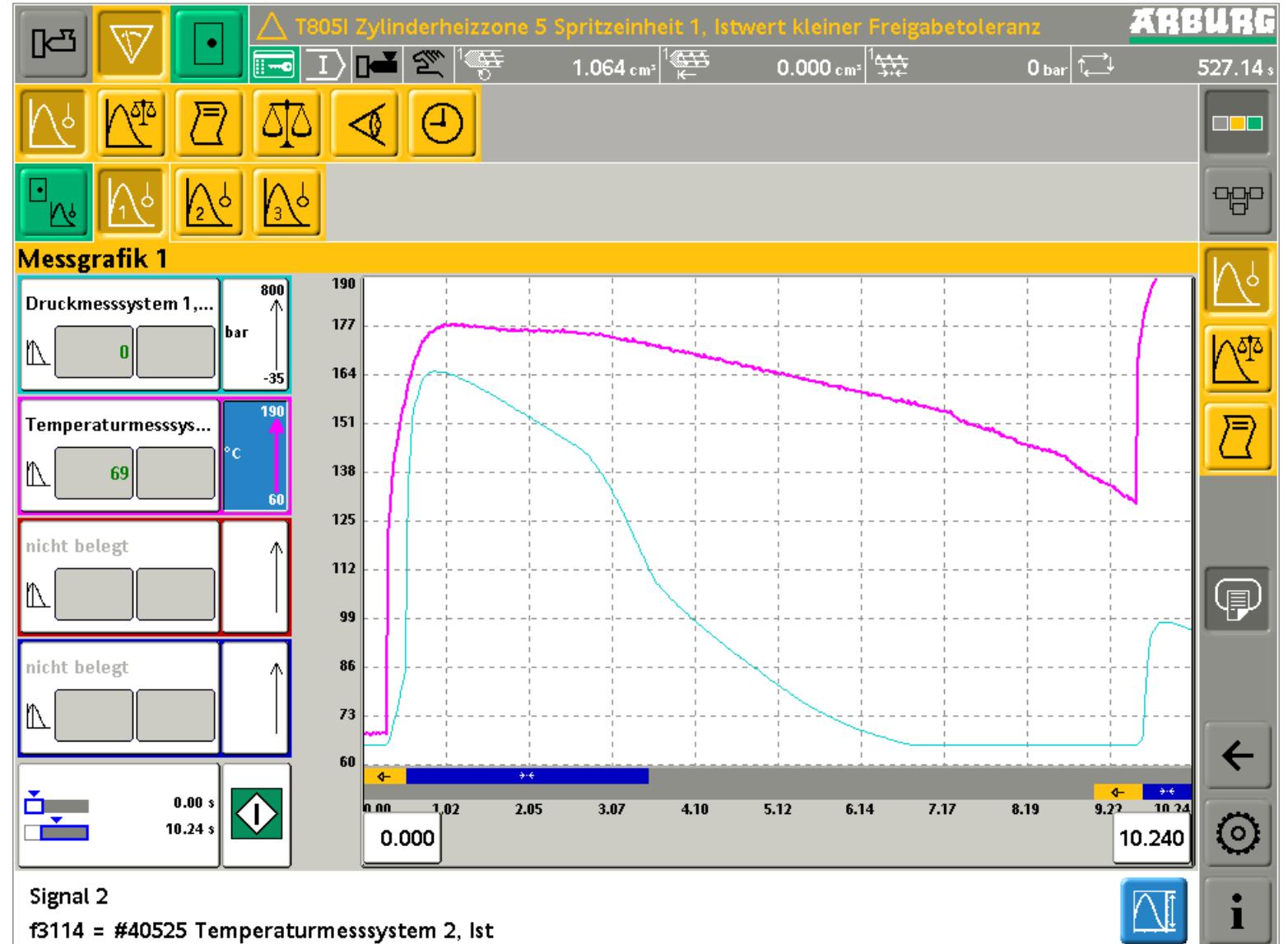
**Auslesen über OPC UA:**

1. OPC UA Server aktivieren  
(Status = running)
2. Username, Passwort und  
Endpoint URL übernehmen
3. Für relevante Parameter die interne  
Kennnummer raussuchen



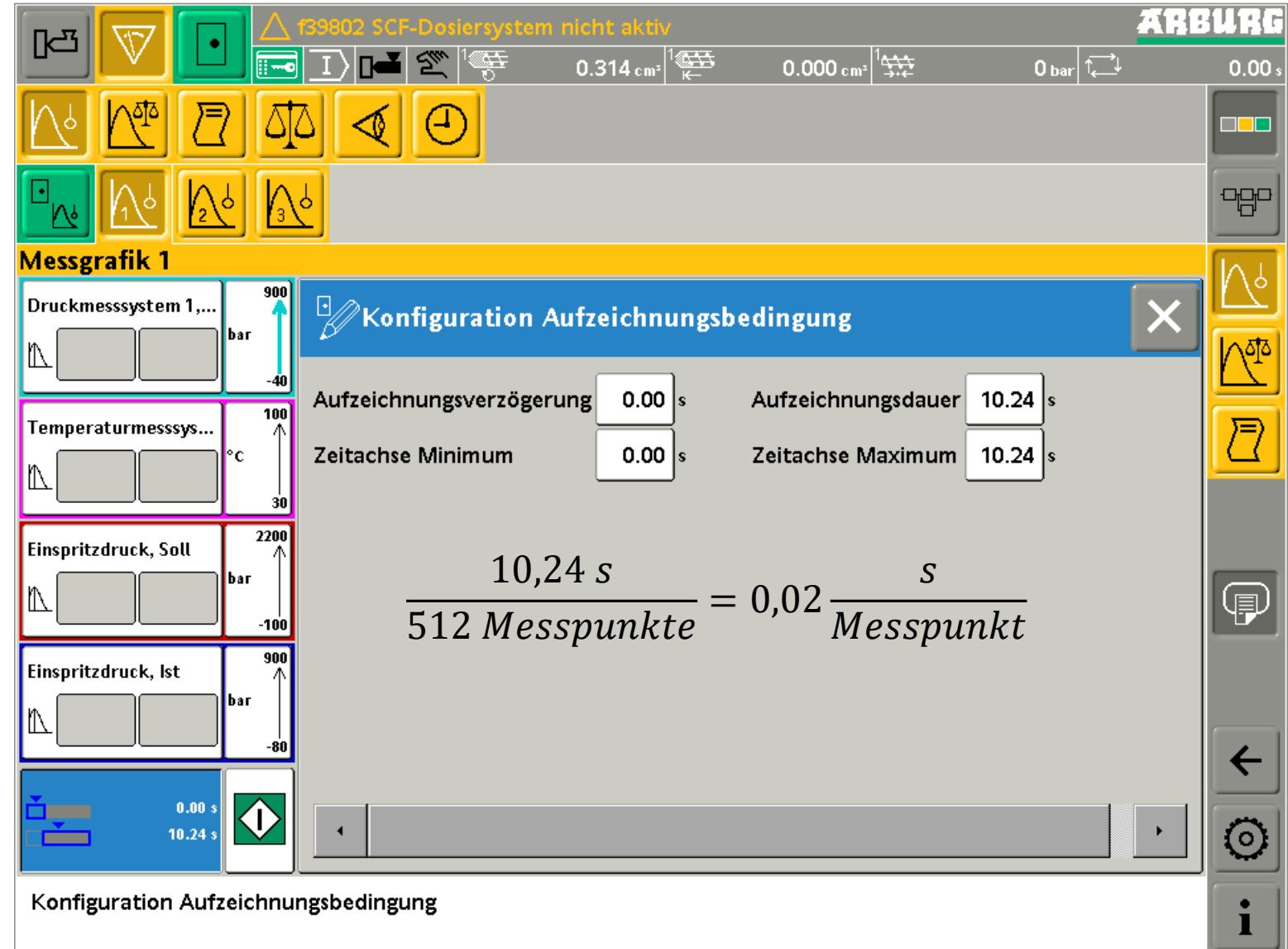
**Auslesen über OPC UA:**

1. OPC UA Server aktivieren  
(Status = running)
2. Username, Passwort und  
Endpoint URL übernehmen
3. Für relevante Parameter die interne  
Kennnummer raussuchen
4. Messgrafiken (und ggf.  
Überwachungsgrafiken) erstellen



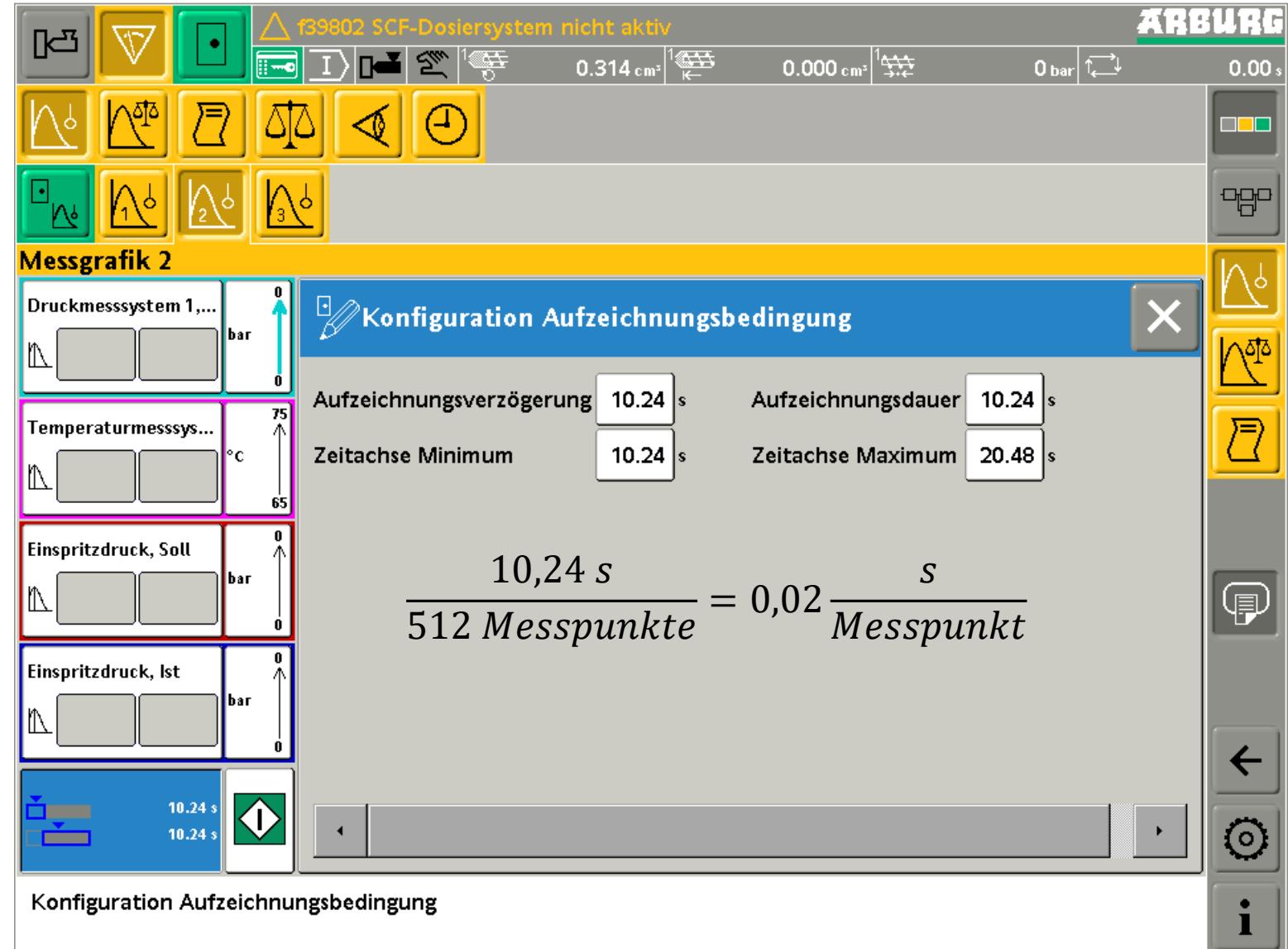
**Auslesen über OPC UA:**

1. OPC UA Server aktivieren  
(Status = running)
2. Username, Passwort und  
Endpoint URL übernehmen
3. Für relevante Parameter die interne  
Kennnummer raussuchen
4. Messgrafiken (und ggf.  
Überwachungsgrafiken) erstellen

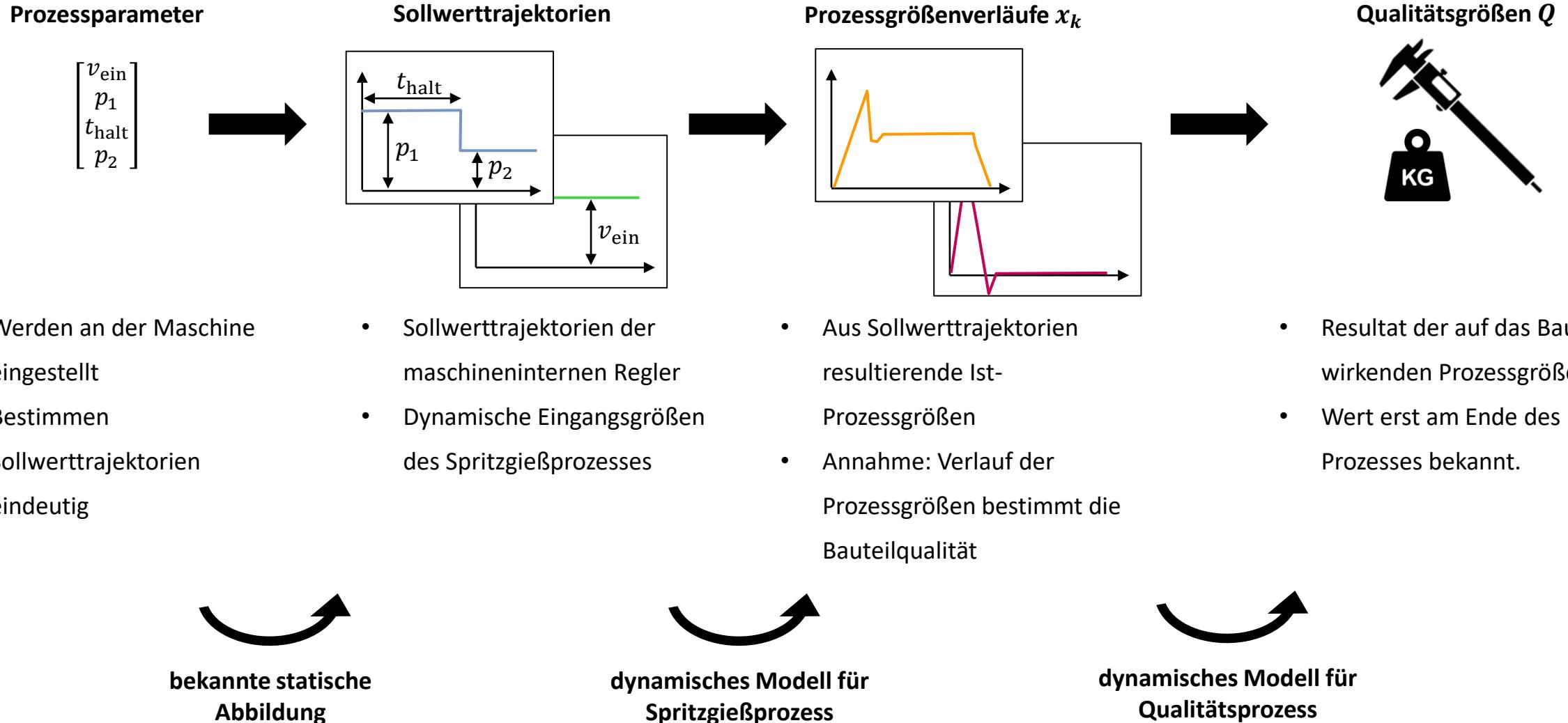


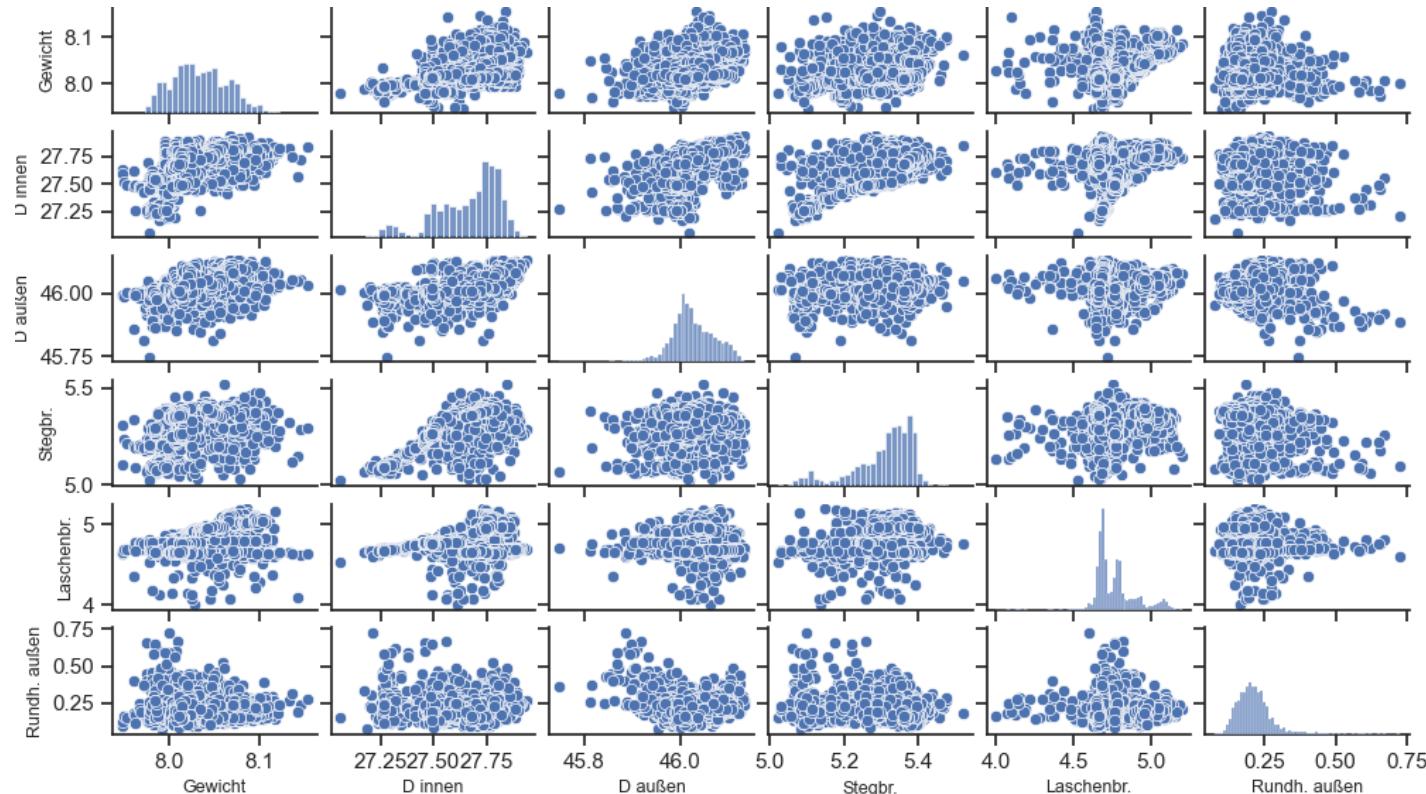
**Auslesen über OPC UA:**

1. OPC UA Server aktivieren  
(Status = running)
2. Username, Passwort und  
Endpoint URL übernehmen
3. Für relevante Parameter die interne  
Kennnummer raussuchen
4. Messgrafiken (und ggf.  
Überwachungsgrafiken) erstellen



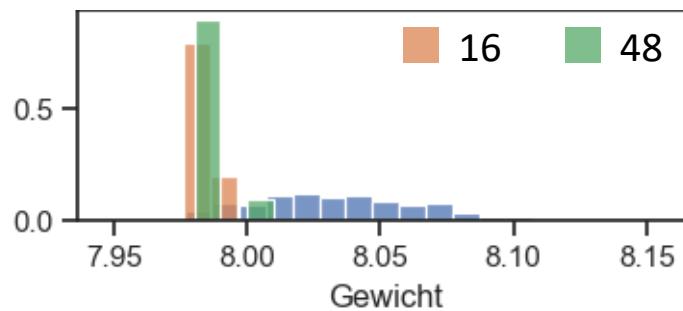
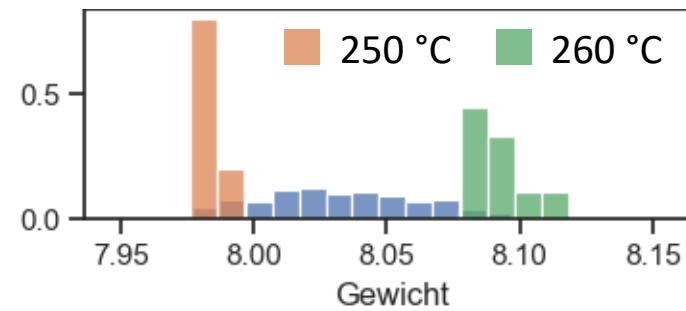
- Übersicht Projektstand DIM
- Vorstellung Demonstratoranlage
- **Dynamisches Modellbildungskonzept**
  - Überblick
  - Qualitätsgrößen
  - Qualitätsmodell
- Workshopreihe
- Abschlussdiskussion



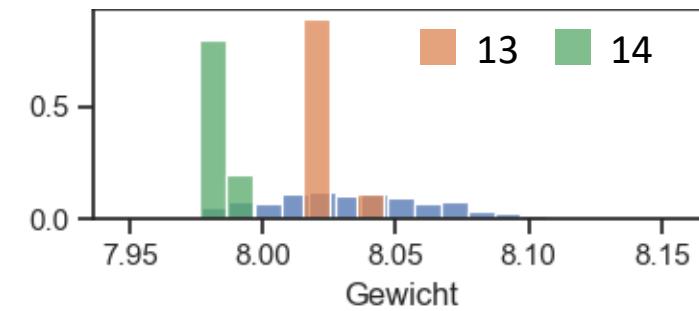


- Statische Betrachtung der Qualitätsgrößen, um einen Überblick über die Daten zu gewinnen
- Ermöglicht Identifikation von augenscheinlichen Ausreißern, in diesem Fall 129 von 2782 rudimentär beseitigt, genauere Betrachtung aber erforderlich!
- Keine offensichtlichen Korrelationen zwischen den Qualitätsgrößen → unabhängige Modellierung aller Qualitätsgrößen möglich

- Einfluss ausgewählter Faktoren auf die Qualitätsgröße "Gewicht" bei Konstanthalten aller anderer Faktoren
- Rein statische Betrachtungsweise und daher keine definitive Aussage über Erfolg oder Misserfolg einer dynamischen Modellierung möglich
- Dient einer ersten Näherung, welche Maschinenparameter und Prozessgrößen (vermutlich) relevant sind und welche Qualitätsgrößen sich (vermutlich) gut oder weniger gut modellieren lassen

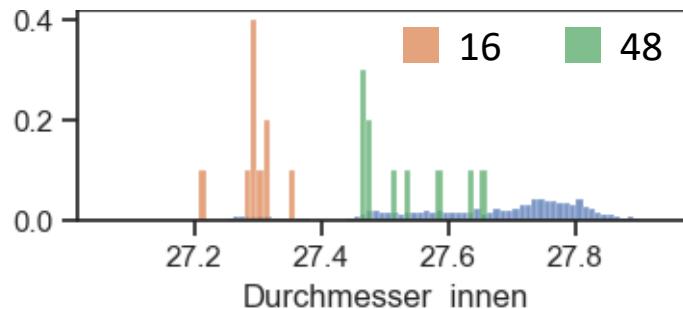
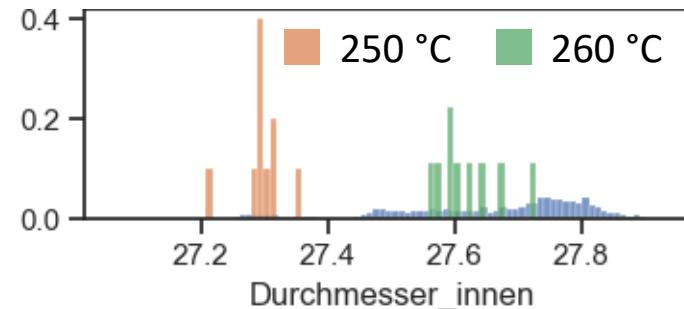
**Einspritzgeschw.****Düsentemp.**

■ alle Faktorstufenkombinationen

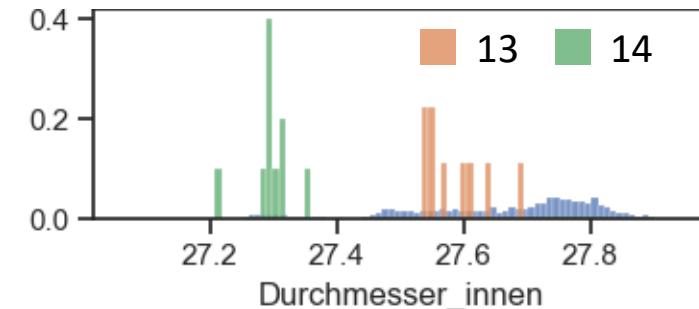
**Umschaltpkt.**

- Wahl der Einspritzgeschwindigkeit hat im Rahmen des betrachteten Wertebereichs offenbar keinen Einfluss auf das Bauteilgewicht
- Einfluss der Düsentemperatur ist erheblich, Temperaturen sollten somit unbedingt als Modelleingangsgröße berücksichtigt werden.
- Der Umschaltpunkt beeinflusst das Bauteilgewicht ebenfalls signifikant, ist aber bei der dynamischen Modellierung in den Trajektorien bereits implizit enthalten, stellt also keine gesonderte Modelleingangsgröße dar.

- Einfluss ausgewählter Faktoren auf die Qualitätsgröße "Durchmesser\_innen" bei Konstanthalten aller anderer Faktoren

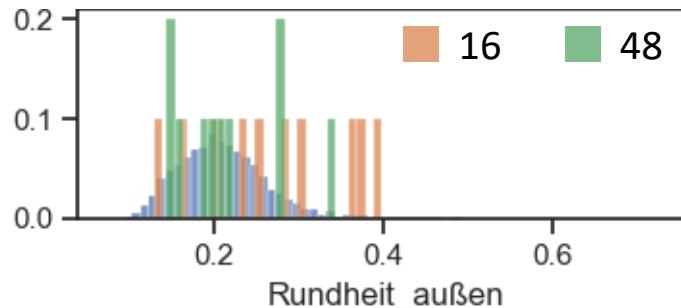
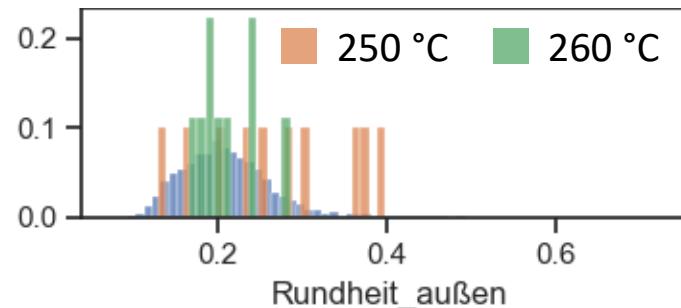
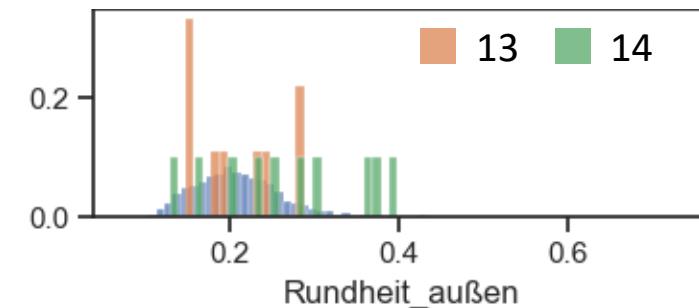
**Einspritzgeschw.****Düsentemp.**

■ alle Faktorstufenkombinationen

**Umschaltpkt.**

- Alle betrachteten Faktoren beeinflussen die Qualitätsgröße "Durchmesser\_innen" signifikant.
- Der Erfolg der Bildung von Modellen zur Prädiktion dieser Qualitätsgröße kann somit als aussichtsreich betrachtet werden.

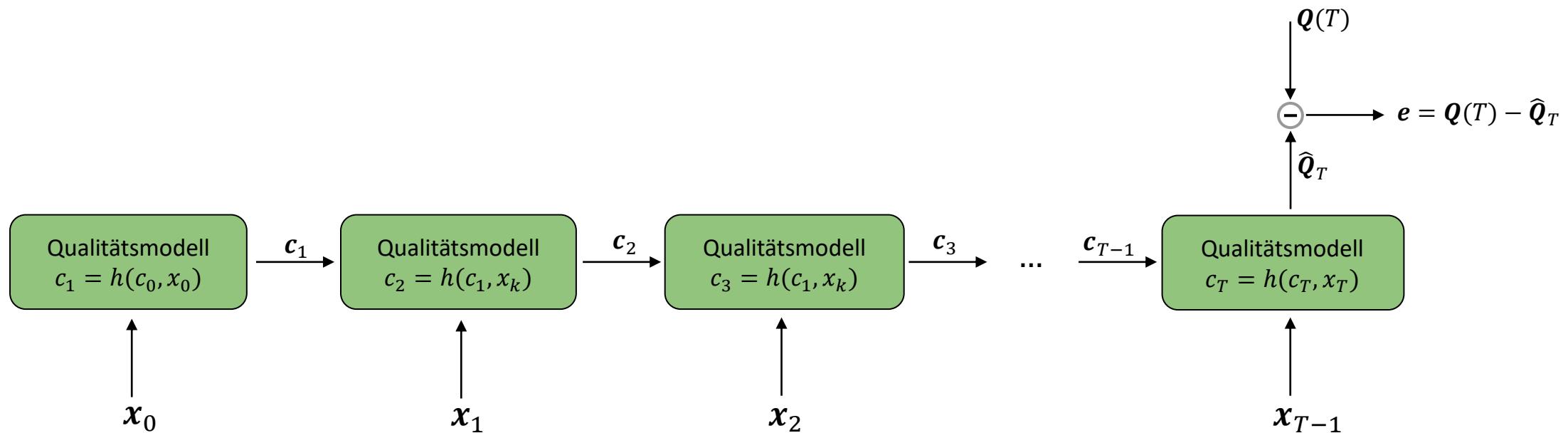
- Einfluss ausgewählter Faktoren auf die Qualitätsgröße "Rundheit" bei Konstanthalten aller anderer Faktoren

**Einspritzgeschw.****Düsentemp.****Umschaltpkt.**

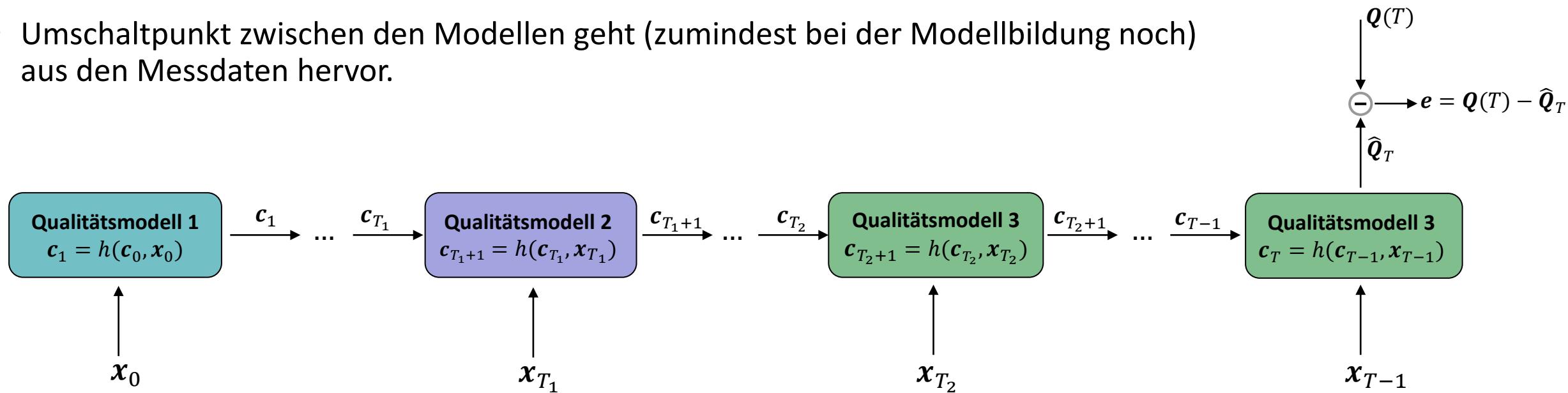
■ alle Faktorstufenkombinationen

- Die Streuung der Qualitätsgröße "Rundheit" innerhalb einer Messreihe entspricht der Streuung der Qualitätsgröße über alle Faktorstufen.
- Der stochastische Anteil überwiegt den deterministischen Anteil, eine Modellbildung zur Vorhersage dieser Qualitätsgröße wird mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht möglich sein.

- Es steht nur eine einzige Messung der Bauteilqualität  $Q(T)$  am Ende  $T$  jedes Batches zur Verfügung. Das Qualitätsmodell muss also lernen Trajektorien  $x_k = [x_0, \dots, x_T]$  der Prozessgrößen auf einen einzigen Endwert  $Q(T)$  abzubilden
- Rekurrente Modelle besitzen einen internen Zustand  $c_k$ , der gewissermaßen die gesamte "Information" einer eingehenden Zeitreihe "speichert". Erst im letzten Zeitschritt wird der interne Zustand auf die Ausgangsgröße abgebildet

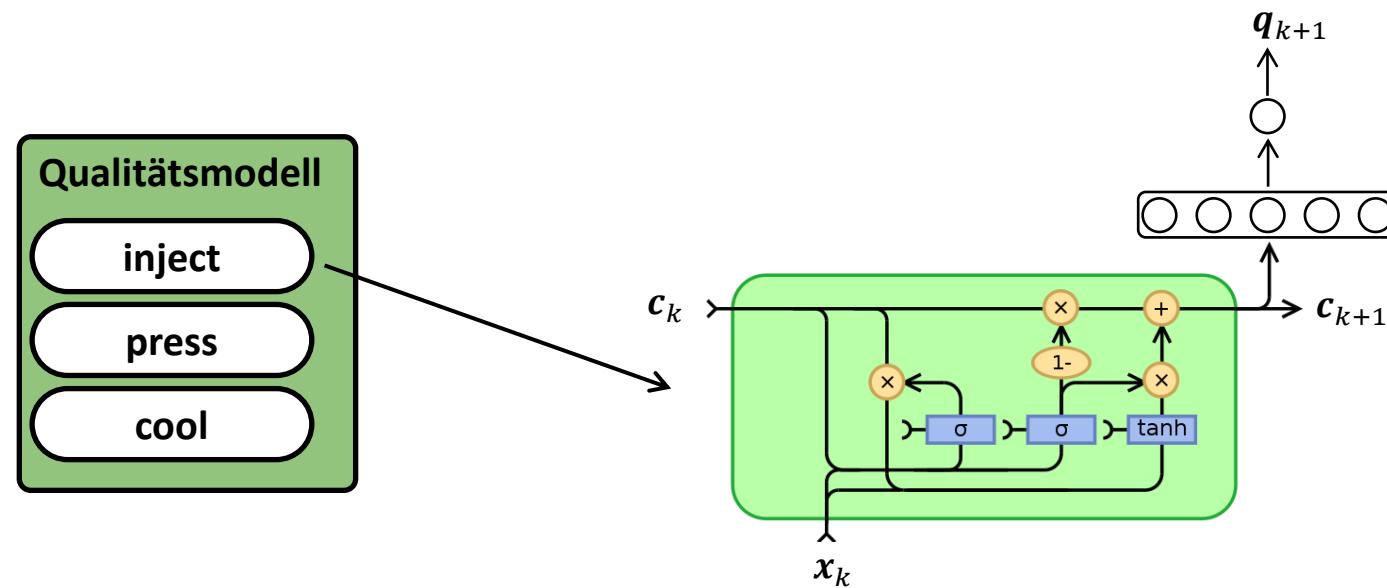


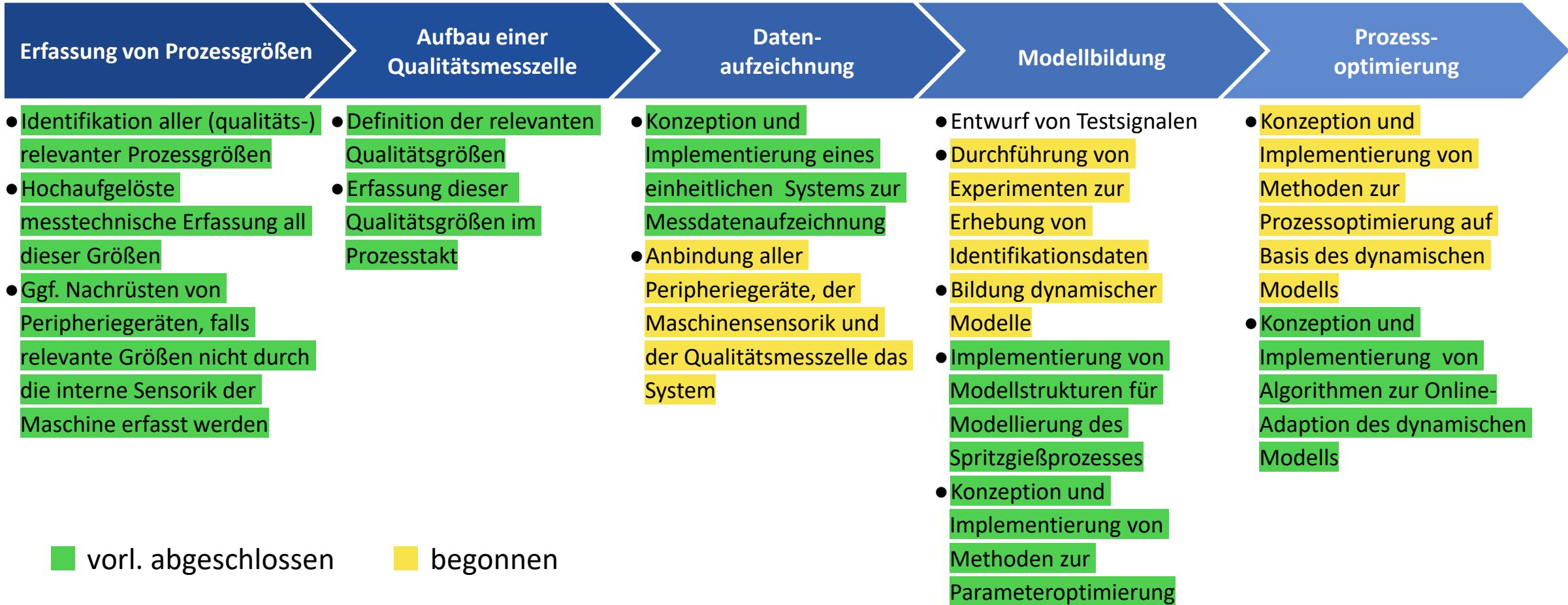
- Es ist zu erwarten, dass ein einziges Modell zur Abbildung der Prozessgrößen auf die Bauteilqualität nicht ausreichen wird.
- Während der Füllung der Form, der Nachdruckphase und der Abkühlphase ist das Bauteil stark unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt und unterläuft zusätzlich noch Phasenübergänge.
- Indem jede Phase durch ein eigenes Modell beschrieben wird, kann vermutlich eine höhere Modellgüte erzielt werden.
- Umschaltpunkt zwischen den Modellen geht (zumindest bei der Modellbildung noch) aus den Messdaten hervor.



## Szenario

- Bildung eines Modells zur Prädiktion des Innendurchmessers
- Prozessgrößen  $x$ : Werkzeuginnendruck, Werkzeugtemperatur, Volumenstrom, Schneckengeschwindigkeit, Hydraulikdruck
- Zum Zweck dieser Demonstration wurden nur die Daten einer Messreihe (d.h. eine Faktorstufenkombination) für die Modellbildung berücksichtigt.
- Das Qualitätsmodell umfasst 3 Modelle, jeweils für die Einspritz-, Nachdruck- und Abkühlphase. Jedes Modell ist ein rekurrentes Neuronales Netz vom Typ Gated Recurrent Unit (GRU) mit einem Neuronalen Netz zur Abbildung des internen Zustandes  $c$  auf die Qualitätsgröße  $q$ .





- Übersicht Projektstand DIM
- Vorstellung Demonstratoranlage
- Dynamisches Modellbildungskonzept
- Workshopreihe
- Abschlussdiskussion

<b>Einführungsveranstaltung</b>	- Digitale Zwillinge in der Kunststoffverarbeitung - Überblick über Transferinhalte	<b>11/2021</b> 1h Seminar	<b>23.11.2021</b> <b>15-16 Uhr</b>
<b>Prozessgrößenerfassung</b>	- Prozessgrößen- und Sensorsauswahl - Auslesen von Daten aus der Maschinensteuerung	<b>12/2021</b> 1h Seminar	 Theorie Praxis
<b>Qualitätsgrößenerfassung</b>	- Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen - Aufbau einer Qualitätsmesszelle	<b>01/2022</b> 1h Seminar	 Theorie Praxis
<b>Programmieren mit Python</b>	- Grundlegende und fortgeschrittene Aspekte der objektorientierten Programmierung mit Python	<b>02/2022</b> 2h Seminar & Workshop	 Theorie Praxis
<b>Datenaufzeichnung mit OPC-UA</b>	- Überblick über die Funktionsweise des Python-Skripts zur Datenaufzeichnung - Anpassung/Erweiterung zur Erfassung gewünschter Prozessparameter	<b>03/2022</b> 2h Seminar & Workshop	 Theorie Praxis
<b>Modellbildung</b>	- Grundlagen der datengetriebenen Modellbildung und nichtlinearen Optimierung - Modellbildung des Spritzgießprozesses	<b>04/2022 - 05/2022</b> 2x 4h Seminar & Workshop	 Theorie Praxis
<b>Prozessoptimierung</b>	- Grundlagen der numerischen Optimalsteuerung - Optimalsteuerung des Spritzgießprozesses	<b>09/2022 - 10/2022</b> 2x 4h Seminar & Workshop	 Theorie Praxis

## Zielgruppe:

Ingenieure aus den Bereichen F&E, Qualitätssicherung, Prozessoptimierung u.ä., insbesondere aus im Spritzgießverfahren produzierenden Unternehmen.

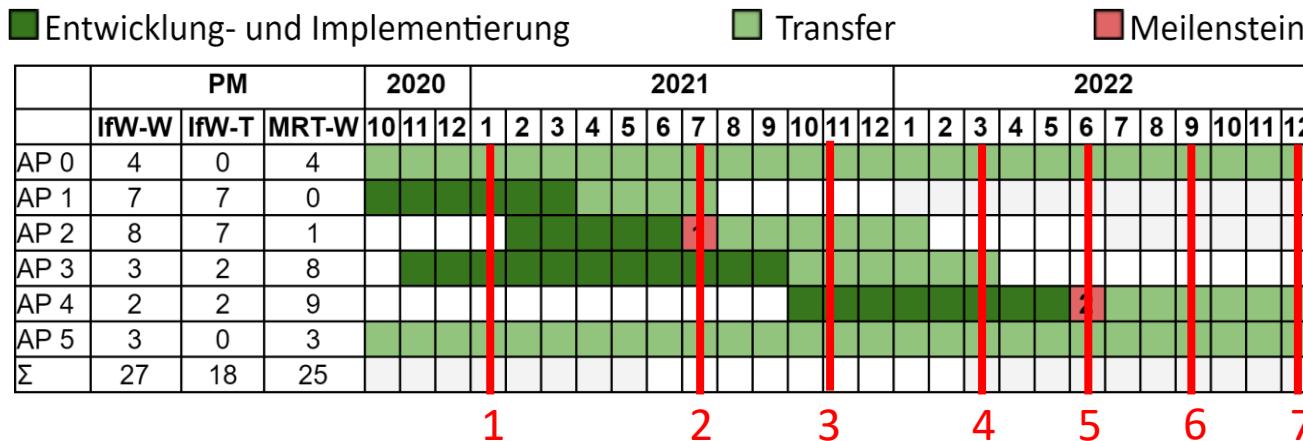
## Anmeldung & Teilnahme:

Die Teilnahme an Seminaren und Workshops ist kostenlos. Die Anmeldung erfolgt über die Projektwebseite (<http://www.uni-kassel.de/go/DIM/>). Sobald eine Anmeldung zu einer Veranstaltung möglich ist, wird dies über den Projektnewsletter (Anmeldung: [dim@uni-kassel.de](mailto:dim@uni-kassel.de)) und die öffentlichen Kanäle der Fachgebiete bekannt gegeben.

- Übersicht Projektstand DIM
- Vorstellung Demonstratoranlage
- Dynamisches Modellbildungskonzept
- Workshopreihe
- Abschlussdiskussion

## 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 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