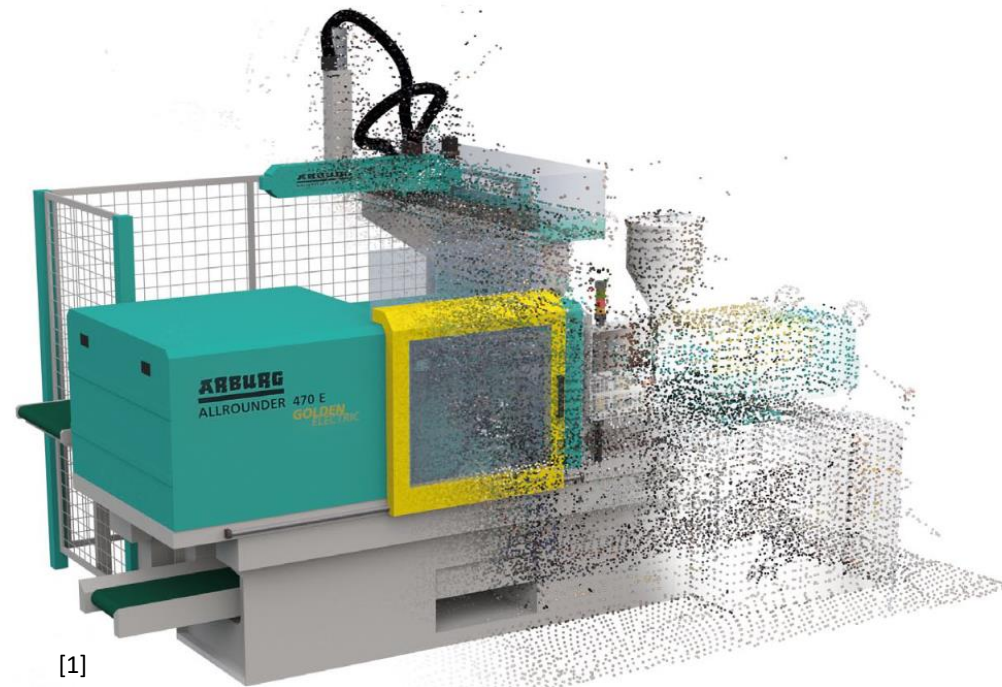


# Seminar- & Workshop-Reihe Digital Twin of Injection Molding (DIM)



## 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



+



Stefan Rosenbach



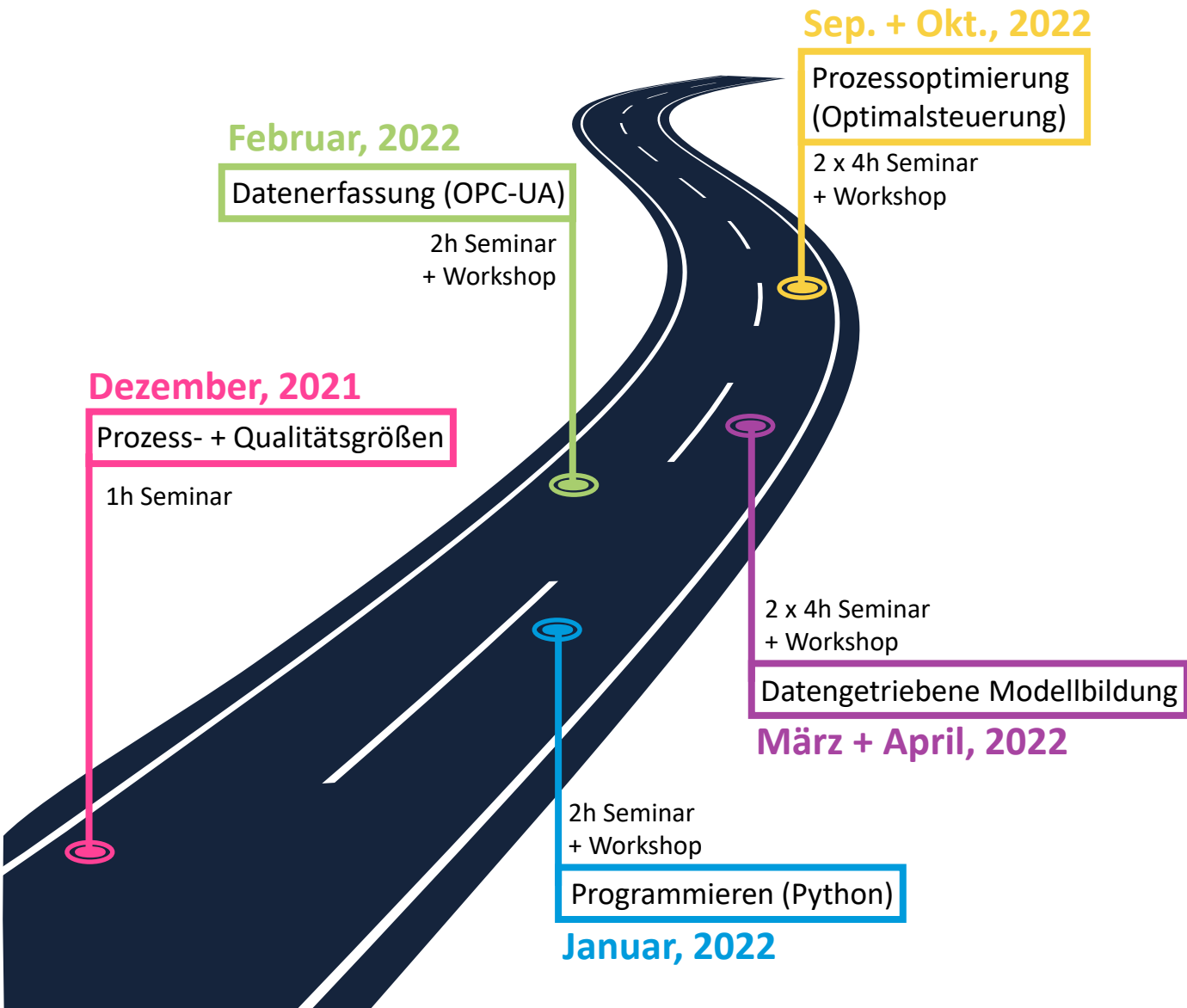
+

Studentische  
Hilfskräfte



## Kontakt:

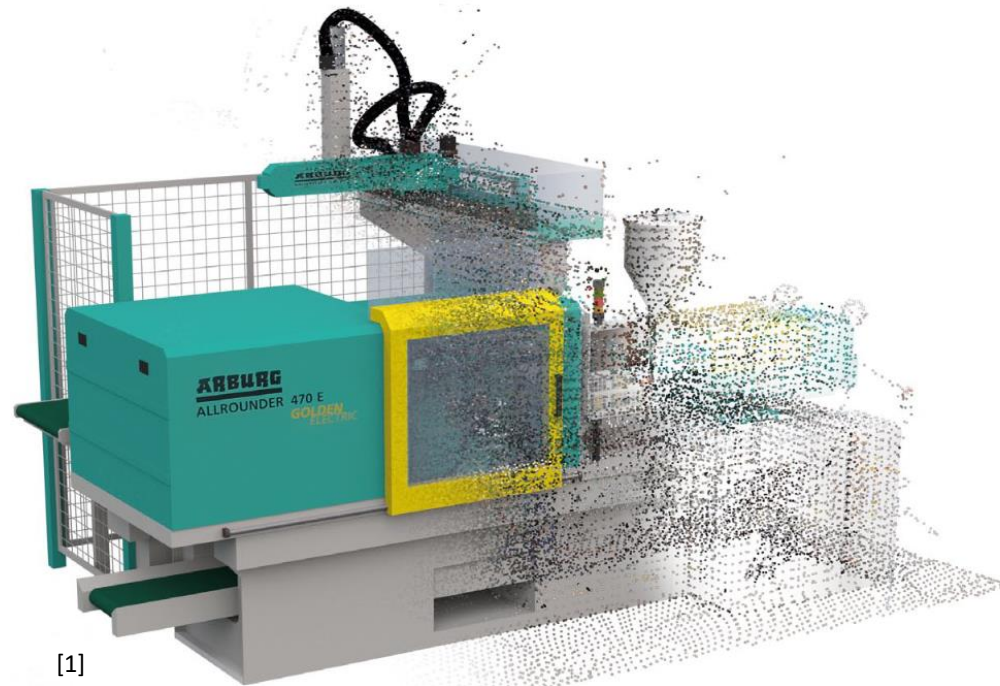
- [dim@uni-kassel.de](mailto:dim@uni-kassel.de)
- [www.uni-kassel.de/go/DIM](http://www.uni-kassel.de/go/DIM)



- **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

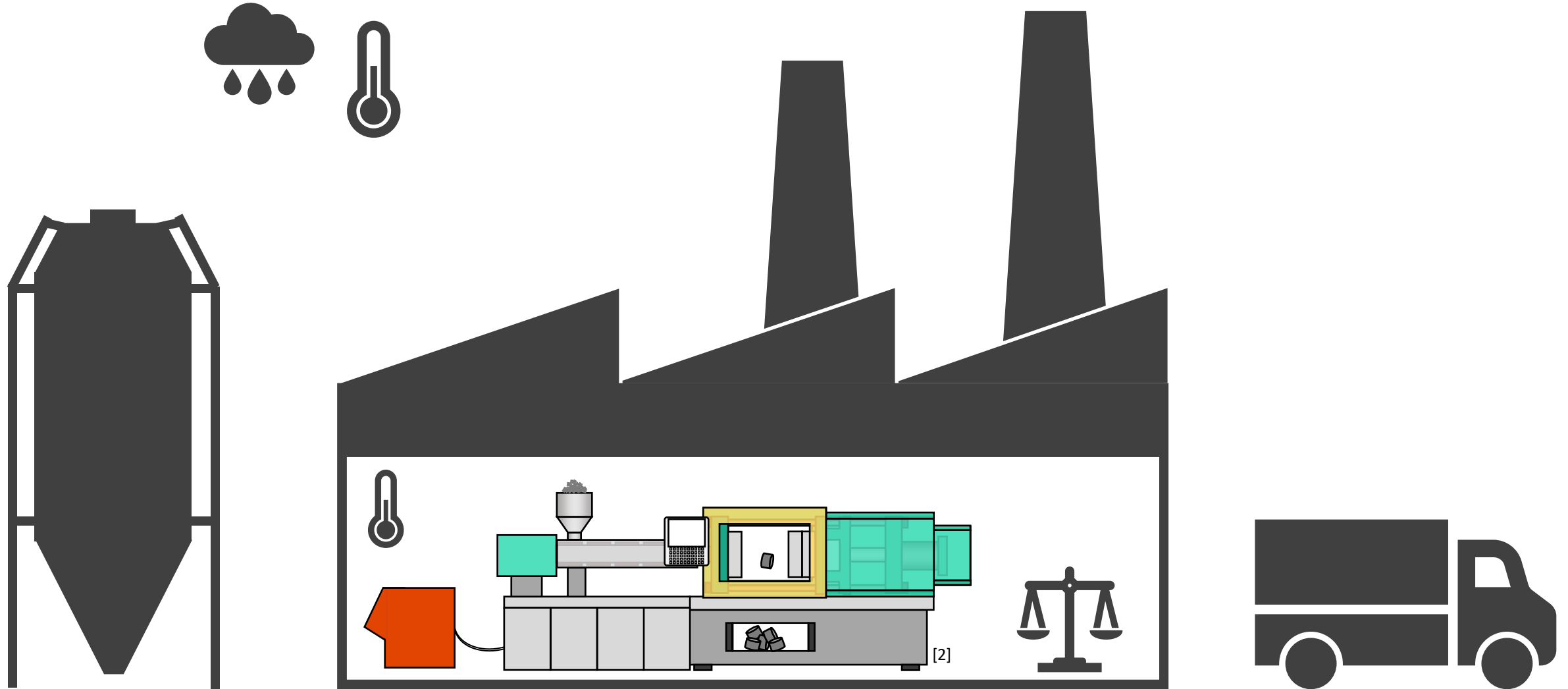
# Erfassung von Prozess- und Qualitätsgrößen

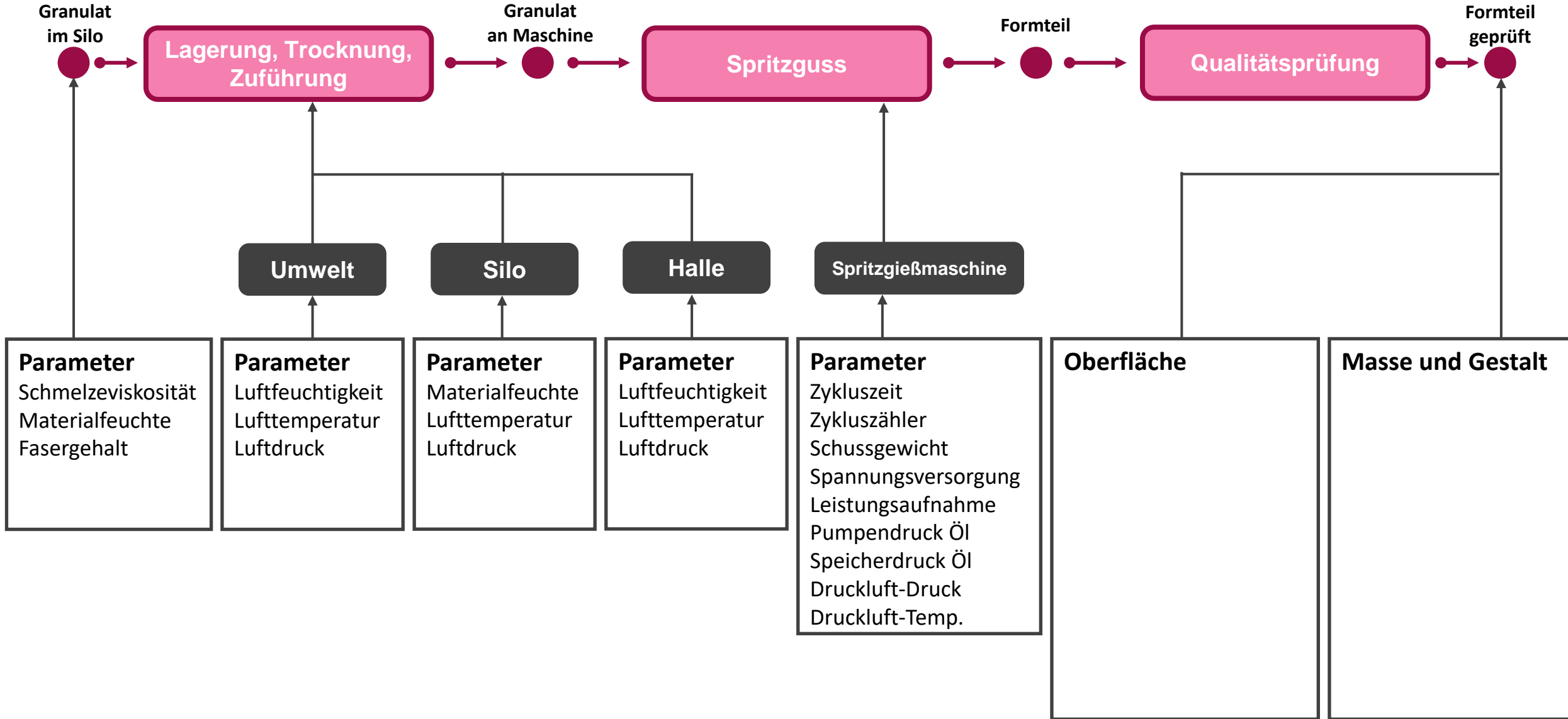
Seminar  
14.12.2021

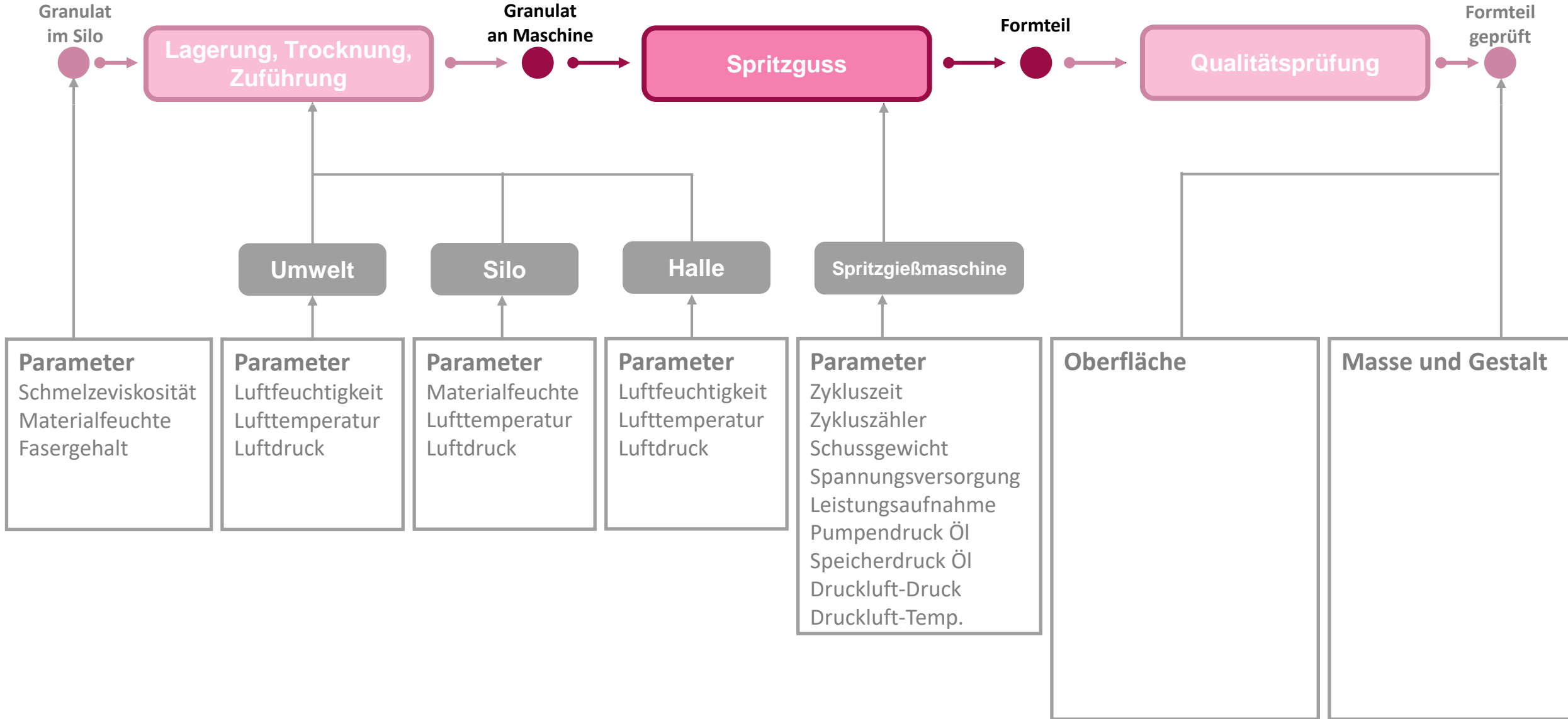


[1]

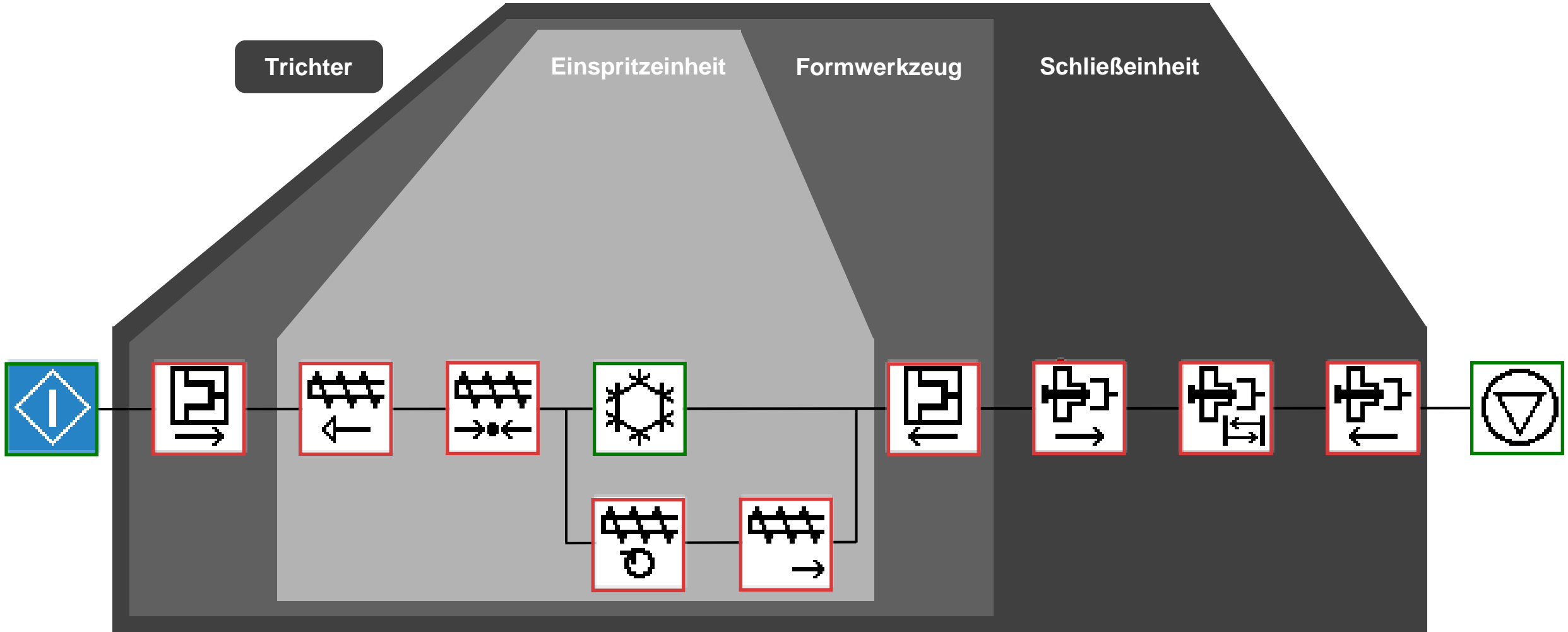
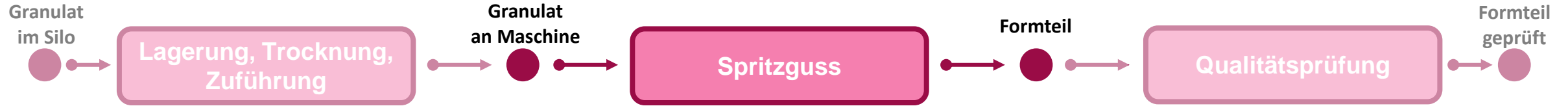
- **Prozessgrößen- und Sensorauswahl**
- **Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen**
- **Aufbau einer Qualitätsmesszelle**
- **Ausblick nächster Workshop**

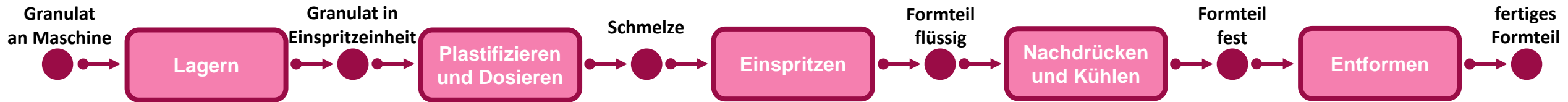








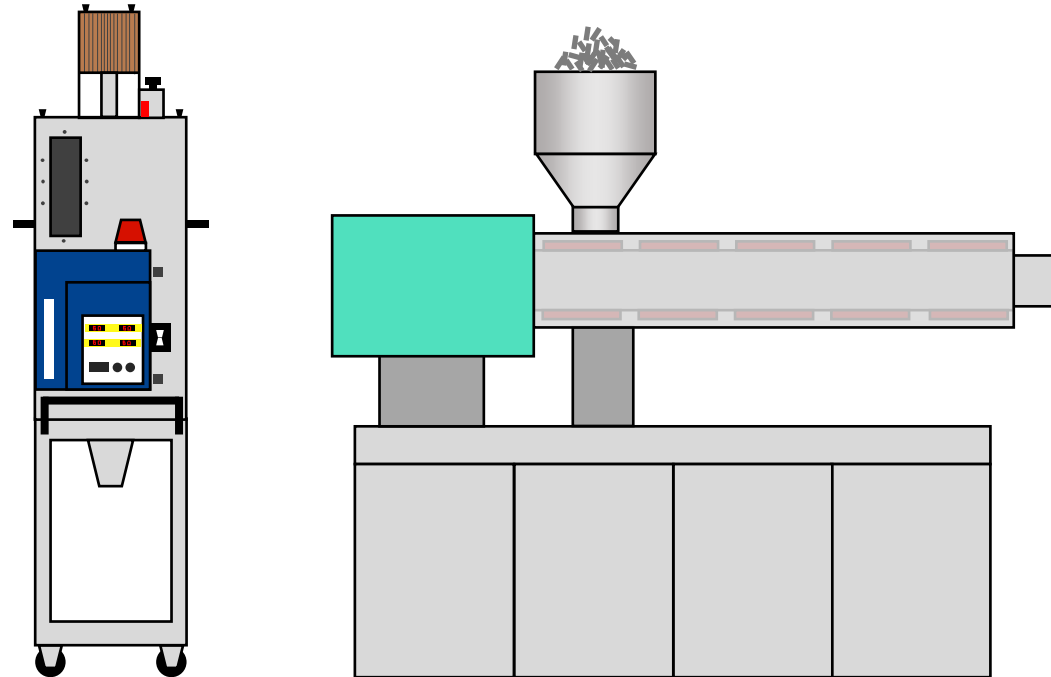






Trichter

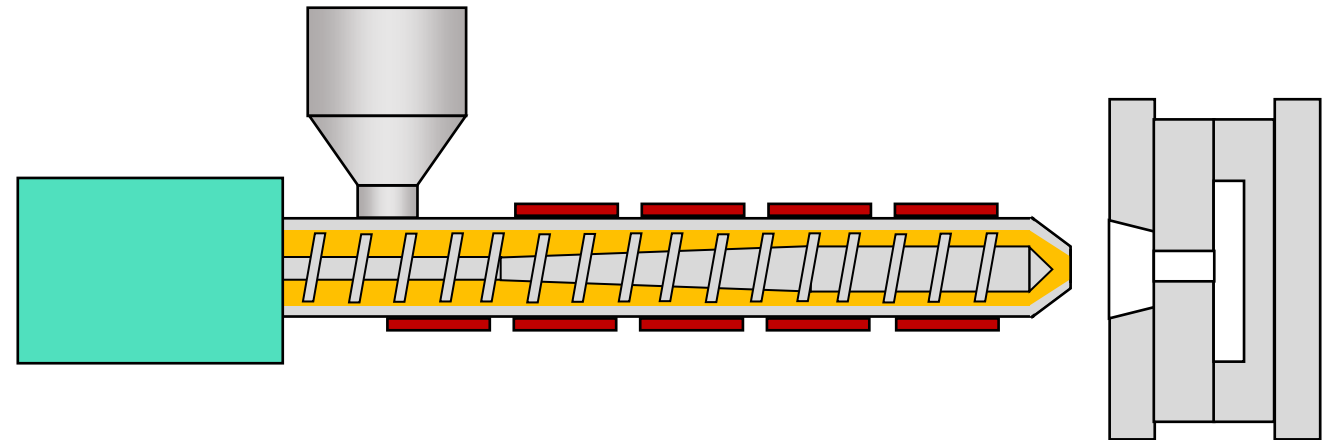
- Parameter**
- Mat.-Temperatur
  - Mat.-Restfeuchte
  - Mischungsverhältnis
  - Batch
  - Füllstand Granulat





**Einspritzeinheit**

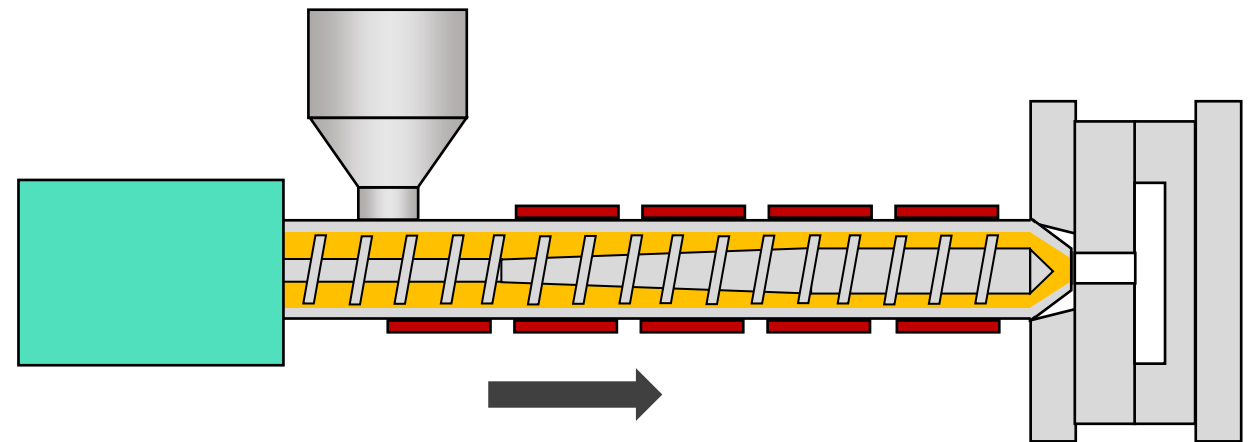
Parameter	
	<b>Zylinder</b>
	Temperatur Schmelze
	Viskosität Schmelze
	Zonentemperaturen
	Einschaltdauer Heizung
	<b>Düse</b>
	Temperatur
	Durchmesser
	Reduktionsfaktor





**Einspritzeinheit**

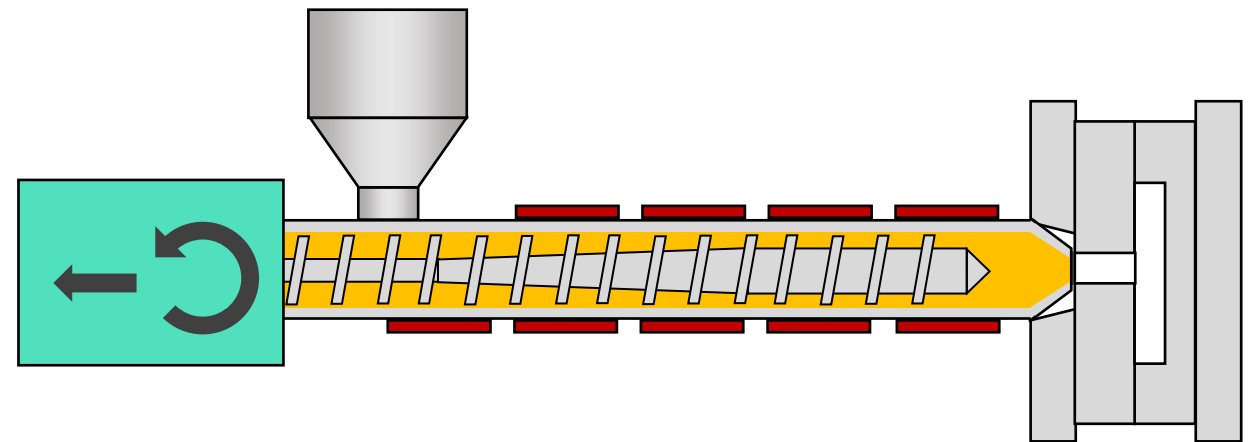
<b>Parameter</b>	<b>Zylinder</b>
Position	Temperatur Schmelze
Anpresskraft Düse	Viskosität Schmelze
	Zonentemperaturen
	Einschaltdauer Heizung
	<b>Düse</b>
	Temperatur
	Durchmesser
	Reduktionsfaktor

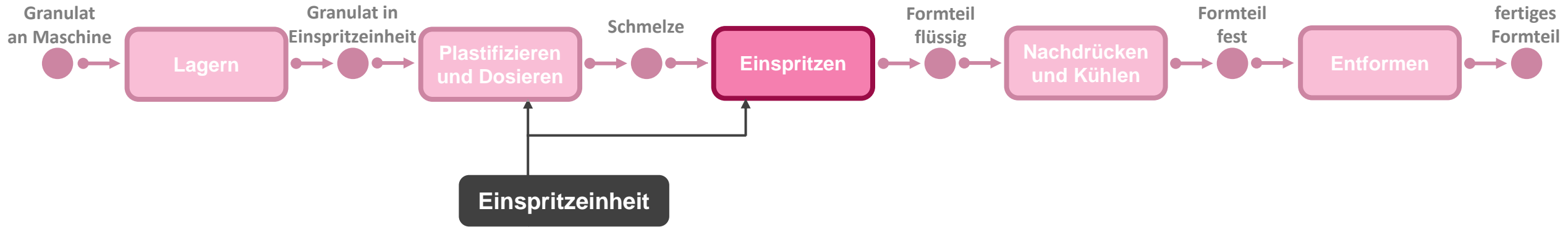




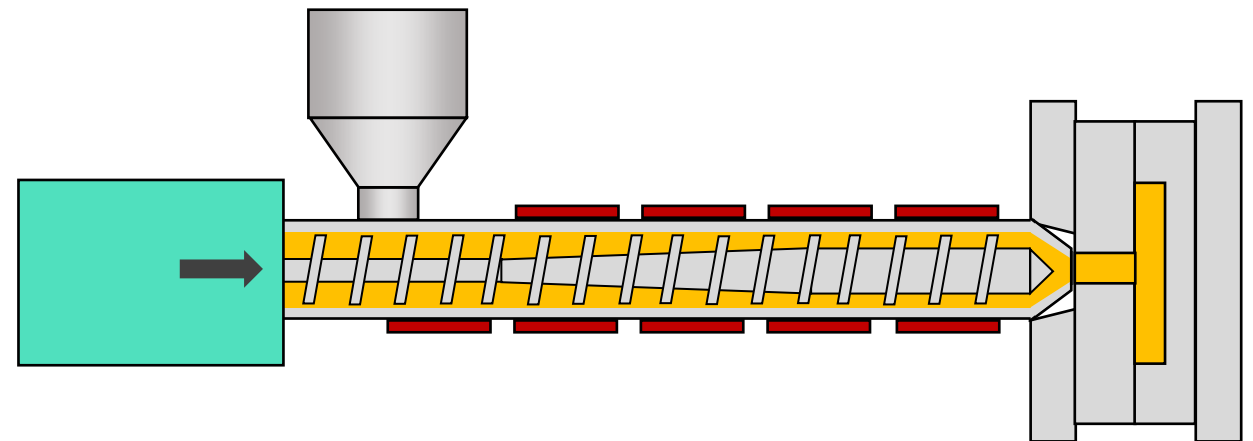
**Einspritzeinheit**

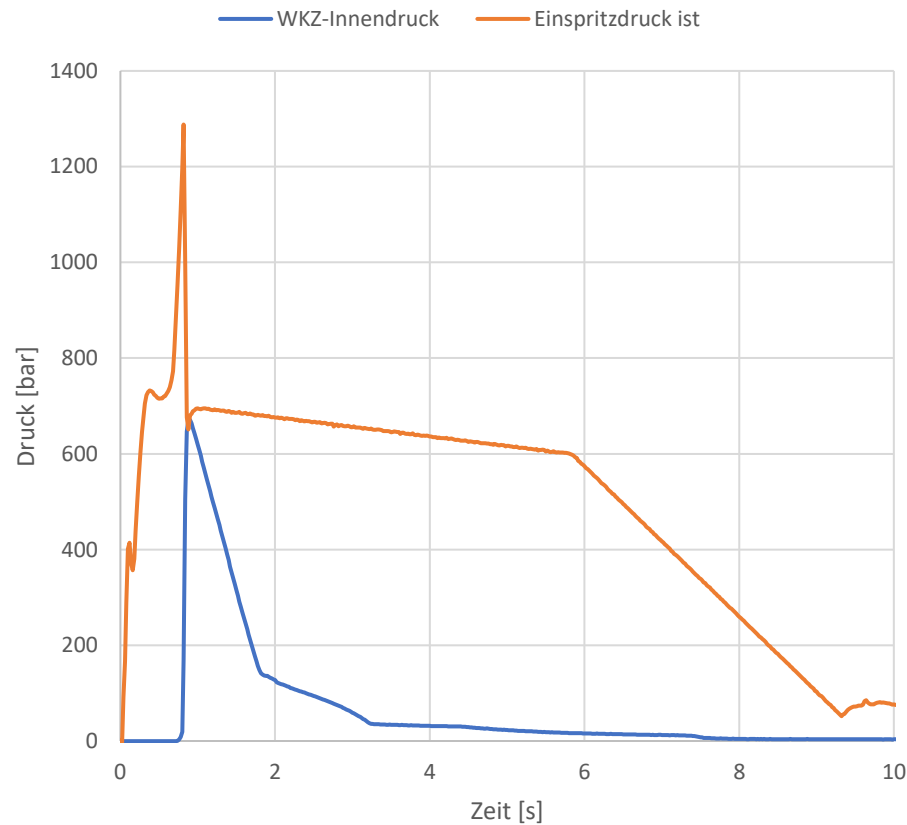
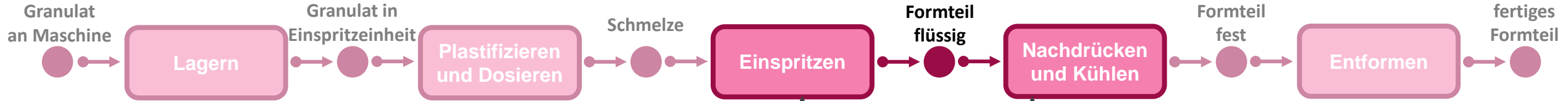
<b>Parameter</b>	<b>Zylinder</b>
Position	Temperatur Schmelze
Anpresskraft Düse	Viskosität Schmelze
Plastifizierzeit	Zonentemperaturen
Staudruck	Einschaltdauer Heizung
	<b>Düse</b>
	Temperatur
	Durchmesser
	Reduktionsfaktor
	<b>Schnecke</b>
	Position
	Drehmoment
	Drehzahl
	Leistungsaufnahme





<b>Parameter</b>	<b>Zylinder</b>
Position	Temperatur Schmelze
Anpresskraft Düse	Viskosität Schmelze
Plastifizierzeit	Zonentemperaturen
Staudruck	Einschaltdauer Heizung
Einspritzzeit	
Einspritzgeschwindigkeit	<b>Düse</b>
Einspritzdruck	Temperatur
	Durchmesser
	Reduktionsfaktor
	<b>Schnecke</b>
	Position
	Drehmoment
	Drehzahl
	Leistungsaufnahme

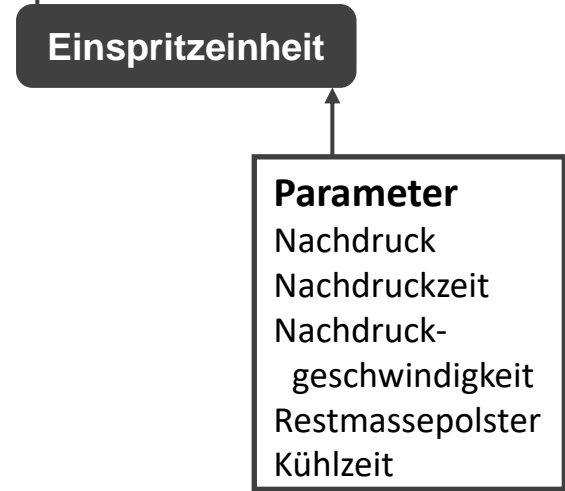
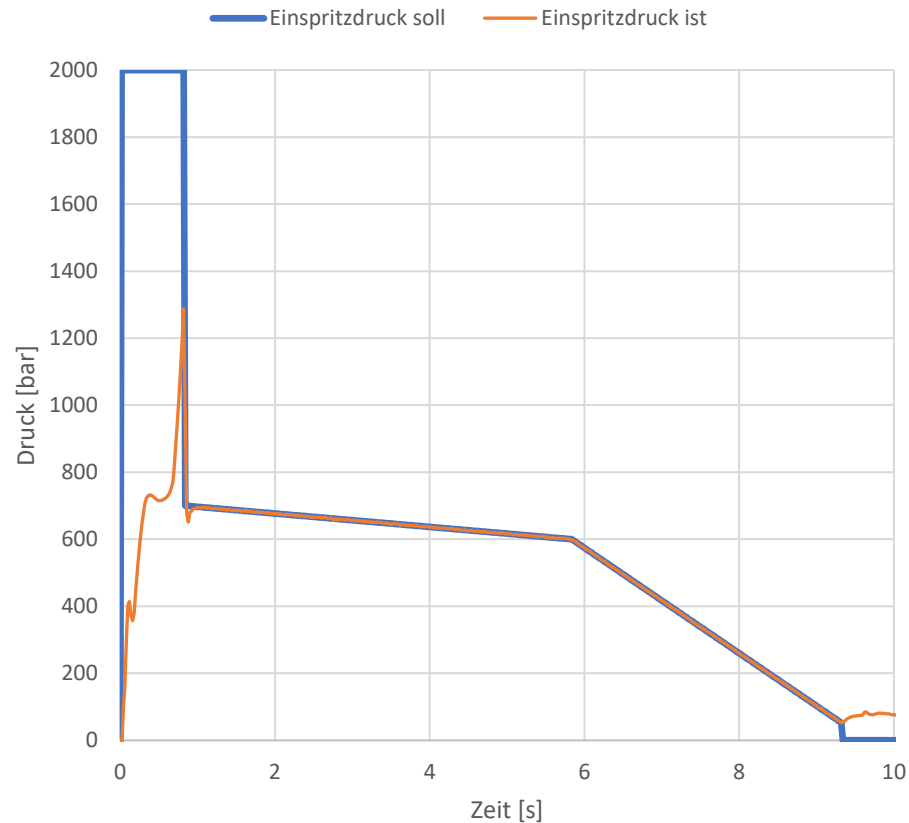


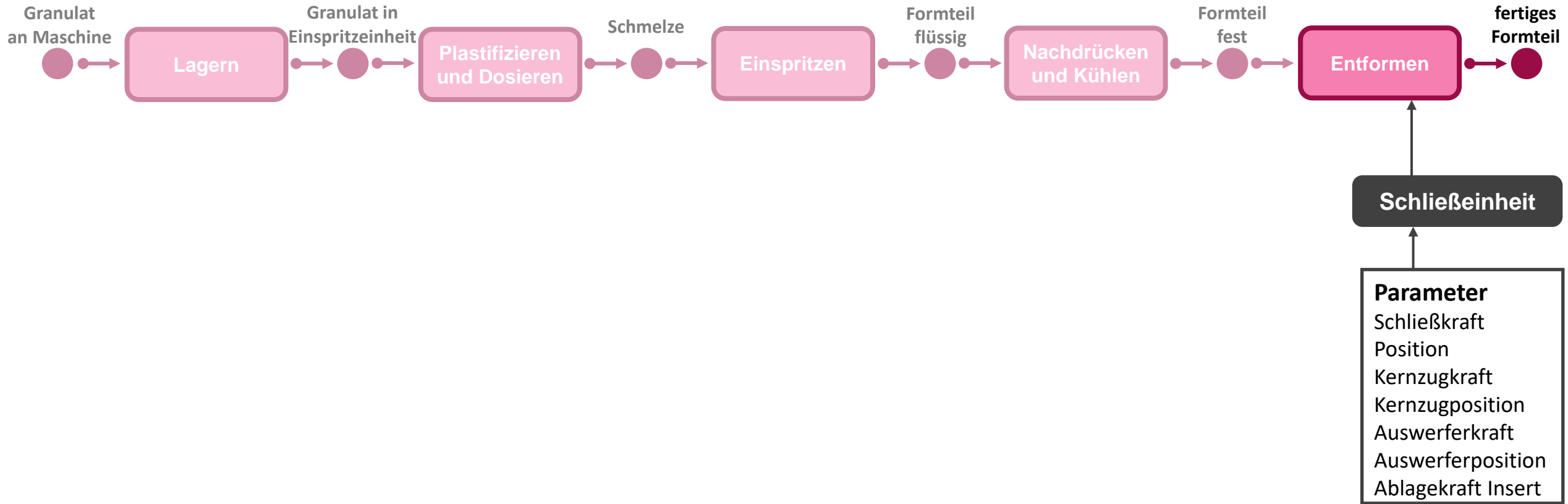


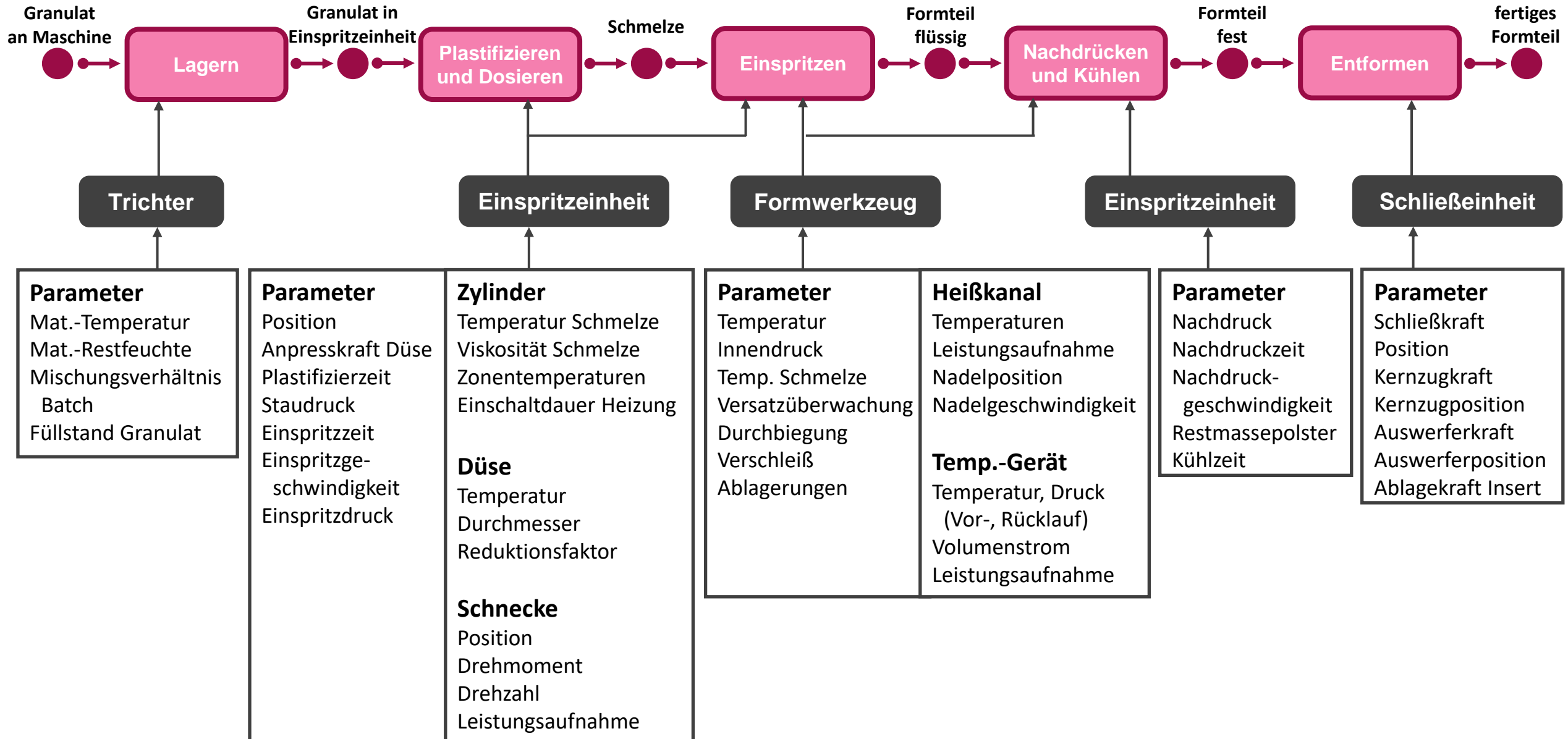
**Formwerkzeug**

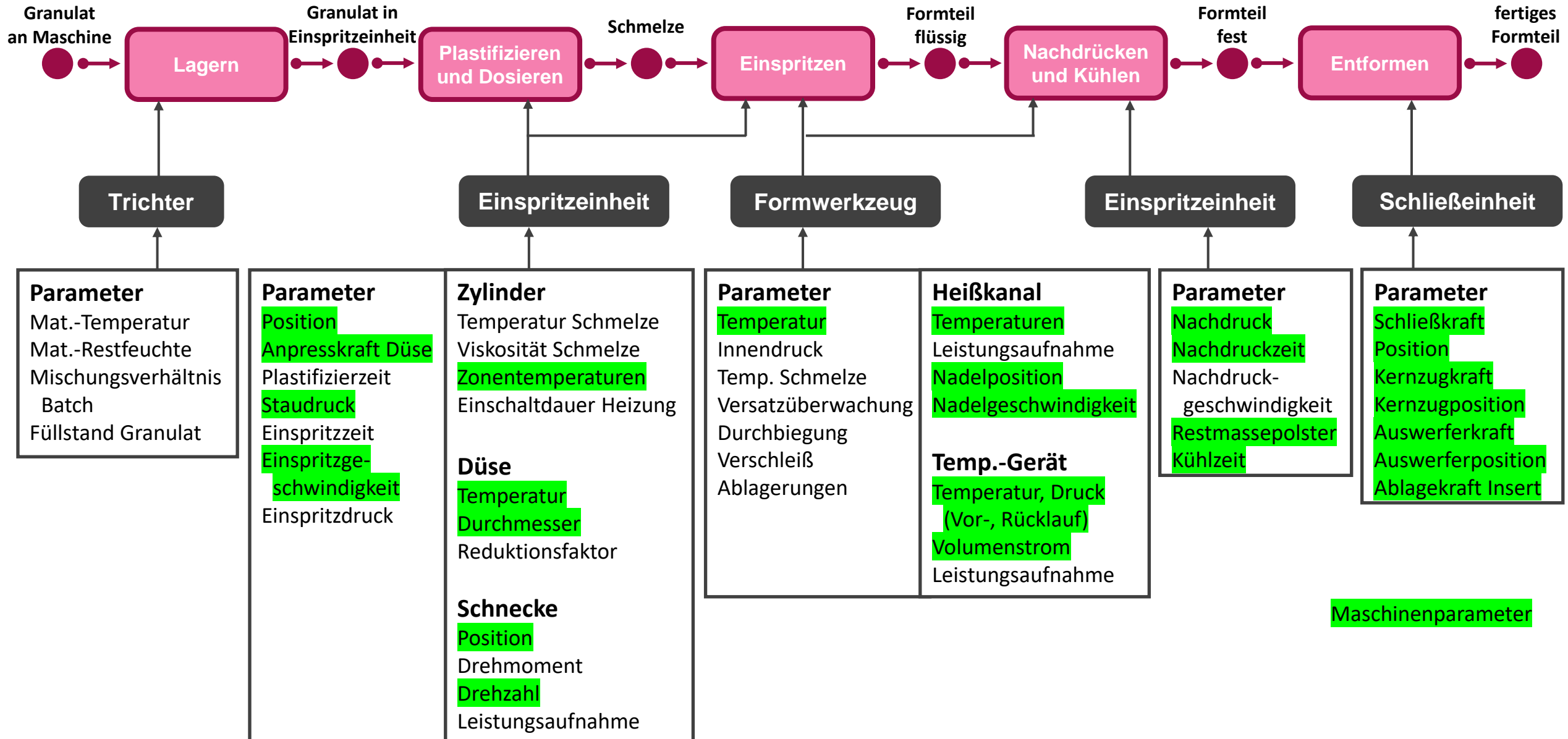
Parameter	Heißkanal
Temperatur	Temperaturen
Innendruck	Leistungsaufnahme
Temp. Schmelze	Nadelposition
Versatzüberwachung	Nadelgeschwindigkeit
Durchbiegung	
Verschleiß	
Ablagerungen	
	<b>Temp.-Gerät</b>
	Temperatur, Druck (Vor-, Rücklauf)
	Volumenstrom
	Leistungsaufnahme



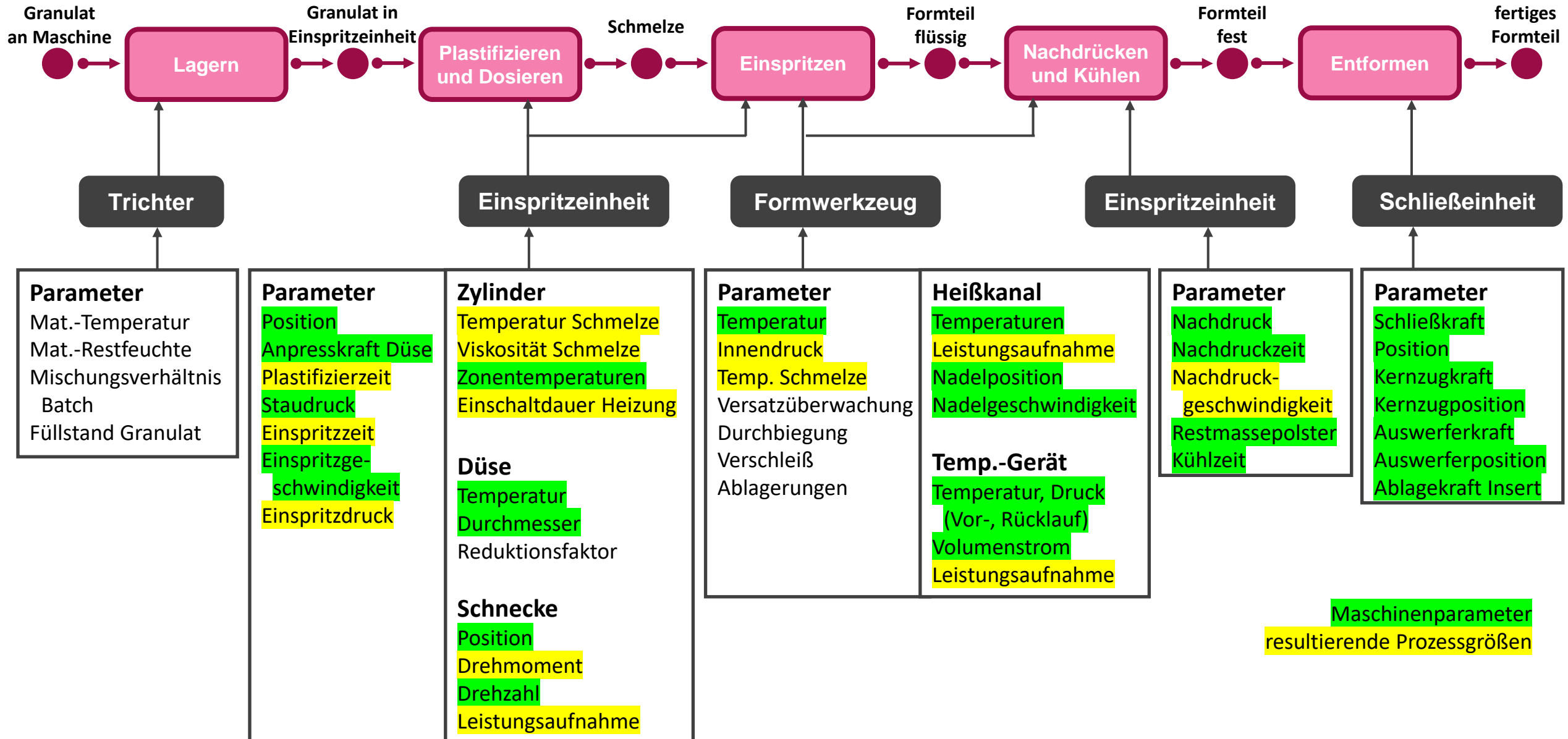




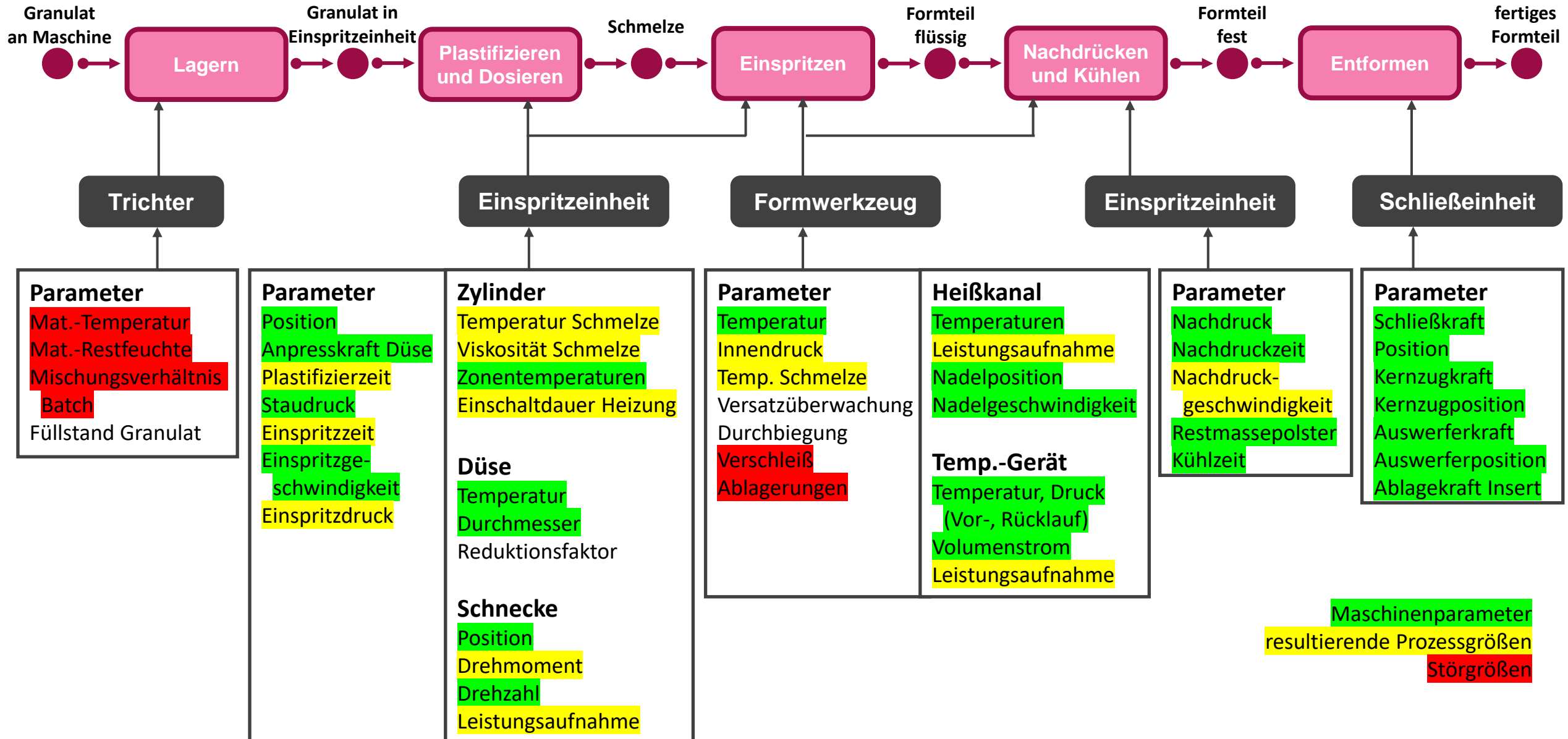


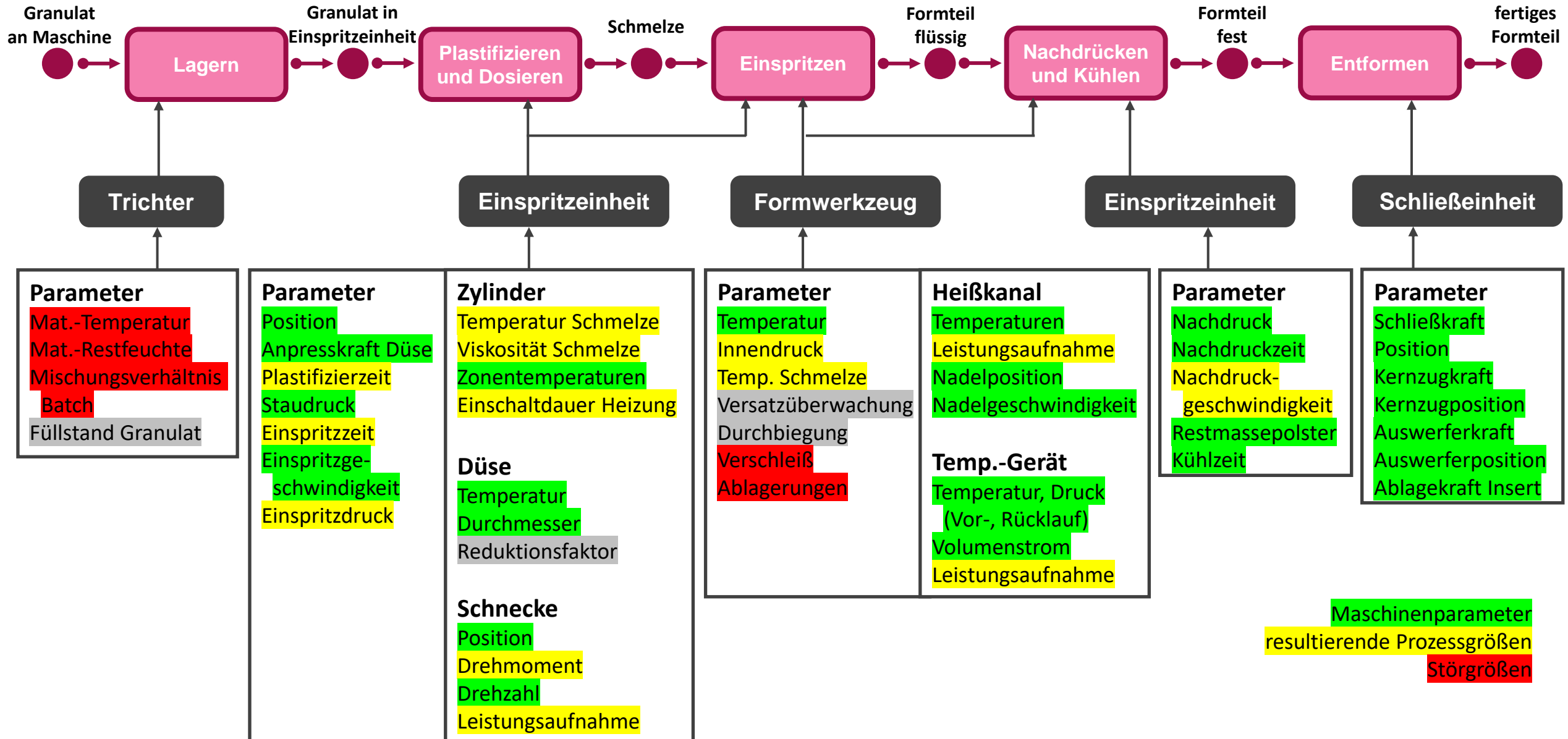


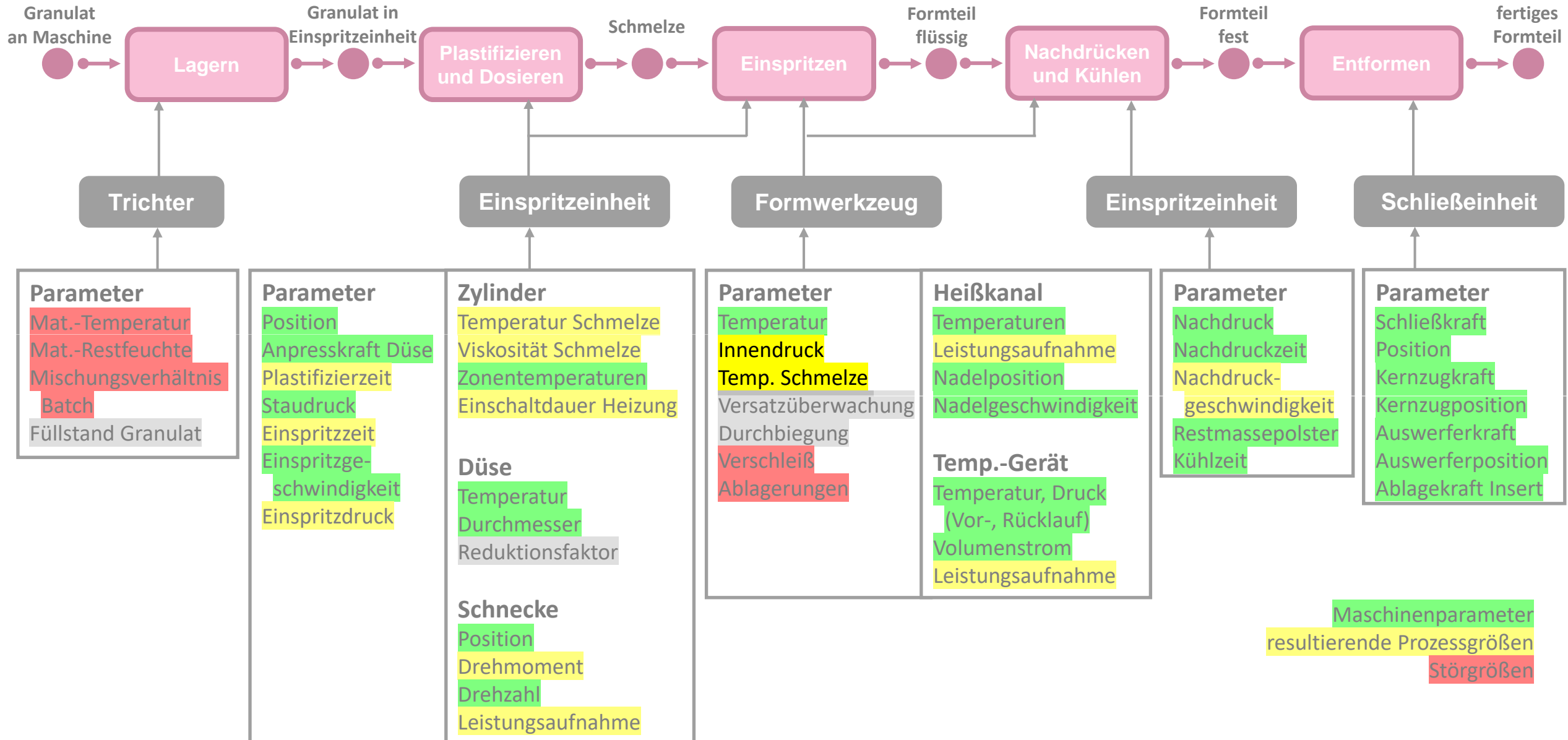
Maschinenparameter



Maschinenparameter  
resultierende Prozessgrößen





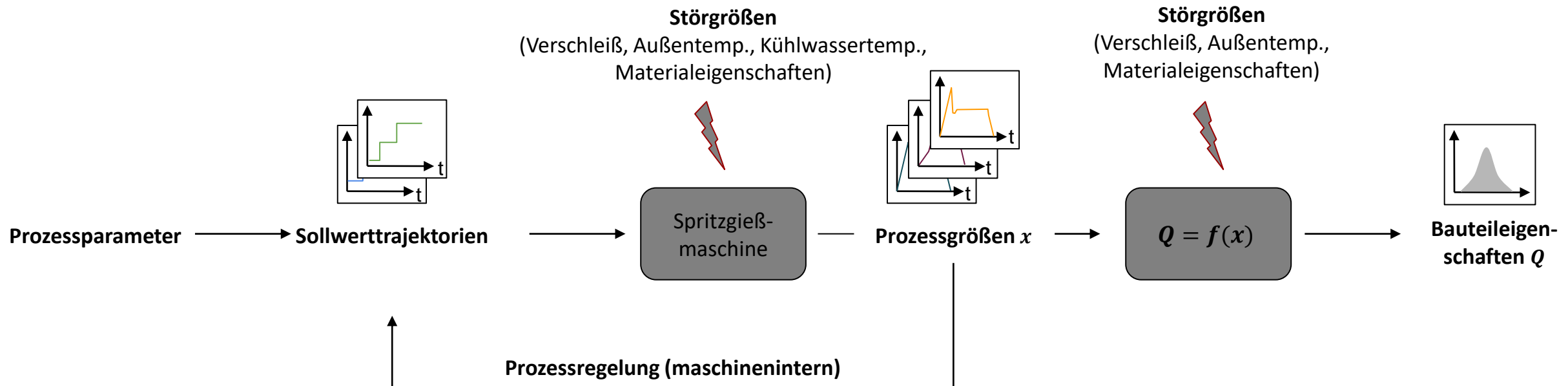
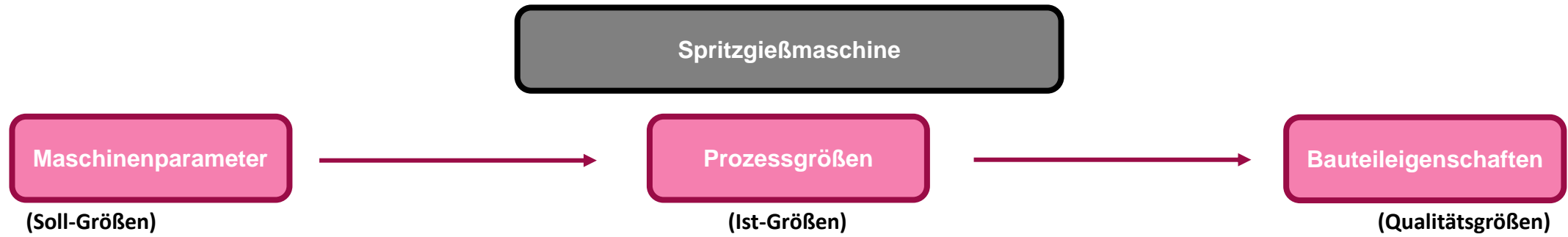




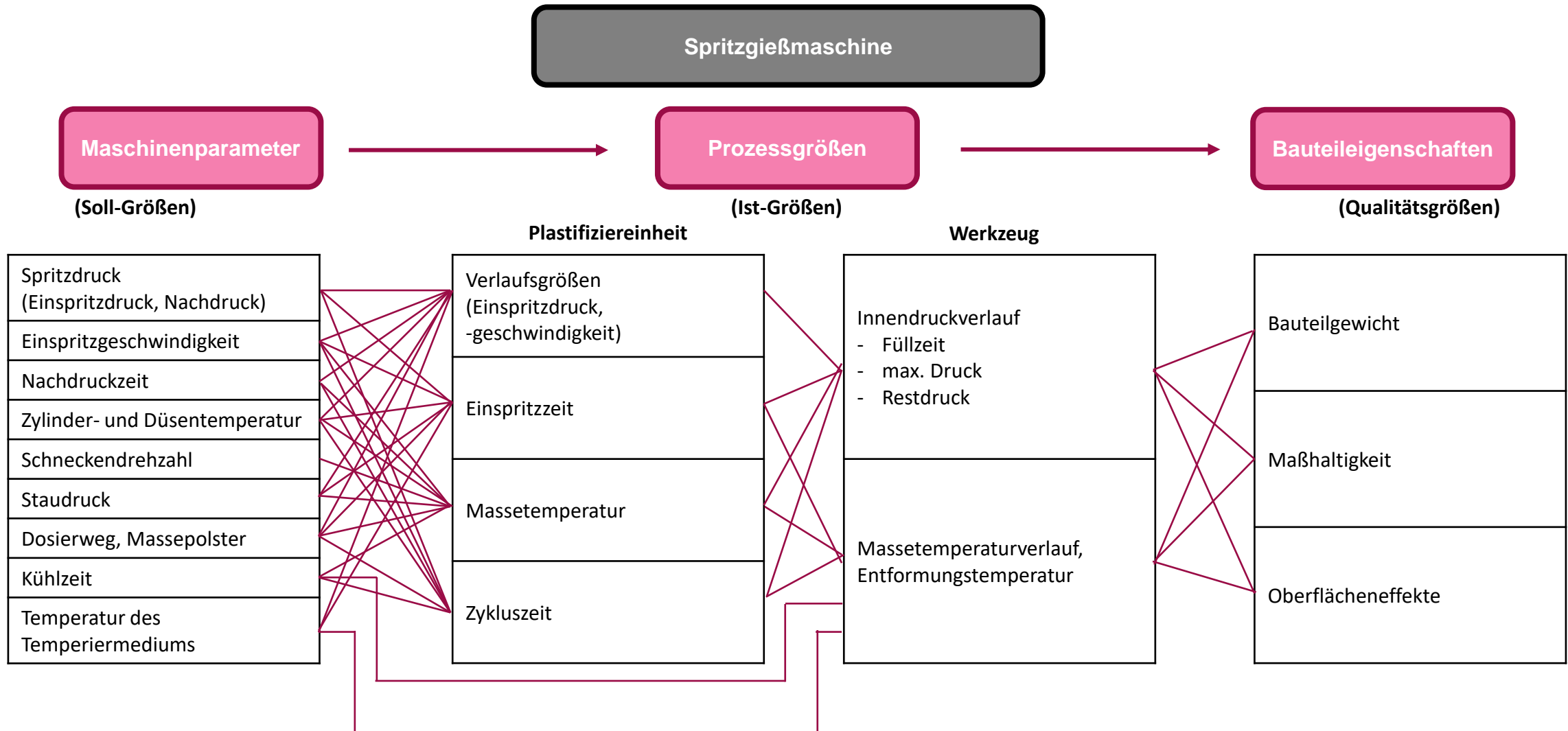
## Sensorik für Spritzgießwerkzeuge

- Bis heute werden Formteile häufig nach reiner Optik produziert (Erfahrungswerte des Einrichters).
- Insbesondere Sensoren zur Erfassung von Druck- und Temperaturverläufen in der Kavität liefern wertvolle Informationen über die Prozess- und Formteilqualität.
- Füllprozess kann sicher gesteuert, Nachdruck (Höhe, Dauer) optimiert und Entformungszeit ermittelt werden.
- Maschinenparameter und Störgrößen spiegeln sich in Prozessgrößen (Innendruck und Temperatur) wider.
- Prozessgrößen dienen als Qualitätsmerkmale für den Einspritzprozess.
  - Prozesskontrolle
  - Toleranzüberwachung
  - Aussortieren von Schlechtteilen
- Unterschiedliche Sensoren haben sich seit Jahren bewährt und die Investitionen amortisieren sich bereits nach kurzer Zeit.
- Für die Entwicklung eines digitalen Zwillings sind diese Sensoren unbedingt notwendig.

## Sensorik für Spritzgießwerkzeuge



## Sensorik für Spritzgießwerkzeuge



## Beispiel für die Modellbildung eines Digitalen Zwillings

### Prozessmodell

#### Eingangsgrößen

Spritzdruck (Einspritzdruck, Nachdruck)
Einspritzgeschwindigkeit
Nachdruckzeit
Zylinder- und Düsentemperatur
Schneckendrehzahl
Staudruck
Dosierweg, Massepolster
Kühlzeit
Temperatur des Temperiermediums

#### Zielgrößen

Verlaufsgrößen (Einspritzdruck, -geschwindigkeit)
Einspritzzeit
Massetemperatur
Zykluszeit

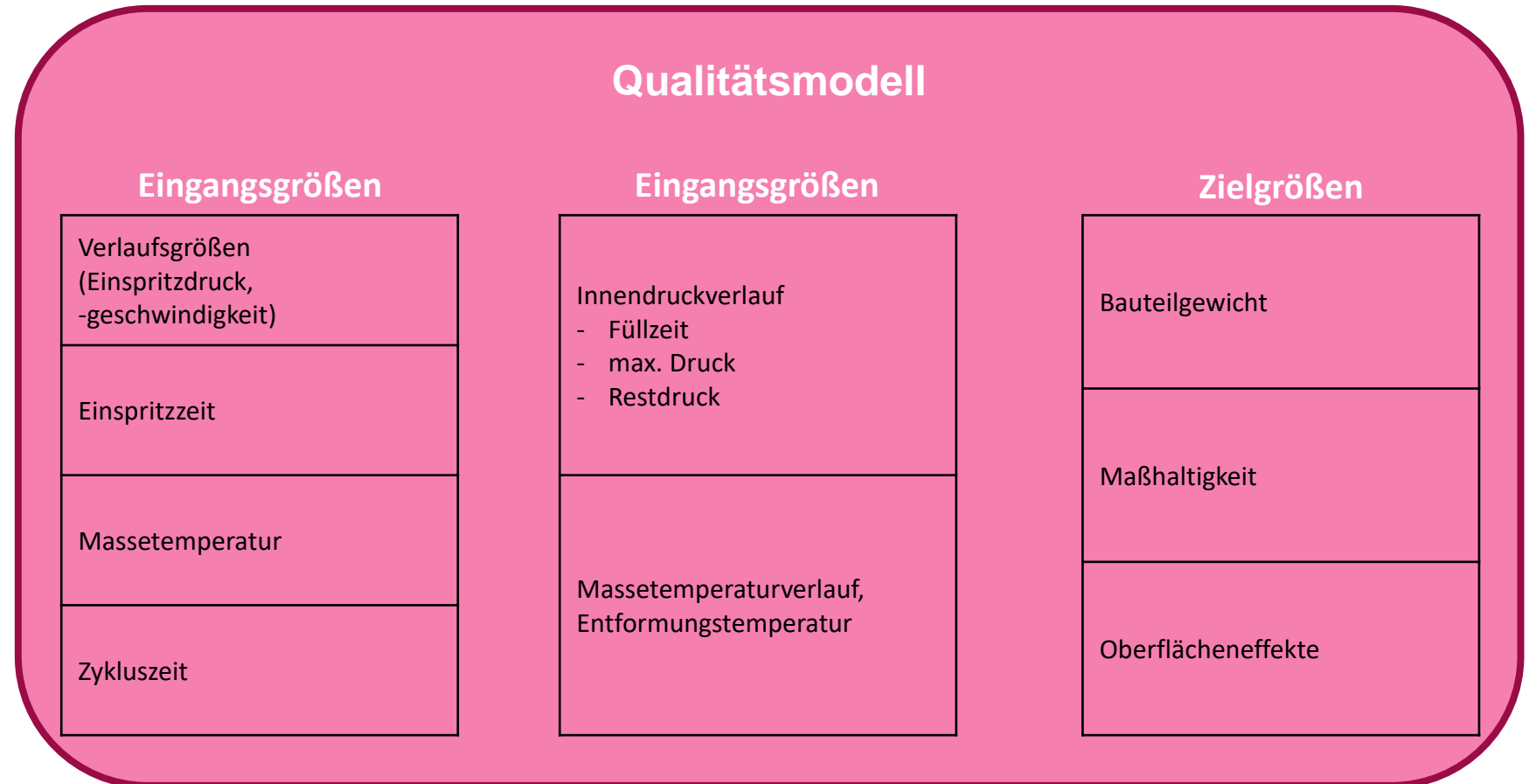
#### Zielgrößen

Innendruckverlauf - Füllzeit - max. Druck - Restdruck
Massetemperaturverlauf, Entformungstemperatur

Bauteilgewicht
Maßhaltigkeit
Oberflächeneffekte

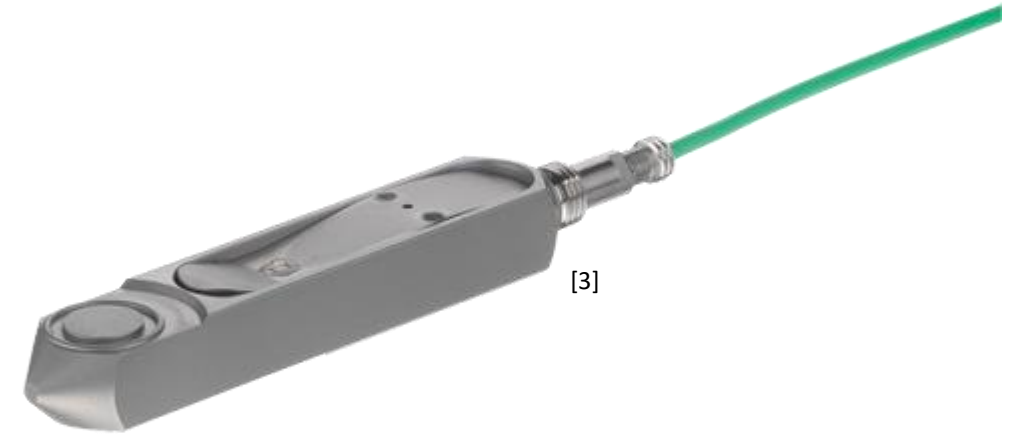
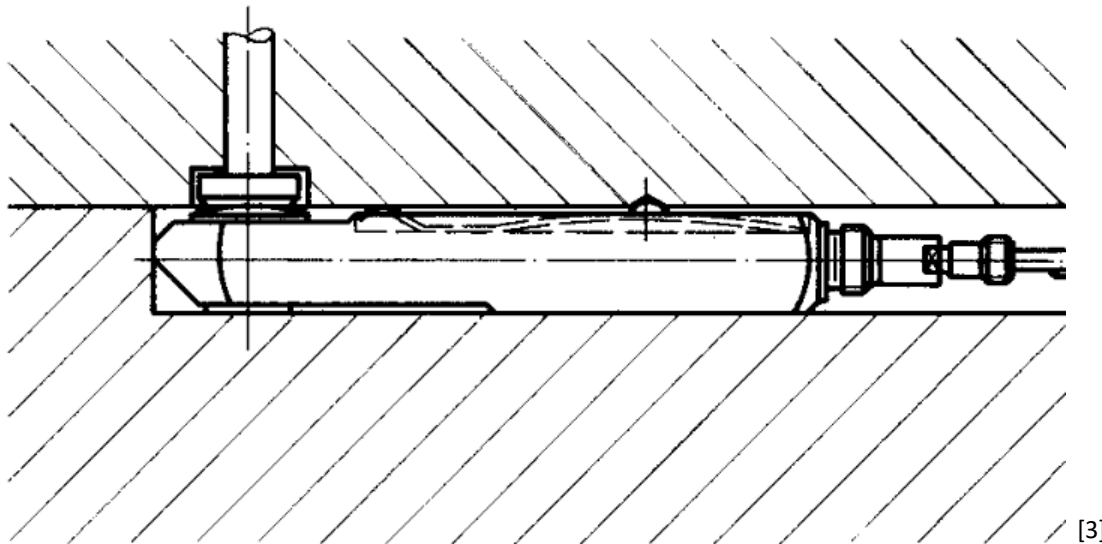
## Beispiel für die Modellbildung eines Digitalen Zwillings

Spritzdruck (Einspritzdruck, Nachdruck)
Einspritzgeschwindigkeit
Nachdruckzeit
Zylinder- und Düsentemperatur
Schneckendrehzahl
Staudruck
Dosierweg, Massepolster
Kühlzeit
Temperatur des Temperiermediums



## Druckerfassung in Werkzeugkavitäten

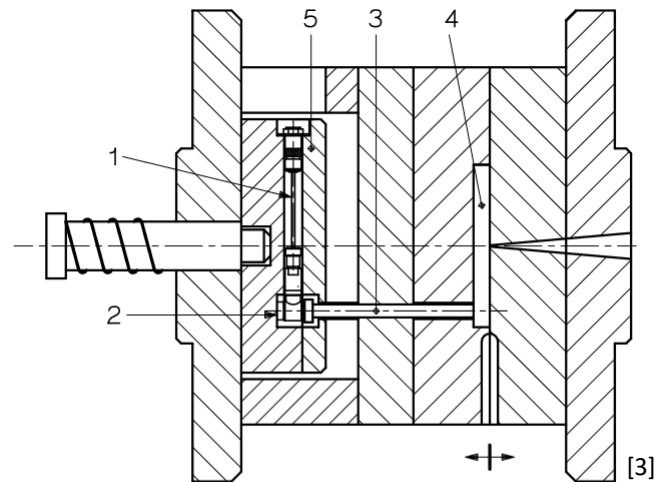
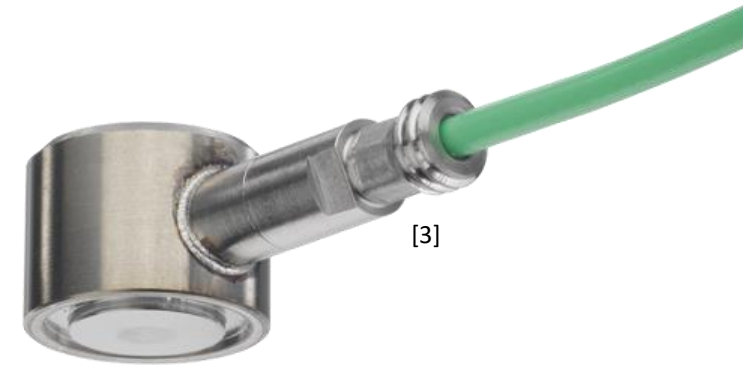
- Druckmessung mit indirektem Piezo-Messaufnehmer (Messlasche)



- Kostengünstige Ausstattung, insbesondere bei nachträglichen Einbau in Spritzgießwerkzeug
- Wird unter einem Auswerferstift oder unter separatem Messstift platziert
- Übliche Baugrößen: 6 und 10 mm Breite (Kistler)
- Können einfach aus dem Werkzeug entnommen werden und durch Blindstück ersetzt werden.

## Druckerfassung in Werkzeugkavitäten

- Druckmessung mit indirektem Piezo-Messaufnehmer (Messlasche)
- Miniaturkraftaufnehmer in piezoelektrischer Ausführung

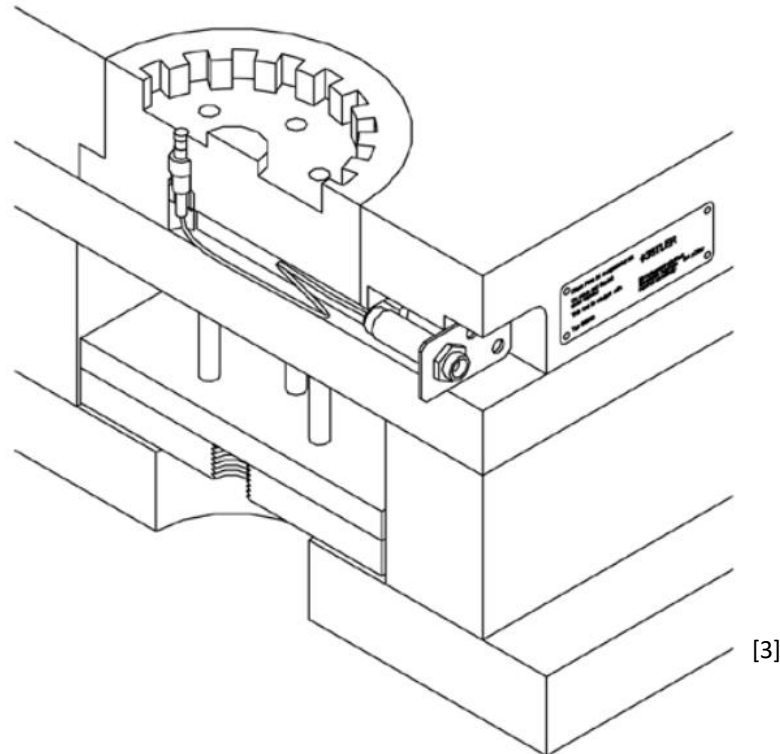
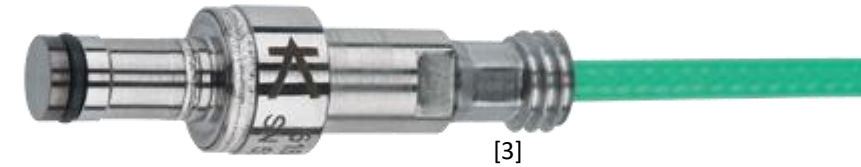


- |                  |                   |
|------------------|-------------------|
| 1 Kraftsensor    | 4 Kavität         |
| 2 Druckscheibe   | 5 Auswerferplatte |
| 3 Auswerferstift |                   |

- Kommt zum Einsatz, wenn aus Platzgründen kein Sensor in der Kavität verbaut werden kann und der Einbau einer Messlasche nicht möglich ist
- Wird unter einem Auswerferstift oder unter separatem Messstift platziert
- Übliche Baugrößen:  $\varnothing 3,5$ ,  $\varnothing 6$  und  $\varnothing 12,5$  mm (Kistler)
- Direkter Aus-/Einbau wie bei Messlaschen nicht einfach möglich

## Druckerfassung in Werkzeugkavitäten

- Druckmessung mit indirektem Piezo-Messaufnehmer (Messflasche)
- Miniaturkraftaufnehmer in piezoelektrischer Ausführung
- Druckmessung mit piezoelektrischem direktem Druckmessfühler

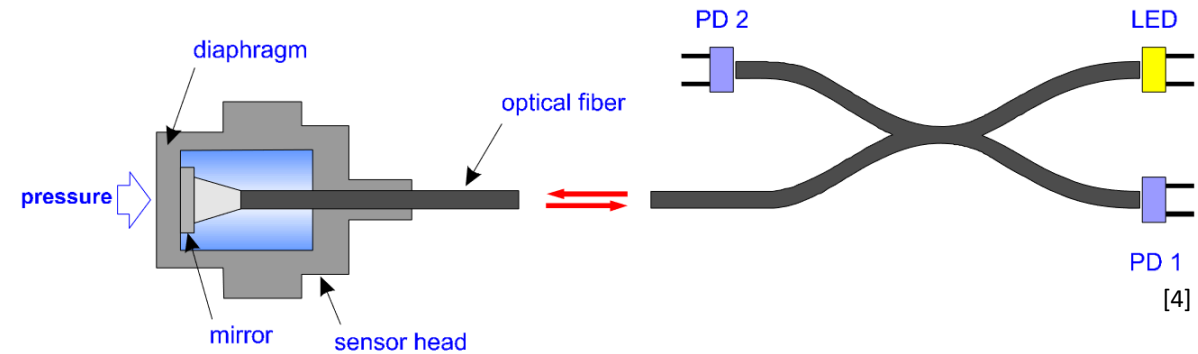


- Wird direkt in das Werkzeug eingebaut
- Messfühler kommt in der Kavität direkt mit dem Massedruck in Berührung
- Keine Übertragungsverfälschung (Verspannung, Wärmeausdehnung oder Reibung)
- Wird unter einem Auswerferstift oder unter separatem Messstift platziert
- Übliche Baugrößen:  $\varnothing 1$ ,  $\varnothing 2,5$ ,  $\varnothing 4$  und  $\varnothing 6$  mm (Kistler)
- Sensorfront häufig bearbeitbar



## Druckerfassung in Werkzeugkavitäten

- Druckmessung mit indirektem Piezo-Messaufnehmer (Messflasche)
- Miniaturkraftaufnehmer in piezoelektrischer Ausführung
- Druckmessung mit piezoelektrischem direktem Druckmessfühler
- Faseroptische Drucksensorentchnik



MESSTECHNIK GMBH

Fiber Optical Sensor

- Quarzkristall-Drucksensor zum Messen dynamischer und quasistatischer Drücke
- Direkter Einbau im Werkzeug (Kavität)
- Licht einer Infrarot-LED wird durch Lichtleiter eingekoppelt und dessen Intensität gemessen
- Stellung des Spiegels ändert sich in Abhängigkeit des äußeren Drucks (wenige  $\mu\text{m}$ )
- Intensität des reflektierten Lichts wird mit Ausgangsintensität verglichen (Quotient bildet Maß für den anliegenden Druck)

## Temperaturerfassung in Werkzeugkavitäten

- Temperaturerfassung mit Thermoelementfühlern



Typ 6193B...  
(ø1 mm)

Typ 6195B...  
(ø2,5 mm)

Typ 6194B...  
(ø2,5 mm)

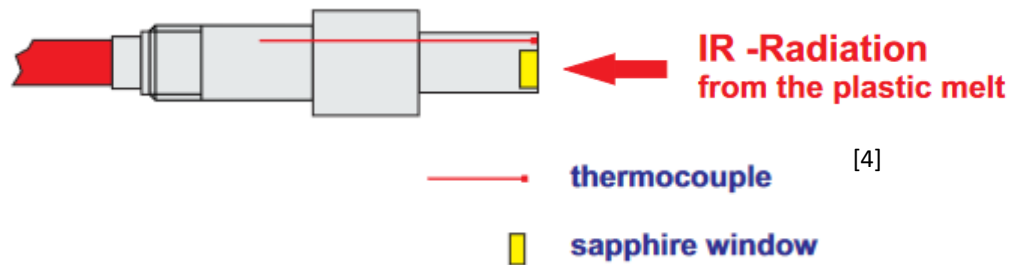
Typ 6192B...  
(ø4 mm)

[3]

- Messprinzip basiert auf thermoelektrischem Effekt
- Direkter Einbau im Werkzeug (Kavität)
- Baugleich zu direktmessenden Drucksensoren erhältlich
- Kleine Durchmesser erhöhen Messgeschwindigkeit
- Gemessen wird die Kontakttemperatur (nicht die Schmelztemperatur)

## Temperaturerfassung in Werkzeugkavitäten

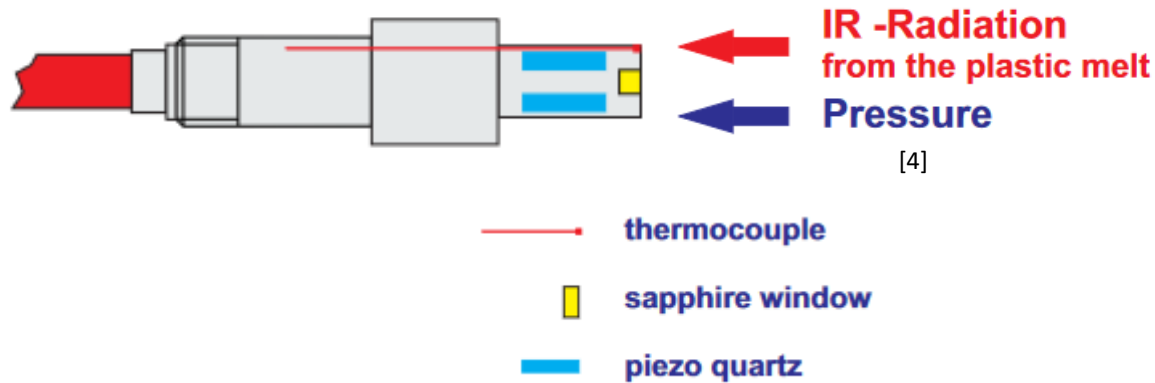
- Temperaturerfassung mit Thermoelementfühlern
- Temperaturmessung mit Infrarot-Werkzeugthermometern



- Momentan die schnellste und genaueste Temperaturmessung für Spritzgießprozesse
- Sensor erfasst durch ein Saphirfenster die Infrarotstrahlung der Kunststoffschmelze
- Kann zur temperaturgesteuerten Werkzeugöffnung eingesetzt werden
- Durch einen integrierten Thermofühler kann simultan die Kontakttemperatur erfasst werden

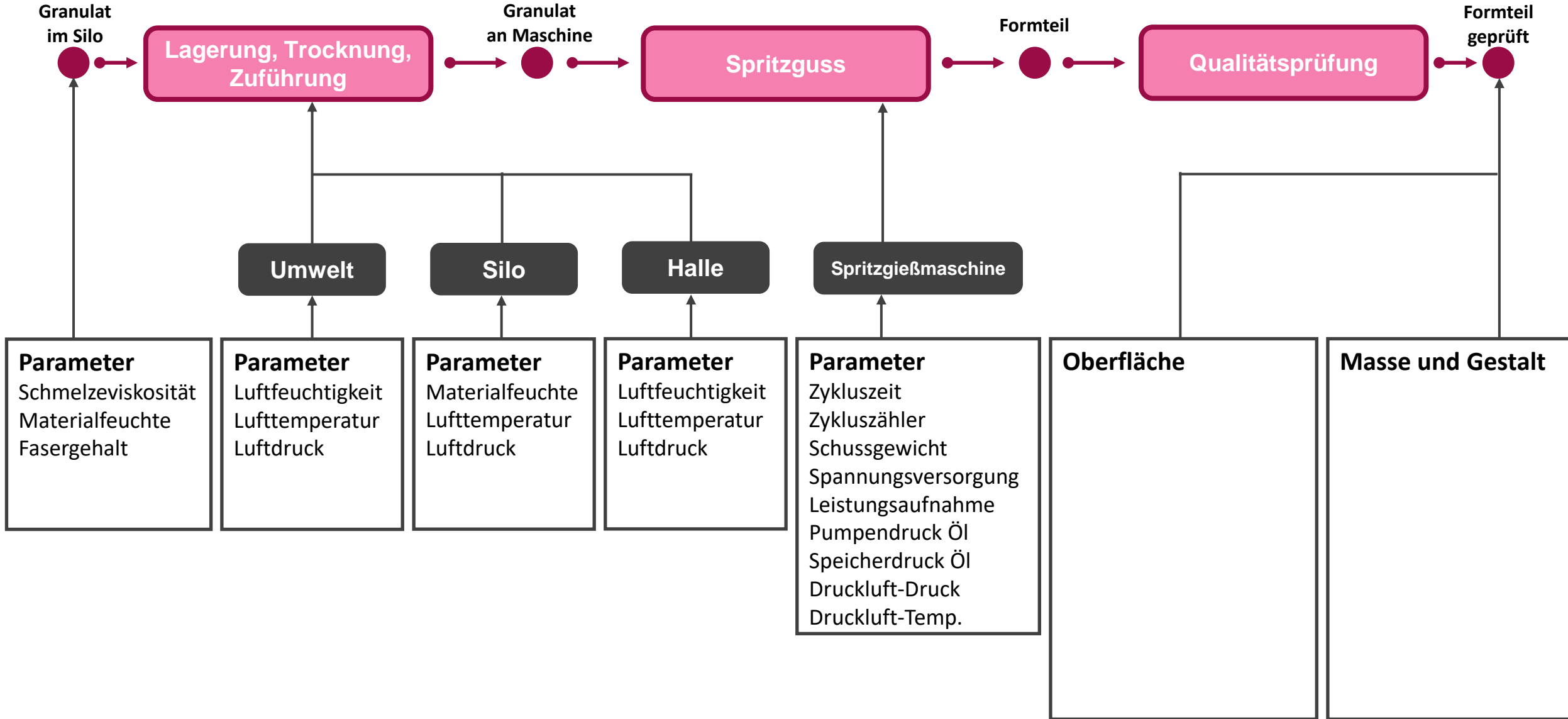
## Temperaturerfassung in Werkzeugkavitäten

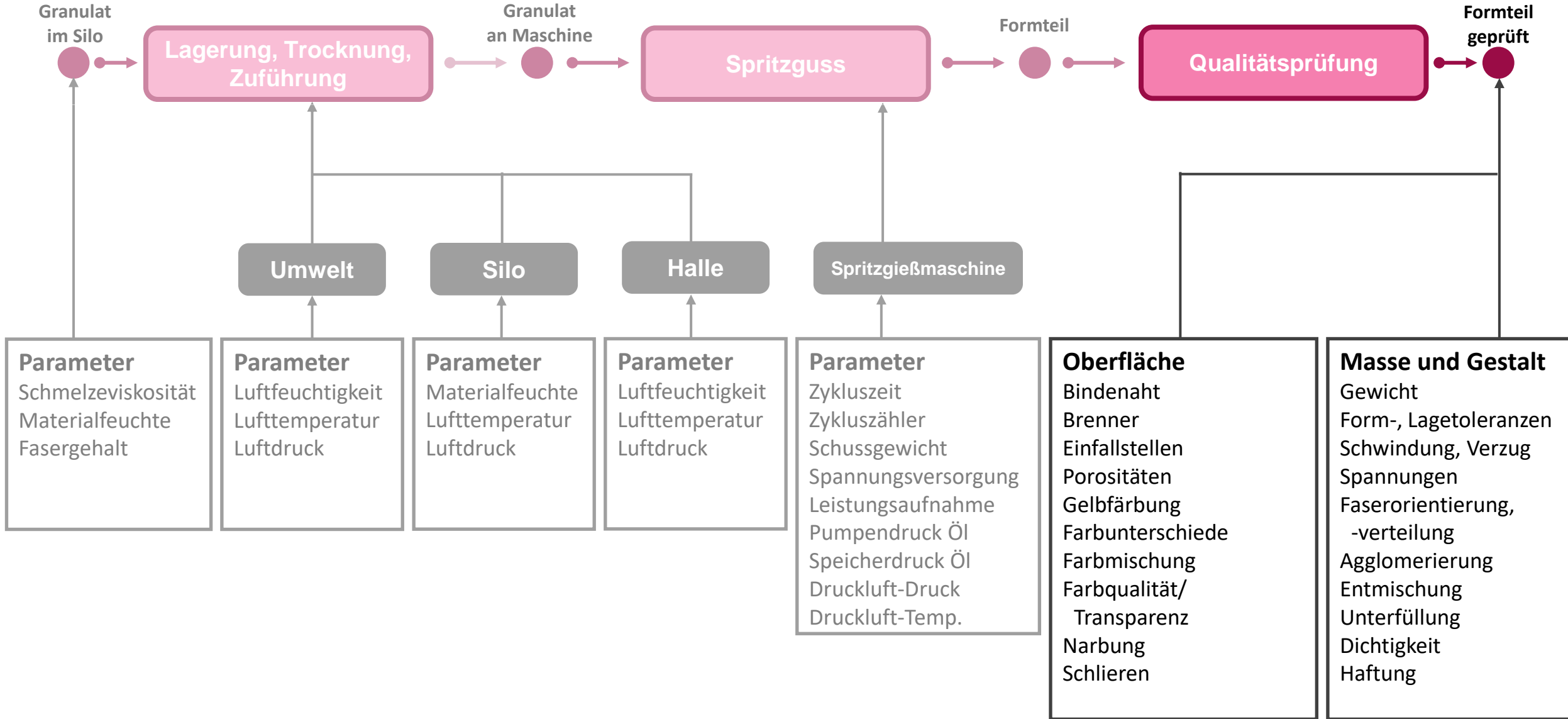
- Temperaturerfassung mit Thermoelementfühlern
- Temperaturmessung mit Infrarot-Werkzeugthermometern
- Kombinierte Sensoren für Druck- und Temperaturmessung

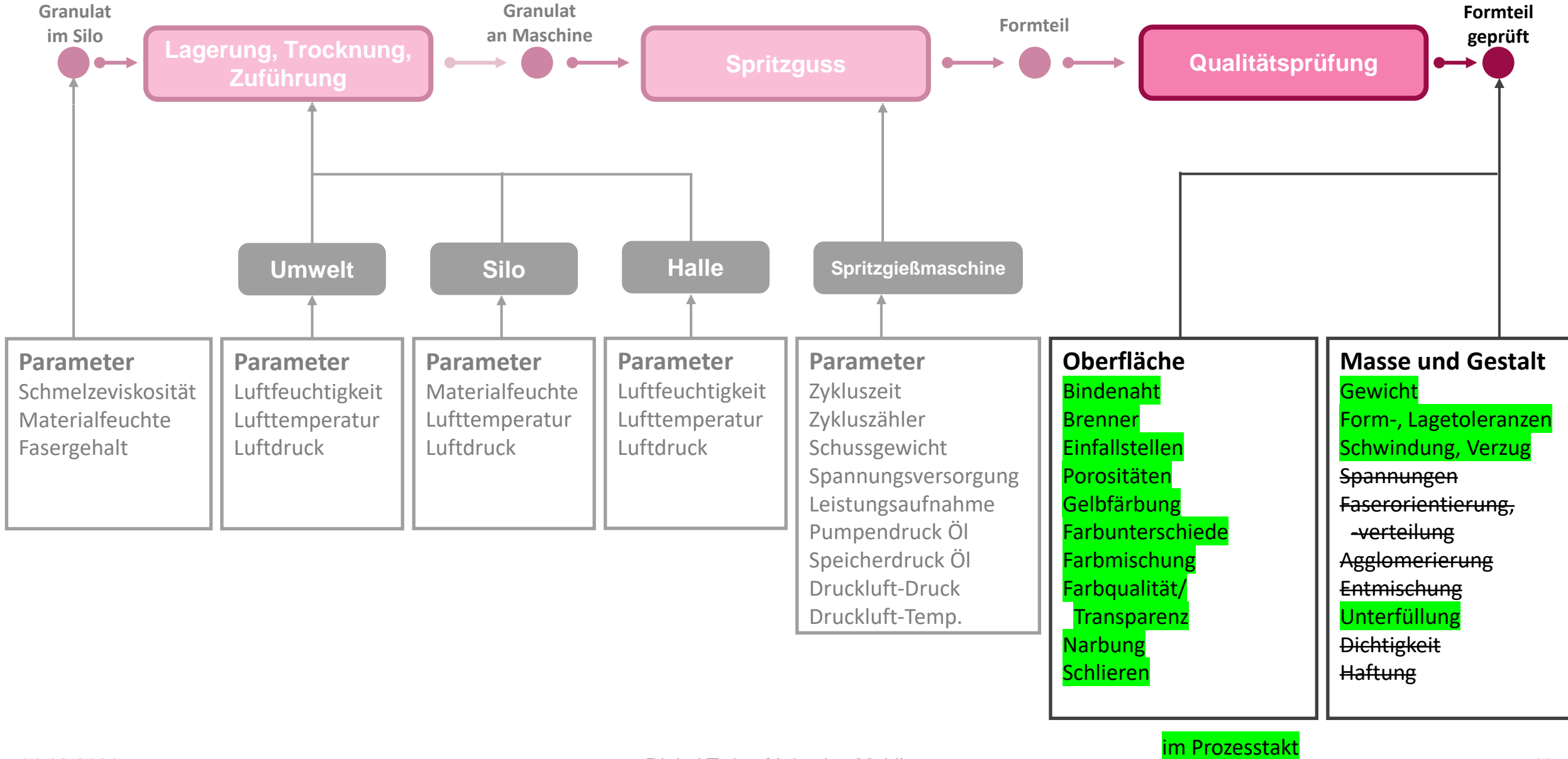


- Kombination aus den direktmessenden Druck- und Temperaturfühlern
- An Maschine sind zwei Messsysteme notwendig: Ladungsverstärker für die Druckmessung und ein Temperaturverstärker
- Üblicherweise gleiche Abmessungen wie Drucksensoren, Austausch möglich
- Sensorfront nicht bearbeitbar
- Kombination aus Quarz-Drucksensor, IR-Schmelze-Thermometer und Oberflächen-Kontakt-Thermometer verfügbar

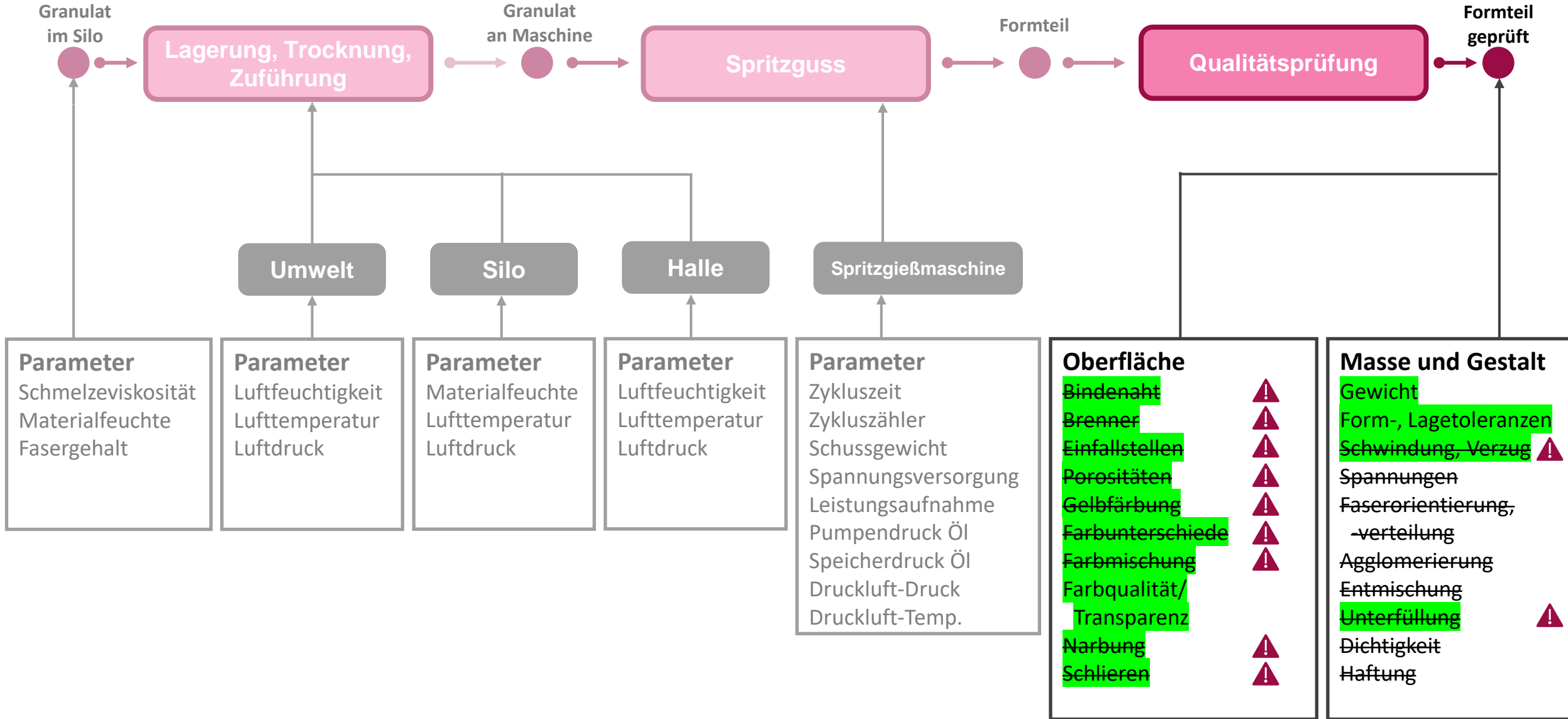
- Prozessgrößen- und Sensorauswahl
- **Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen**
- Aufbau einer Qualitätsmesszelle
- Ausblick nächster Workshop











im Prozesstakt

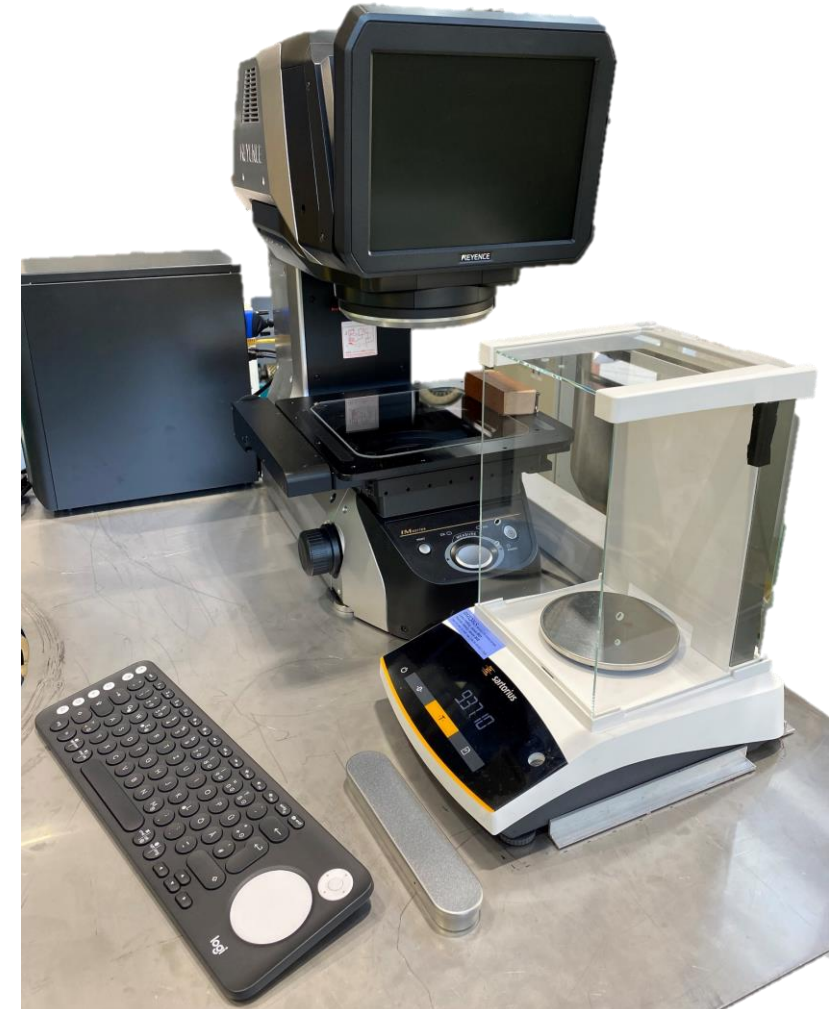
Ausschuss ⚠

## 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



- Prozessgrößen- und Sensorauswahl
- Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen
- **Aufbau einer Qualitätsmesszelle**
- Ausblick nächster Workshop

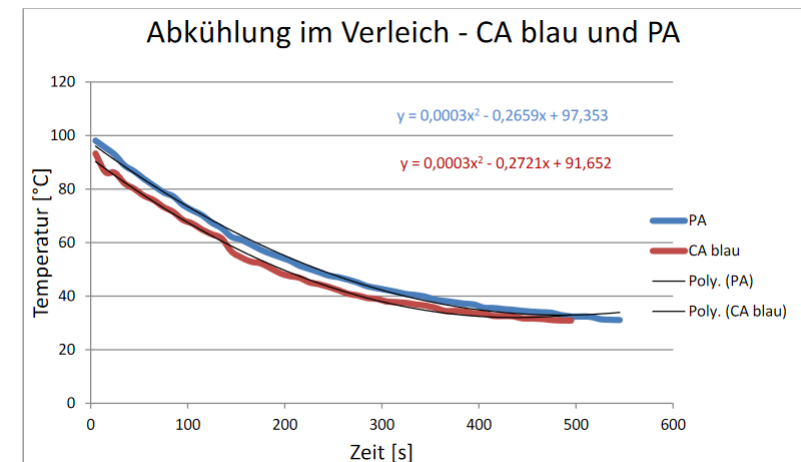
## Erfassung des Bauteilgewichts

- Die am häufigsten eingesetzte Qualitätsüberwachung ist die Erfassung des Gewichts mit einer Laborwaage.
- Das Gewicht kann unmittelbar nach dem Entformen ermittelt werden (es ist praktisch temperaturunabhängig).
- Bei der Produktion mit Mehrfachkavitätenwerkzeugen muss jedes erfasste Bauteilgewicht eindeutig der Kavität zugeordnet werden können, da sich Gewichtsschwankungen nicht gleichmäßig über alle Kavitäten verteilen.
- Messbereich und –genauigkeit der Waage muss zum Bauteilgewicht passen; die Reproduzierbarkeit der Messung muss überprüft werden.

Erforderliche Ablese- und Messgenauigkeit von Waagen	
Formteilgewicht	Genauigkeit
≤ 20 g	0,001 g
10 – 200 g	0,01 g
110 – 2000 g	0,1 g

## Erfassung der Bauteilmaßhaltigkeit

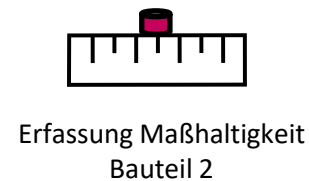
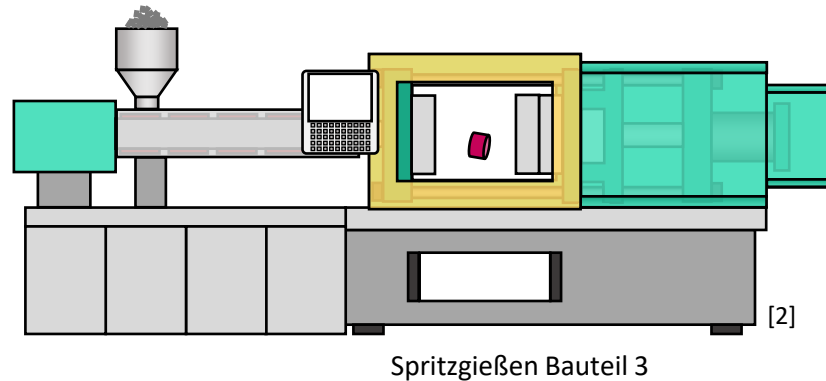
- Abweichung der Bauteilmaßhaltigkeit spiegeln sich zwar auch im Bauteilgewicht wider, jedoch kann ein direkter Zusammenhang üblicherweise nicht ermittelt werden (dreidimensionale Abweichungen, Überlagerung von Effekten, ...).
- Eine Erfassung der Maßhaltigkeiten liefert detaillierte Erkenntnisse über die tatsächlichen Auswirkungen von Prozessschwankungen.
- Da Schwindung und Verzug stark temperaturabhängig sind, stellt sich das exakte Bauteilmaß erst nach mehreren Stunden ein; nach Norm darf eine Bestimmung der Abmessungen erst nach 24 Stunden erfolgen.
- Im Prozesstakt lassen sich nur Maßvergleiche der noch warmen Bauteile durchführen; Zeitspanne zwischen Entformung und Messung muss gleich sein.
- Je nach Art des eingesetzten Kunststoffes liegt die Wärmeausdehnung zwischen  $50$  und  $200 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ; d.h. bereits  $1^\circ\text{C}$  hat je nach Bauteilmaß einen entscheidenden Einfluss:
  - 10 mm dehnen sich um 0,0005 - 0,002 mm
  - 100 mm dehnen sich um 0,005 - 0,02 mm
- Umgebungstemperatur hat einen Einfluss auf die Messergebnisse.



[5]

## Aufbau einer Qualitätsmesszelle für einen Digitalen Zwilling

- Die Erfassung der Qualitätsgrößen muss im Prozesstakt erfolgen; Zykluszeit bestimmt Zeitspanne für Messungen.
- Da die einzelnen Messungen nacheinander erfolgen, kann bei kurzen Zykluszeiten eine Messung pro Zyklus durchgeführt werden; dadurch entsteht jedoch ein Versatz in den Berechnungen des digitalen Zwillings (Schwankungen werden erst später erkannt).



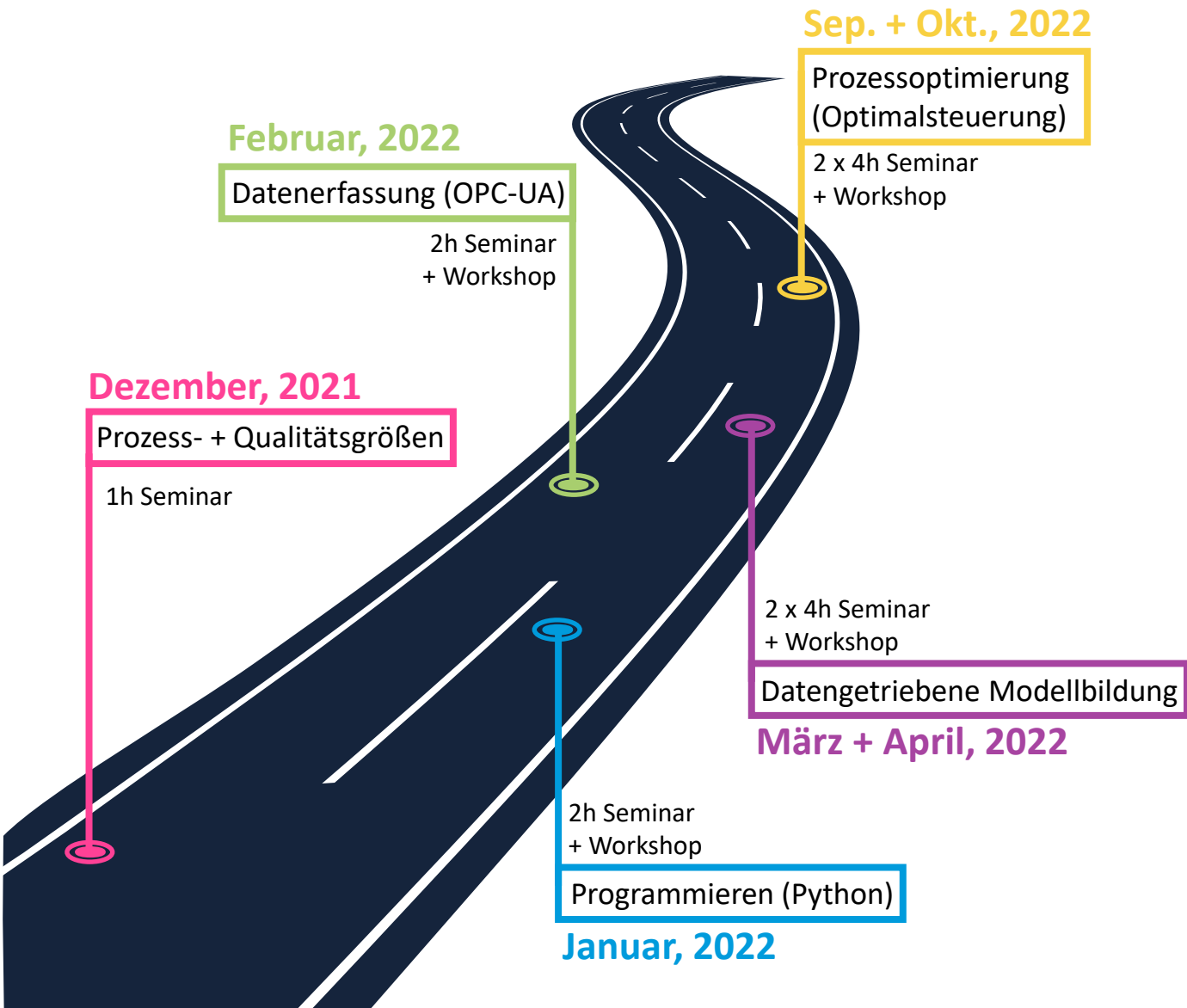
- Aufgrund der Temperaturabhängigkeit sollte die Messung der Maßhaltigkeit zuerst erfolgen.
- Jede Qualitätsgröße muss eindeutig dem entsprechenden Bauteil zugeordnet werden.
- Idealerweise wird ein Handlingsystem eingesetzt, um identische Messzeitpunkte und die exakte Positionierung auf dem Messprojektor einzuhalten.
- Einflüsse durch Störgrößen, wie bspw. die Hallentemperatur, müssen berücksichtigt (oder vermieden) werden.





- Prozessgrößen- und Sensorauswahl
- Auswahl und Erfassung von Qualitätsgrößen
- Aufbau einer Qualitätsmesszelle
- **Ausblick nächster Workshop**





- **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

## Programmieren mit Python

11.01.2022 von 15-17 Uhr

### Seminar (1 h)

- Warum Python?
- Installieren und Ausführen von Python
- Programmieren mit Python (Grundlagen und Fortgeschrittenes)

### Workshop (1 h)

- Betreute Rechnerübung
- Bearbeitung von Übungsaufgaben zur Programmierung mit Python

Voraussetzung ist ein eigener Rechner auf dem die Anaconda-Distribution von Python installiert ist:

<https://www.anaconda.com/products/individual>

## Bildquellen:

- [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] Kistler Instrumente GmbH
- [4] FOS Meßtechnik GmbH
- [5] Bachelorarbeit von Polina Ottenwälder: Temperaturverhalten von Brillenfassungen aus Kunststoff und Horn: Analyse und Vergleich, Hochschule Aalen, 2018 (<https://d-nb.info/116939664X/34>)

## Informationsquellen:

VDI-Statusreport (2019). Industrie 4.0 in Spritzgießunternehmen

(<https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-statusreport-industrie-40-in-spritzgiessunternehmen>)

Beitl, F. (2007). 1000 Tipps zum Spritzgießen, Band 1, Maschineneinstellungen und Prozessparameter (2. Aufl.). Hüthig GmbH & Co. KG

Beitl, F. (2017). 1000 Tipps zum Spritzgießen, Band 11, Qualitätskontrolle (1. Aufl.). Beuth Verlag GmbH

Beitl, F. (2017). 1000 Tipps zum Spritzgießen, Band 12, Einsatz von Temperatur- und Druckfühlern in Kunststoffen (1. Aufl.). Beuth Verlag GmbH