

Prozessoptimierung von Spritzgießprozessen

Dr.-Ing. Robert Vaculik

Mitgliedertreffen
„Kunststoffe in OWL“

7.9.2023



Dr.-Ing. Robert Vaculik
VACULIK Consulting

Email: vaculik@vaculik-consulting.de
Phone: +49 1577 340 3681

- Studium Kunststofftechnik in Aachen
- Promotion „Prozessregelung ...“
- **MANN+HUMMEL**
(Leitung Vorentwicklung Neue Produkte)
- **Dynamit Nobel**
(Projektleitung Daimler; Entwicklungsleitung)
- **ITW Deltar**
(Leitung Geschäftsbereich. Engine Components)
- **Montaplast GmbH**
(Entwicklungsleitung)
- **Kistler Instrumente AG**
(Leitung Geschäftsbereich Plastics)
- **VACULIK Consulting**
(Beratung Digitalisierung und Prozessoptimierung)



- Motivation
- Prozessoptimierung vs. Prozessüberwachung
- Arten der Prozessoptimierung
 - Werkzeugoptimierung
 - Phasenorientiert
 - Step by Step
 - Prozessmodell
- Beispiel für Prozessoptimierung mit einem Prozessmodell

Ziele der Prozessoptimierung



Qualität



Energie

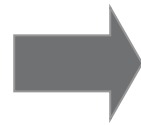
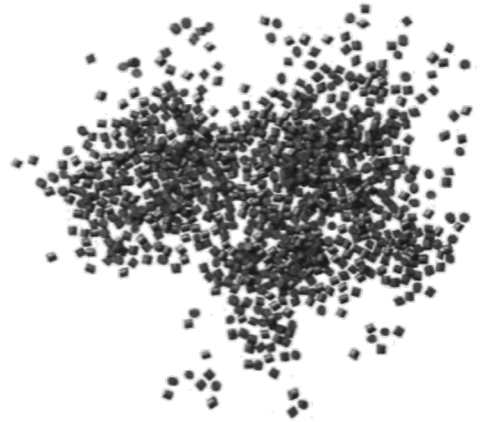


Kosten



Systematische Prozessoptimierung

Vom Rohmaterial zum spritzgegossenen Bauteil



Minimale
Produktionskosten



Vereinbarte
Qualität

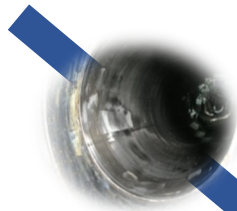
Einflüsse auf Spritzgiessprozess



Mensch



Maschine



Material



Qualität



Methode



Mitwelt



Maschinen – vs. Prozessparameter



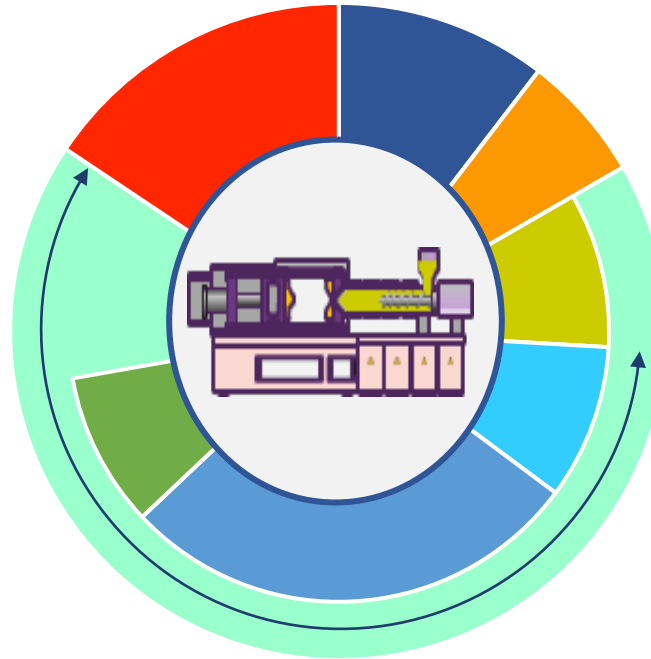
Eingangsgrößen

Maschineneinstellparameter

- Vorlauftemperatur Werkzeug
- Schneckendrehzahl
- Staudruck
- Schneckenrückzug
- Spez. Einspritzdruck
- Einspritzvolumenströme
- Umschaltpunkt (weg)
- Nachdruckhöhe
- Nachdruckzeit
- Restkühlzeit



Prozess



Ausgangsgrößen

Prozessparameter

- Schmelzetemperatur
- Einspritzzeit
- Druckverlauf (hydr, WID)
- Entformungstemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Siegelpunkt
- Restmassepolster
- Temperaturverteilung
- ...



Zielgrößen

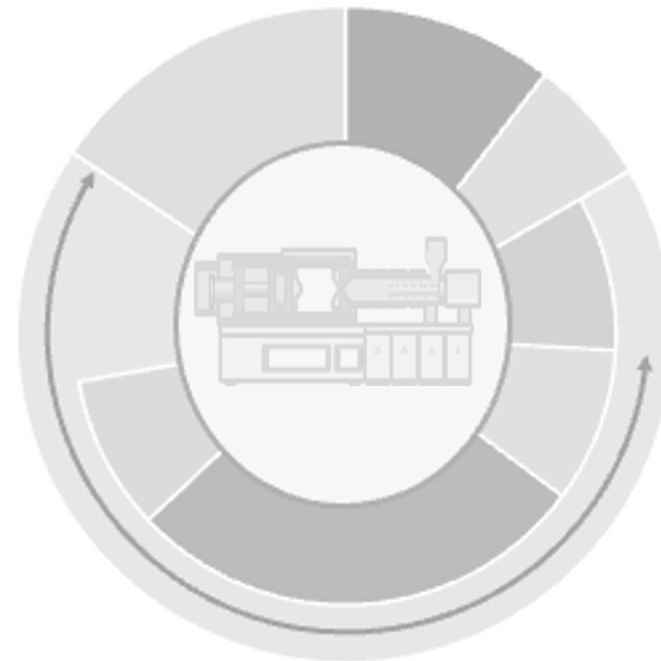
- Prozessqualität (cpk, ...)
- Bauteilqualität (Masse, Oberfläche, ...)
- Wirtschaftlichkeit (Zykl.zeit; Material; Energie)



Eingangsgrößen

Maschineneinstellparameter

- Vorlauftemperatur Werkzeug
- Schneckendrehzahl
- Staudruck
- Schneckenrückzug
- Spez. Einspritzdruck
- Einspritzvolumenströme
- Umschaltpunkt (weg)
- Nachdruckhöhe
- Nachdruckzeit
- Restkühlzeit

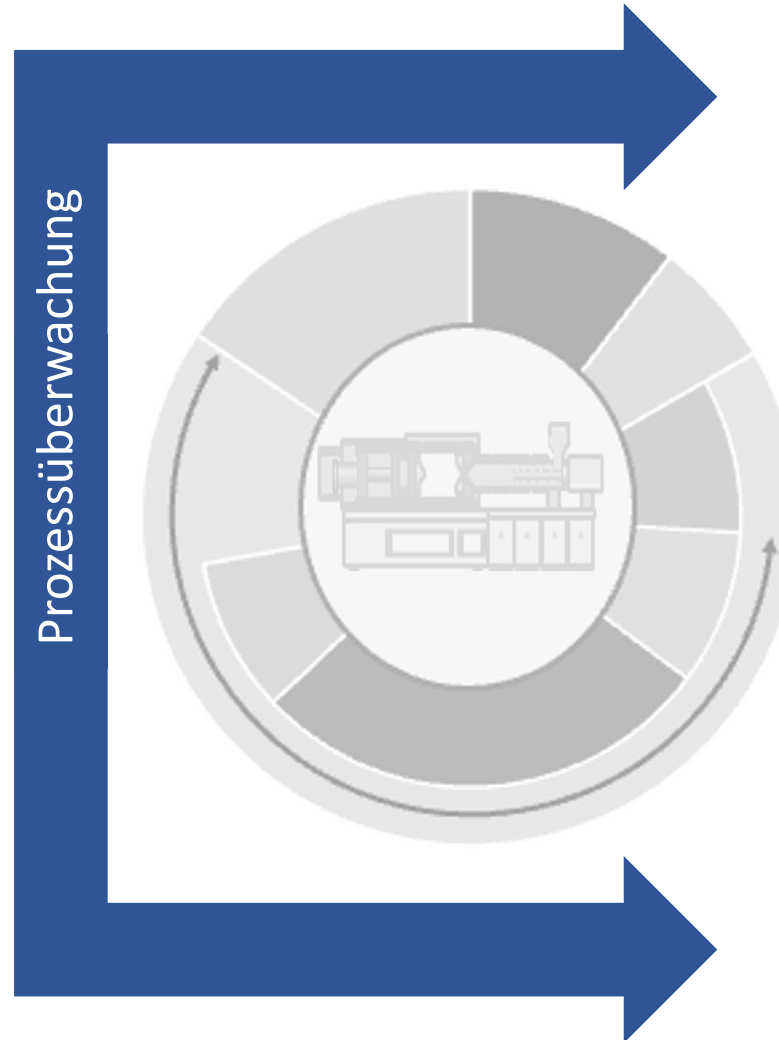


Zielgrößen

- Bauteilqualität (Masse, Oberfläche, ...)
- Wirtschaftlichkeit (Zykl.zeit; Material; Energie,..)
- Prozessqualität (cpk, ...)



Prozessoptimierung



Ausgangsgrößen

Prozessparameter

- Schmelztemperatur
- Einspritzzeit
- Druckverlauf (hydr, WID)
- Entformungstemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Siegelpunkt
- Restmassepolster
- Temperaturverteilung
- ...

Zielgrößen

- Prozessqualität (cpk, ...)
- Bauteilqualität (Masse, Oberfläche, ...)
- Wirtschaftlichkeit (Zykl.zeit; Material; Energie)

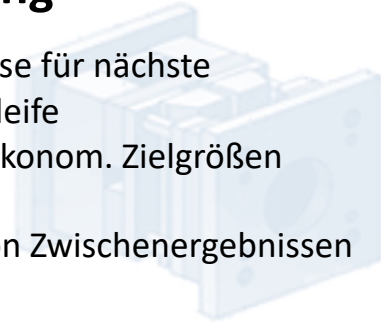
A close-up, black and white photograph of several interlocking gears. The gears have a fine, woven texture. A white pen nib is positioned in the center, pointing towards the teeth of one of the gears. The lighting creates strong highlights and deep shadows, emphasizing the mechanical details.

Prozessoptimierung



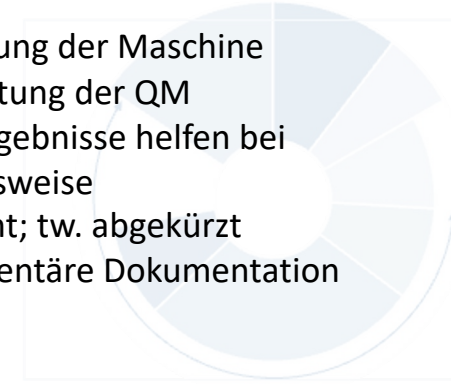
Werkzeugoptimierung bei Erstbemusterung

- Ziel: Korrekturmasse für nächste WKZ-Korrekturschleife
- Andere QM bzw. ökonom. Zielgrößen beachten
- Dokumentation von Zwischenergebnissen



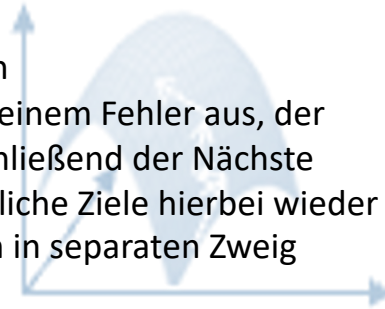
Phasenorientierte Optimierung

- Grundeinstellung der Maschine
- Keine Betrachtung der QM
- Simulationsergebnisse helfen bei der Vorgehensweise
- Ablauf bekannt; tw. abgekürzt
- Oft nur rudimentäre Dokumentation



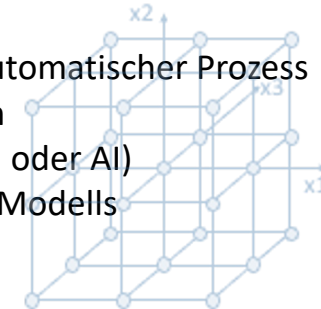
Evolutionsbasierte Optimierung

- Try & Error Verfahren
- Man geht meist von einem Fehler aus, der optimiert wird, anschließend der Nächste
- Oft gehen wirtschaftliche Ziele hierbei wieder verloren und werden in separaten Zweig optimiert



Optimierung mittels Prozessmodellen

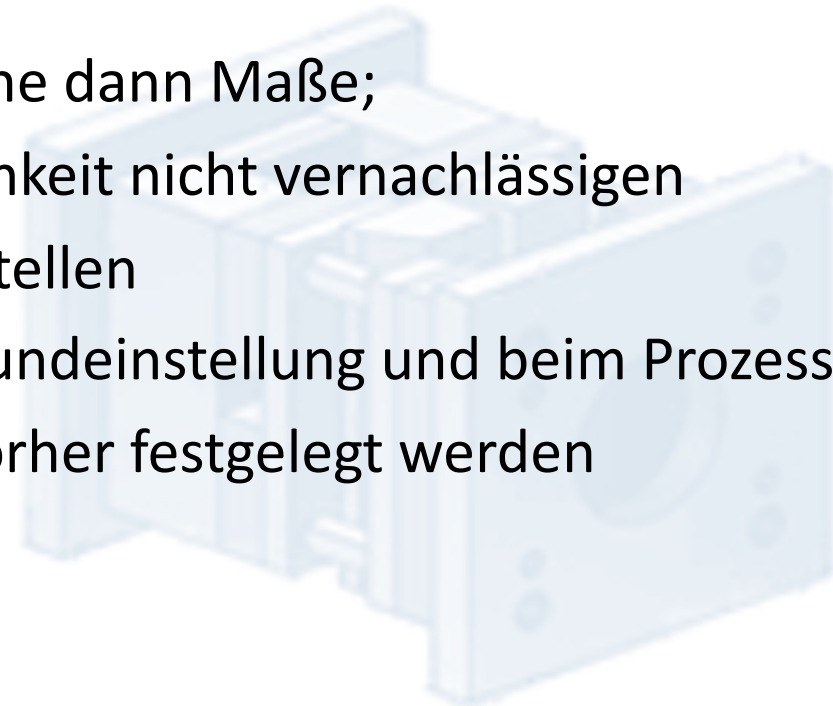
- Voraussetzung stabiler, automatischer Prozess
- Statistischer Versuchsplan
- Modellbildung (statistisch oder AI)
- Optimierung anhand des Modells



Werkzeug Erstbemusterung – wichtige Punkte



- Teamwork – alle beteiligten Abteilungen müssen involviert sein
- Ziele müssen definiert sein
 - Strategie festlegen z.B. erst Oberfläche dann Maße;
 - Prozessrobustheit und –wirtschaftlichkeit nicht vernachlässigen
- Grundfunktionen des Werkzeugs sicherstellen
- Simulationsergebnisse helfen bei der Grundeinstellung und beim Prozessverständnis
- Messmethoden (Vorrichtung) müssen vorher festgelegt werden
- Genug Zeit einplanen
- Ablauf dokumentieren
- Auf stabilen Arbeitspunkt achten; Automatikmodus der Maschine
- Checklisten verwenden



Prozessoptimierung Grundeinstellung 1



Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen Strukturierte und analytische Werkzeugabmusterung

Informationsbeschaffung

**Vorbereitung der
Abmusterung**

Werkzeug rüsten

- Vor dem Werkzeugeinbau
- Werkzeugeinbau

**Grundeinstellung der
Schließereinheit**

**Grundeinstellung der
Plastifiziereinheit**

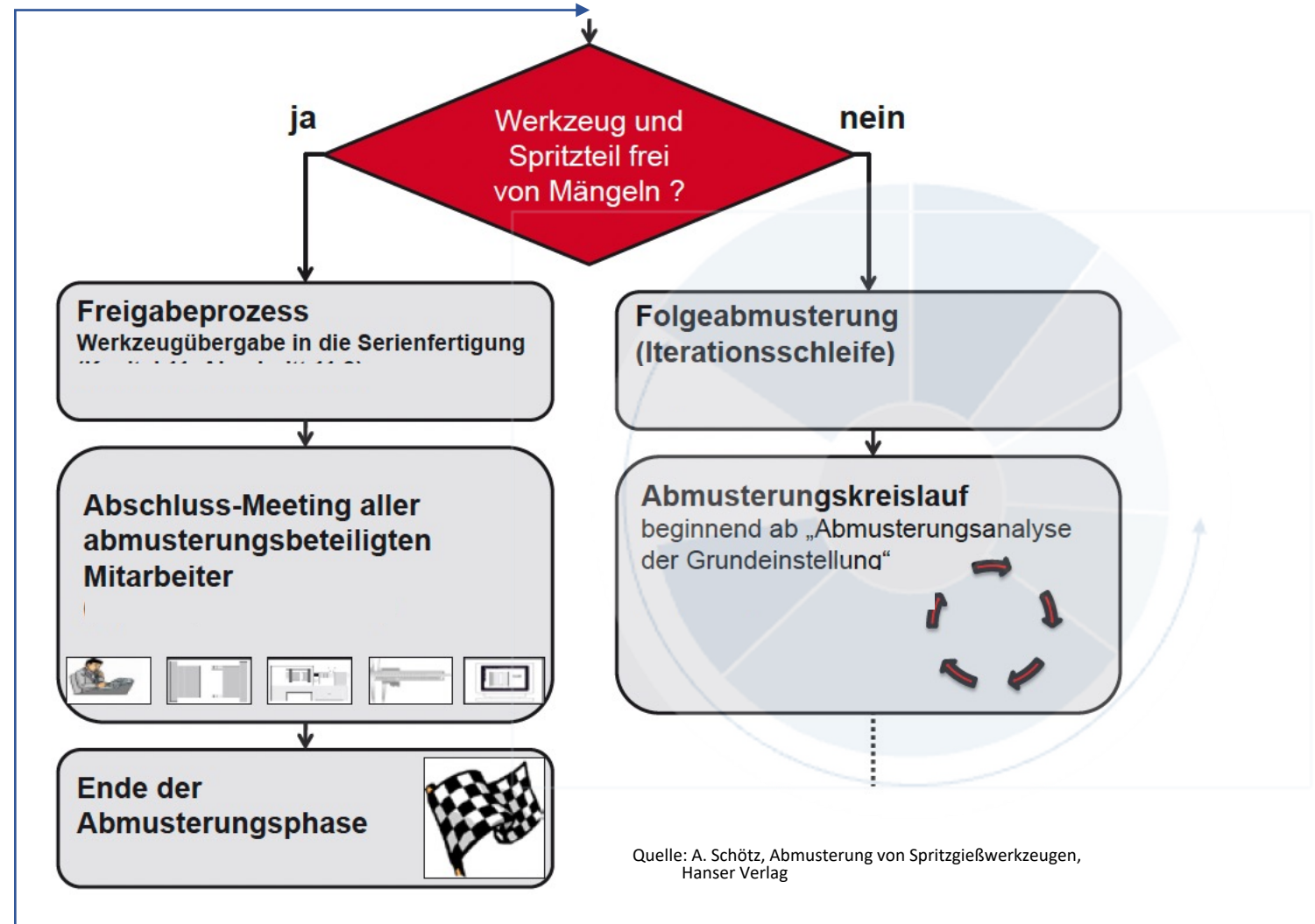
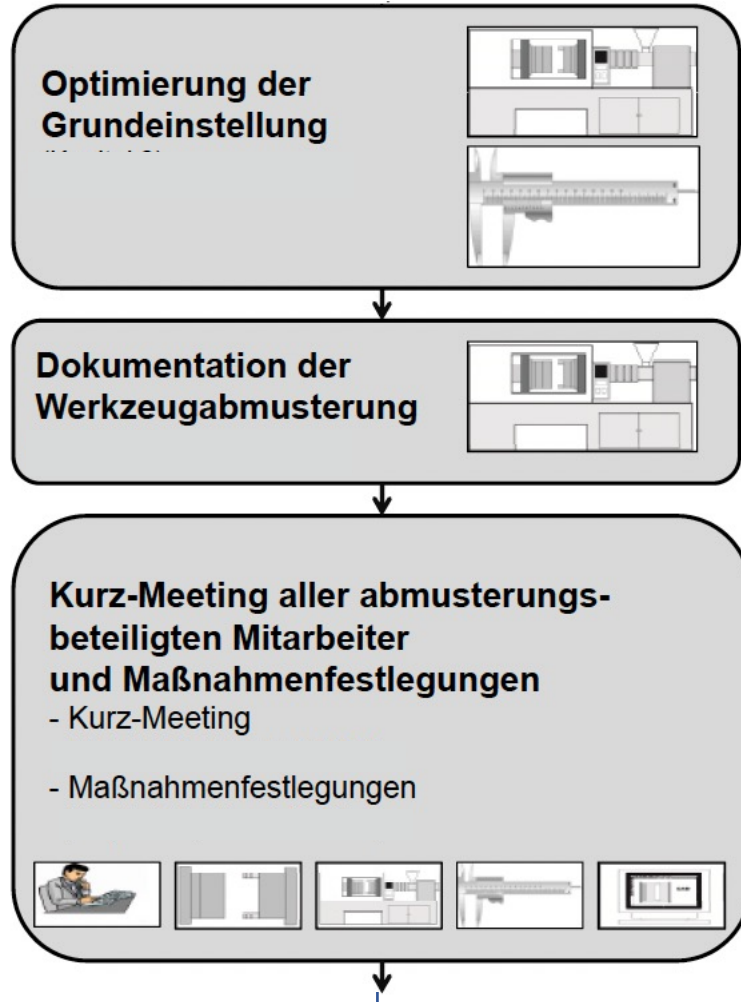
**Füllstudie, Nachdruck und
Werkzeugzuhaltekraft**

- Füllstudie
- Nachdruck
- Werkzeugzuhaltekraft

**Erste Musterteile fertigen und
Abmusterungsanalyse
der Grundeinstellung**

- Erste Musterteile fertigen
- Abmusterungsanalyse der
Grundeinstellung

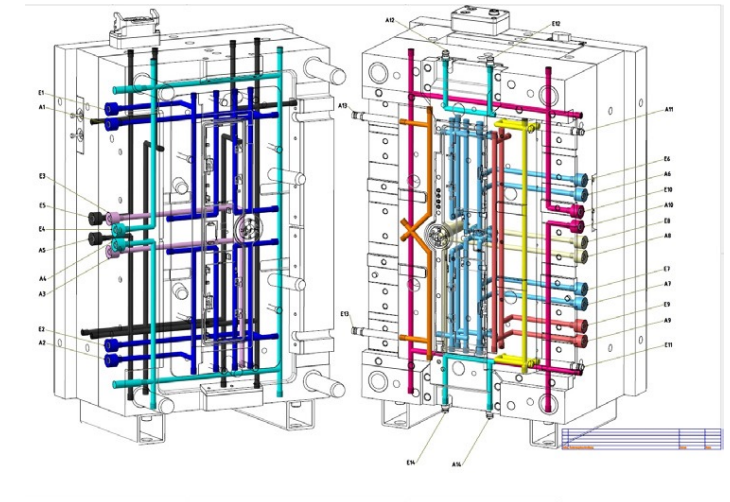
Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen,
Hanser Verlag



Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen, Hanser Verlag



- Sicherheit: Befestigung, Schläuche, bewegliche Elemente
- Dichtheit aller Schnittstellen/Anschlüsse: Wasser, Schmelze, Öl
- Elektrik: Isolierung, Funktion, Kabelverlauf, Sensorik
- Kühlplan; Wasserfluss
- Werkzeugwege, Werkzeugsicherung
- Auswerferwege
- Sicherheitseinrichtungen: z.B. Wegschalter
- Heisskanal: Funktion
- Zuhaltekraft



$$F_z \text{ (kN)} = \text{spez. Zuhaltekraft} \left(\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \right) \times \text{proj. Fläche (cm}^2) \times \text{Kavitäten}$$



- Wasserfluss kontrollieren; turbulente Strömung
- Oberflächentemperatur kontrollieren ($\Delta T < 5^\circ\text{C}$)
- Rücklauf –Vorlauftemperatur $< 2\text{-}3^\circ$
- Formhälften gemeinsam aufheizen

Kunststoff	Werkzeugtemperatur ($^\circ\text{C}$)	Kunststoff	Werkzeugtemperatur ($^\circ\text{C}$)
PE-LD	15–60	ASA	40–80
PE-HD	20–60	PMMA	50–90
PP	10–90	POM	60–100
PVC weich	10–60	CA	40–80
PVC hart	20–60	CAB	40–80
PS	10–70	PA 6	50–90
S/B	10–70	PA 6 GF30	80–120
SAN	40–80	PA 66	50–90
ABS	50–80	PA 12	30–100
PC	80–100	PC/ABS	70–100
PET	130–140	PC/ABS GF20	80–90
PBT	40–100	PC/ASA	60–90
PSU	120–160	PC/PBT	60–80

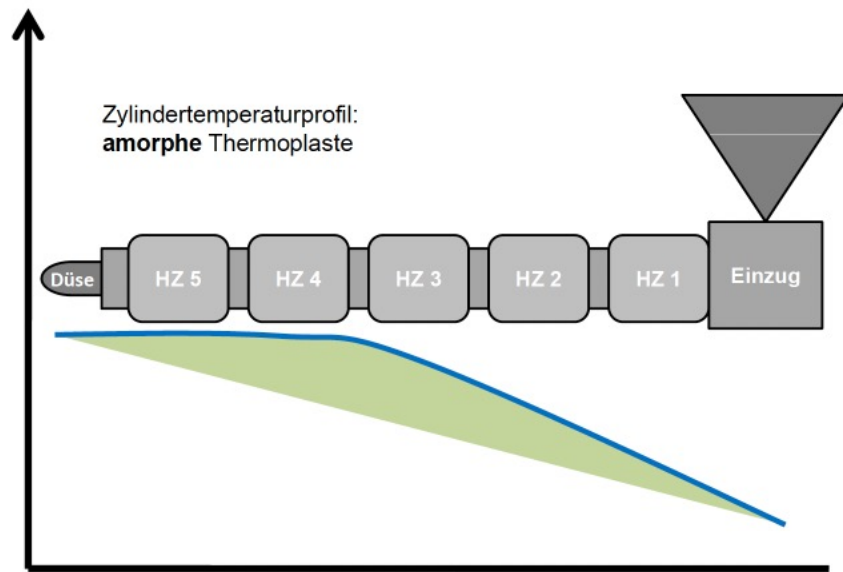
Richtwerte Werkzeugtemperatur

Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen,
Hanser Verlag

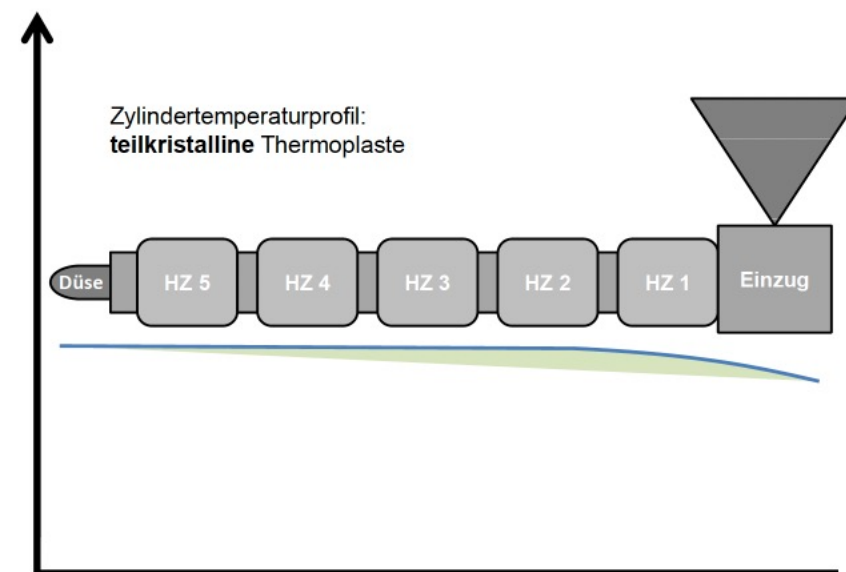
Prozessphasen Einrichten - Plastifizierung



- Empfehlungen der Materialhersteller
- Flanshtemperatur 50-70°C um Verkleben zu verhindern



- Delta HZ5-HZ1 ca. 20-25°C



- Delta HZ5-HZ1 ca. 10°C

Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen,
Hanser Verlag



- Teilevolumen ermitteln; Volumenausdehnung berücksichtigen (15%)
- Masseposter berücksichtigen ca. 10% (mind. 10-12mm)
- Schneckendrehzahl aus Umfangsgeschwindigkeit
Empfehlung Materialhersteller
- Staudruck einstellen (spezifisch)
empfindliche Schmelze sehr niedriger Staudruck
- Schneckenrückzug / Dekompression einstellen
(nicht zu gross, um keine Luft einzuziehen; ca. 10mm)

Drehzahl (1/min)	Schneckendurchmesser (mm)													
	18	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120
20	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,084	0,094	0,105	0,12	0,13
40	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25
60	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,37	0,38
80	0,08	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,25	0,29	0,34	0,38	0,42	0,46	0,50
100	0,09	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,26	0,31	0,37	0,42	0,47	0,52	0,58	0,63
120	0,11	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,38	0,44	0,50	0,57	0,63	0,69	0,75
140	0,13	0,18	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37	0,44	0,51	0,59	0,66	0,73	0,81	0,88
160	0,15	0,21	0,25	0,29	0,34	0,38	0,42	0,50	0,59	0,67	0,75	0,84	0,92	1,01
180	0,17	0,24	0,28	0,33	0,38	0,42	0,47	0,57	0,66	0,75	0,85	0,94	1,04	1,13
200	0,19	0,26	0,31	0,37	0,42	0,47	0,52	0,63	0,73	0,84	0,94	1,05	1,15	1,26
220	0,21	0,29	0,35	0,40	0,46	0,52	0,58	0,69	0,81	0,92	1,04	1,15	1,27	1,38
240	0,23	0,31	0,38	0,44	0,50	0,57	0,63	0,75	0,88	1,01	1,13	1,26	1,38	1,51
260	0,25	0,34	0,41	0,48	0,54	0,61	0,68	0,82	0,95	1,09	1,23	1,36	1,50	
280	0,26	0,37	0,44	0,51	0,59	0,66	0,73	0,88	1,03	1,17	1,32	1,47		
300	0,28	0,39	0,47	0,55	0,63	0,71	0,79	0,94	1,10	1,26	1,41	1,57		
320	0,30	0,42	0,50	0,59	0,67	0,75	0,84	1,01	1,17	1,34	1,51			
340	0,32	0,45	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	1,07	1,25	1,42				
360	0,34	0,47	0,57	0,66	0,75	0,85	0,94	1,13	1,32	1,51				
380	0,36	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,99	1,19	1,39					
400	0,38	0,52	0,63	0,73	0,84	0,94	1,05	1,26	1,47					
420	0,40	0,55	0,66	0,77	0,88	0,99	1,10	1,32	1,54					
440	0,41	0,58	0,69	0,81	0,92	1,04	1,15	1,38						
460	0,34	0,60	0,72	0,84	0,96	1,08	1,20	1,45						
480	0,45	0,63	0,75	0,88	1,01	1,13	1,26	1,51						
500	0,47	0,65	0,79	0,92	1,05	1,18	1,13							

Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen,
Hanser Verlag



- Ziel ist ein geschwindigkeitsgesteuertes Einspritzverhalten, deswegen
 - Einspritzdruck so hoch dass er nicht erreicht wird, kann als Sicherheitsschwelle genutzt werden
 - Einspritzzeit ergibt sich als Prozessparameter
 - Einspritzprofil einstellen; Ziel konstante Fließfrontgeschwindigkeit
 - Höhe des Profils ist abhängig von Anforderungen an das Bauteil. Simulationsergebnisse helfen bei der Grundeinstellung.

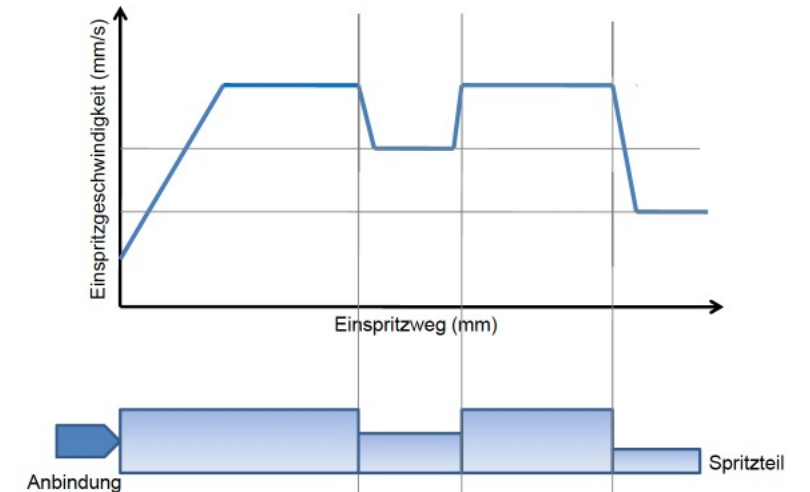


Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen, Hanser Verlag

Prozessphasen Einrichten – Umschalten auf Nachdruck



- Umschalten erfolgt bei oder kurz vor volumetrischer Füllung der Kavität
- Unterschiedliche Verfahren:
 - Schneckenweg
 - Einspritzdruck oder –zeit
 - Werkzeuginnendruck
 - Füllwegsensor z.B. Temperatursensor
- Füllstudie
- Sensorbasierend (p oder T)

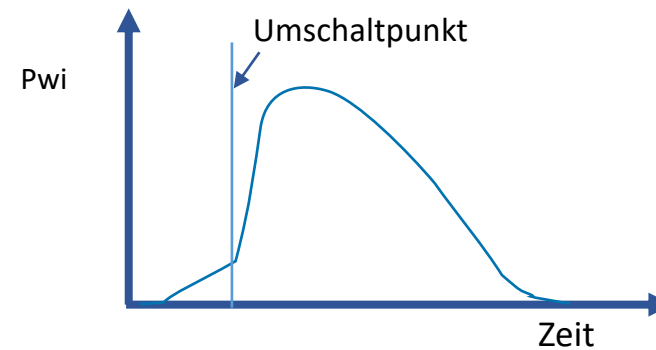
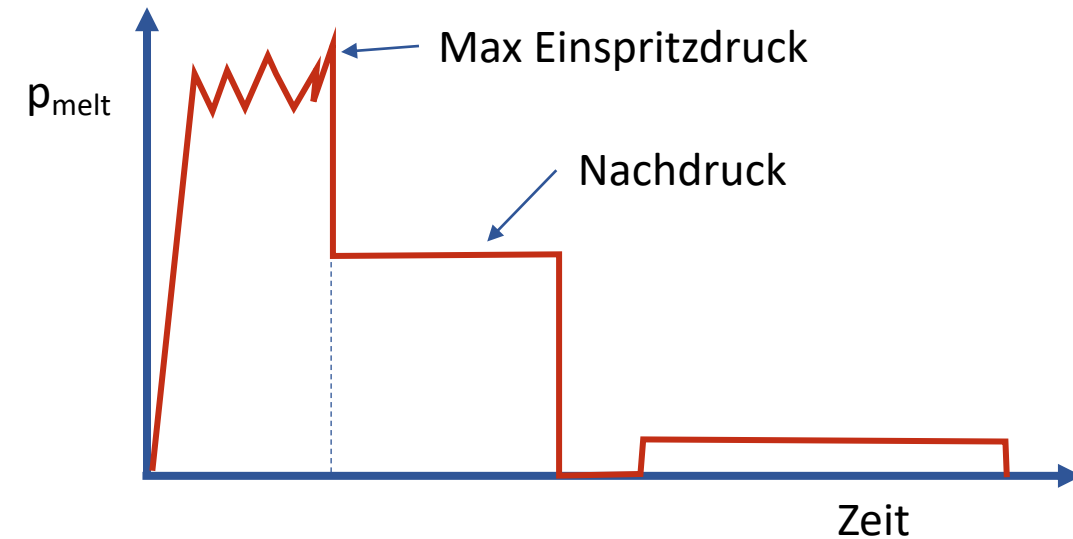


Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen,
Hanser Verlag



- Die Nachdruckhöhe orientiert sich an dem max. Einspritzdruck
 - 50-60% des Einspritzdrucks als Startwert
 - Bei teilkristalline Materialien i.d.R. eine Druckstufe
 - Bei amorphen Materialien abgestuftes Profil





- Ermittlung des Siegelpunktes
 - Spritzgewicht entspr. Summe aller Kavitäten + Anguss
 - Gewichtsmessung bis keine Änderung mehr Eintritt
 - Anhand visueller Auswertung des Werkzeuginnendrucks

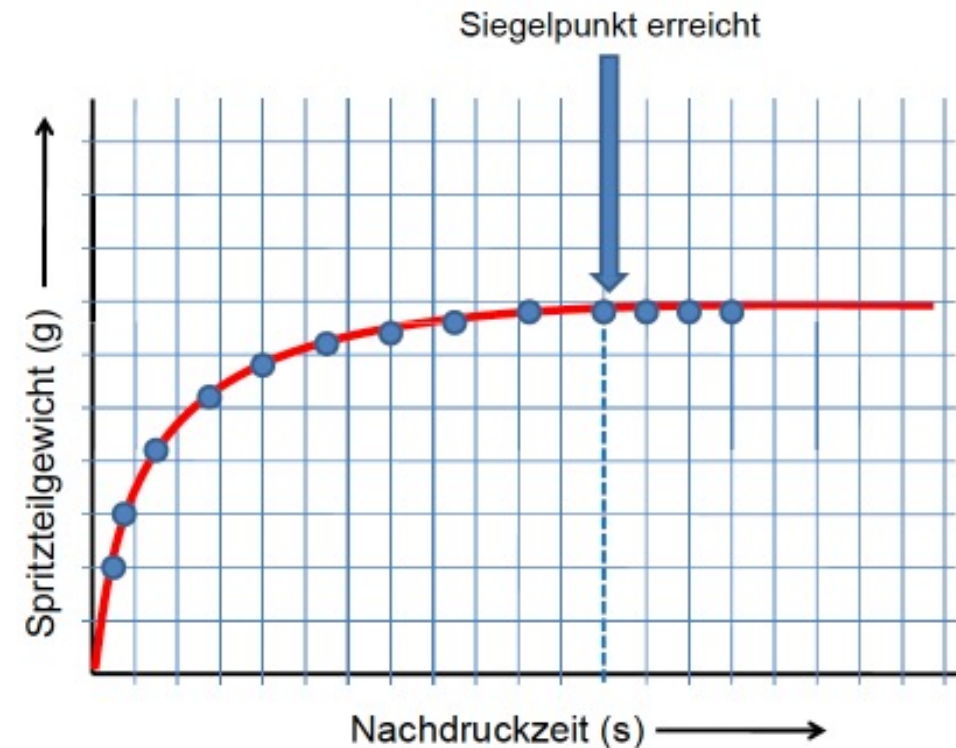


Bild Quelle: A. Schötz, Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen, Hanser Verlag

Prozessphasen Einrichten - Restkühlzeit

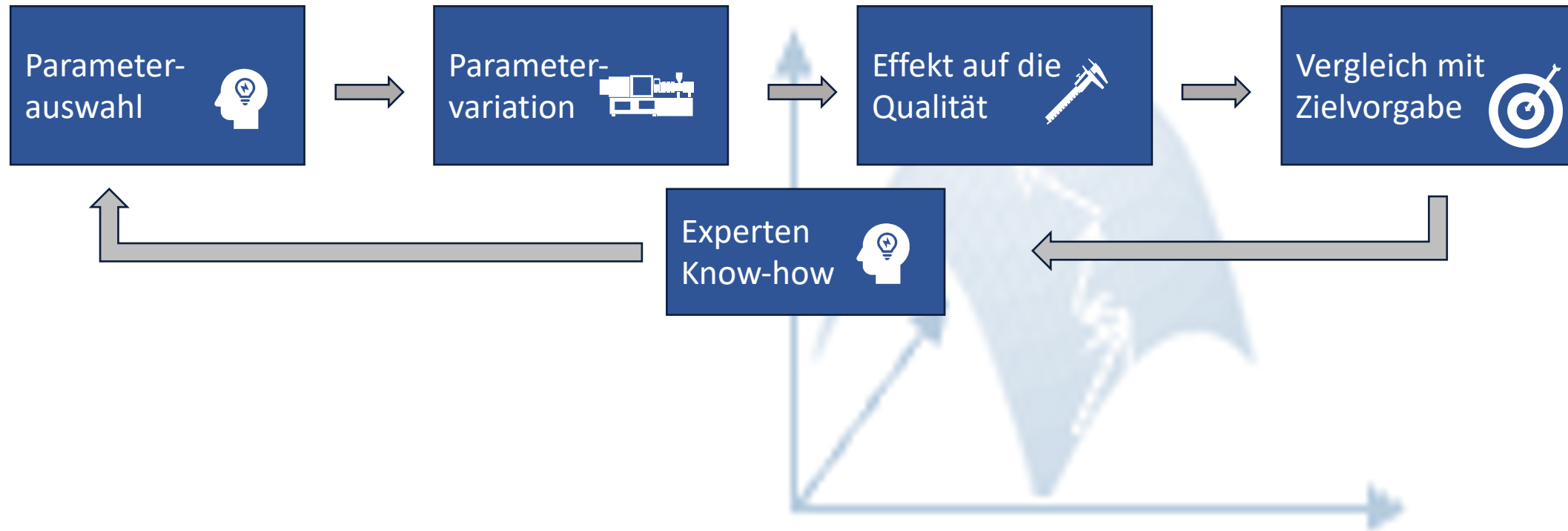


- Restkühlzeit ist Kühlzeit minus Nachdruckzeit
- Ermittlung über Simulation oder Kühlzeitformel

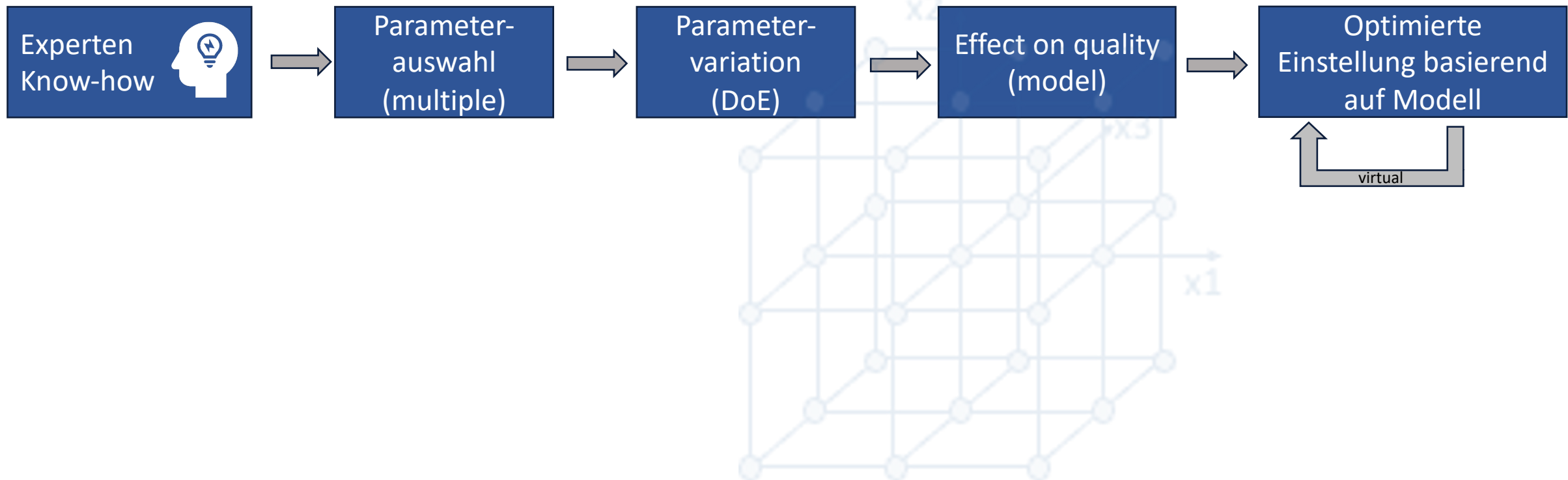
$$t_k = \frac{s^2}{\pi \times \alpha_{\text{eff}}} \times \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \times \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$$

- Ggf Anpassen für Wanddickenanhäufung und sonstige Formteilbesonderheiten

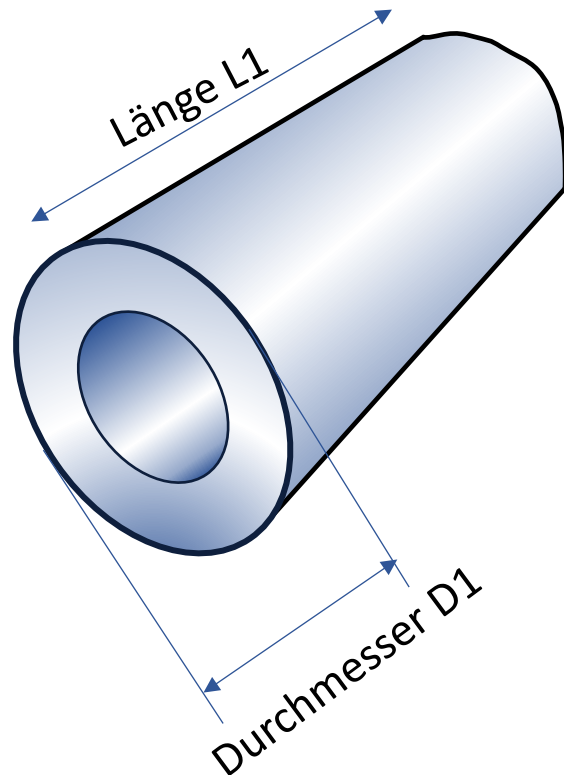
Schrittweiser (evolutionärer) Optimierungsprozess



Scientific process optimization



Beispiel Prozessoptimierung „Hülse“:



Ziel:

- Prozessfähigkeit für alle QM
- minimale Prozesskosten
- Betrachtung von 2 Referenz-Kavitäten

Toleranzen:

- L1: $56,7 \pm 0,25$ mm
- D1: $6,3 \pm 0,2$ mm

Einflussparameter:

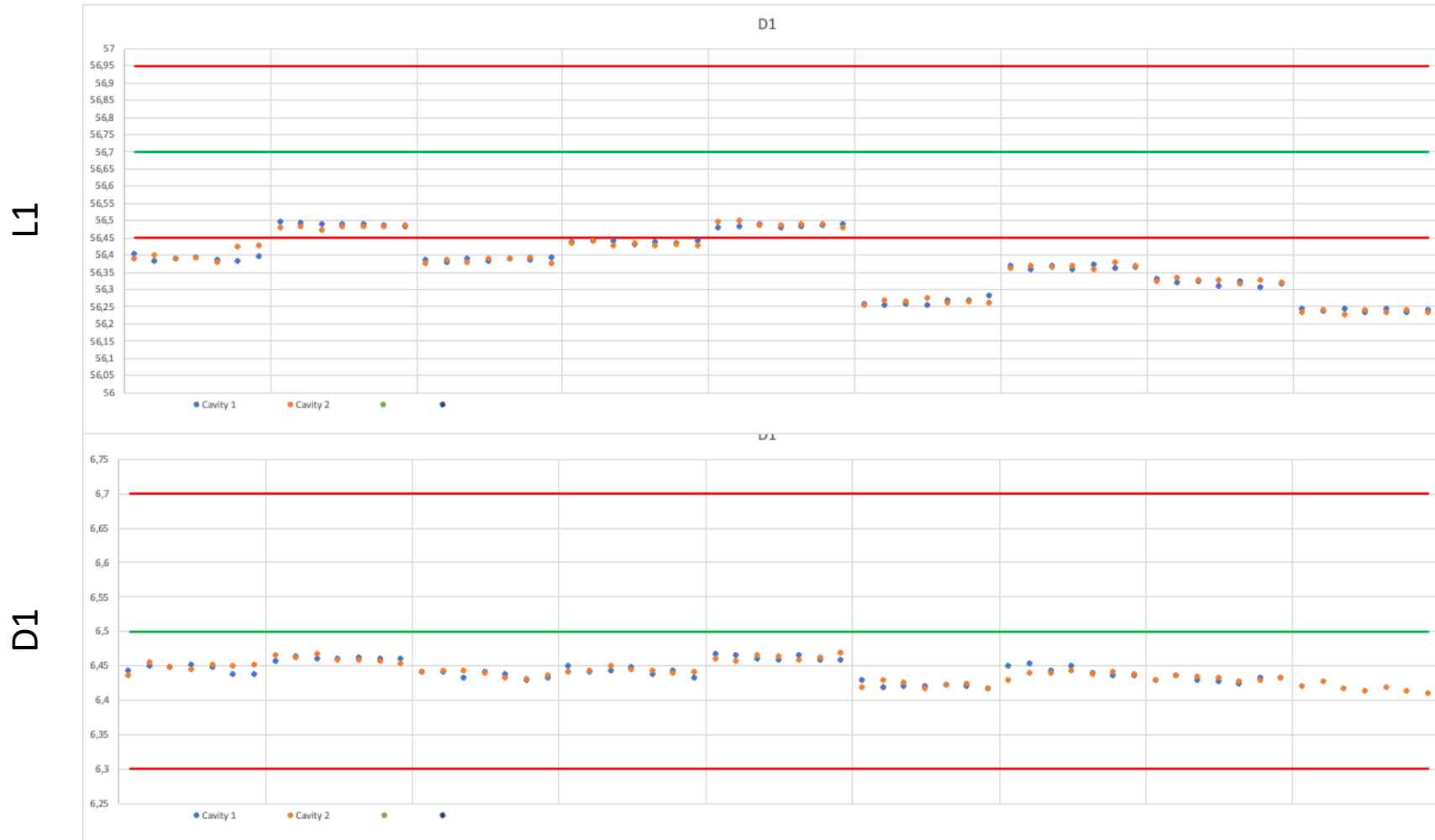
- T_{mold}
- T_{melt}
- p_{nach}
- t_{nach}
- v_{inj}
- t_{cool}



	T_mold °C	T_melt °C	V-inj cm3/s	P_hold bar	t_cool s	t_hold
1	35	230	45	400	9	5,5
2	30	220	30	450	8	7
3	30	220	60	450	10	4
4	30	240	30	350	10	7
5	30	240	60	450	10	7
6	40	220	30	350	8	4
7	40	220	60	350	10	7
8	40	240	30	450	10	4
9	40	240	60	350	8	4

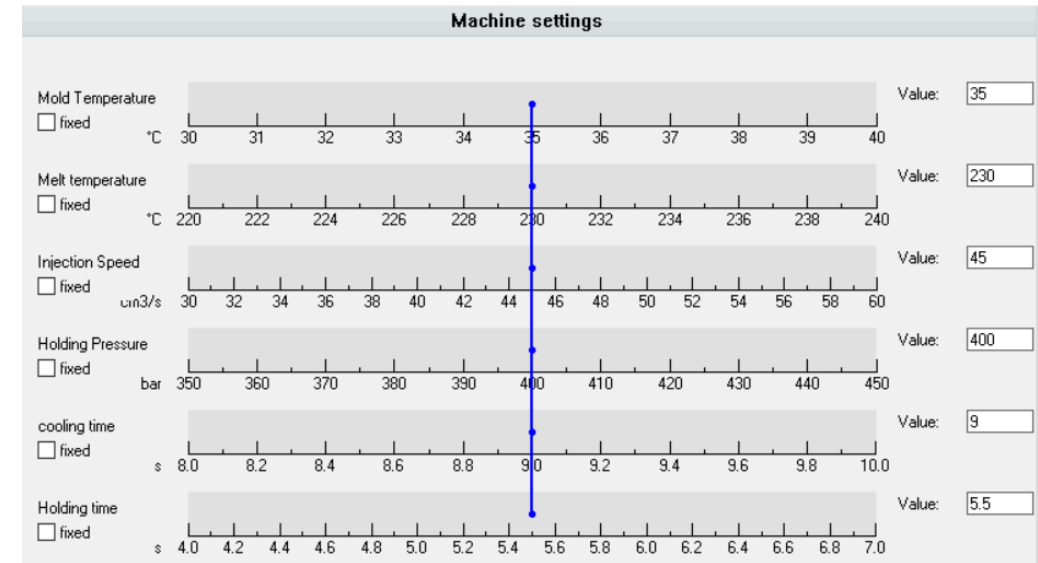
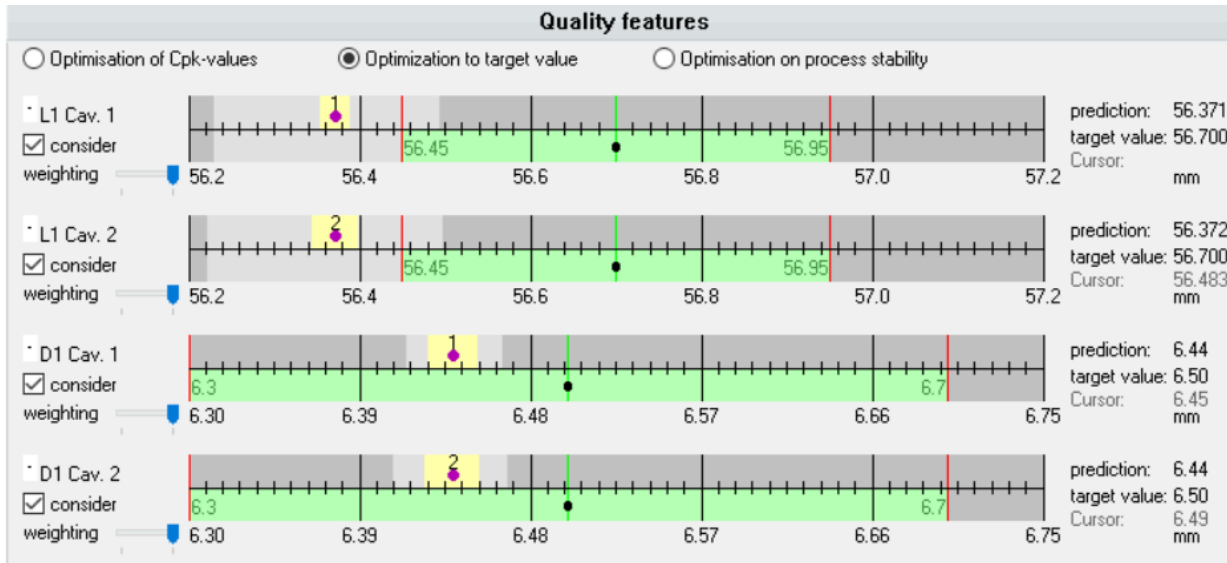
- D-optimaler Versuchsplan (stark reduzierter faktorieller 2 stufiger Plan mit Zentralpunkt)
- Versuchsdurchführung < 2h inkl. Transferzeiten
- 7 Zyklen / Einstellung werden geprüft

Ergebnisse aus der Messung



- L1 grótsteils außerhalb der Toleranz
- D1 geringere Variation in der DoE wegen Schwindungsbehinderung

Qualitätslage vor Optimierung



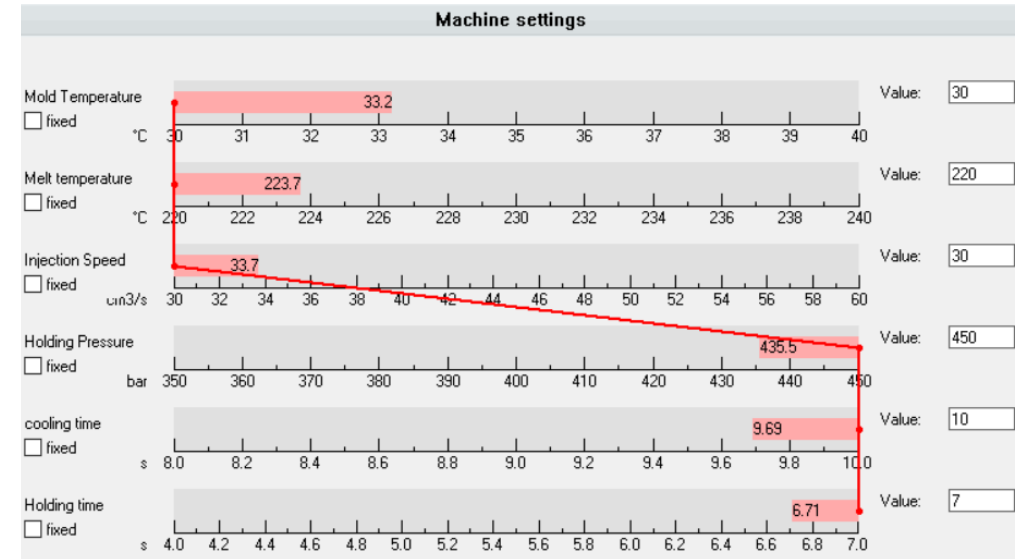
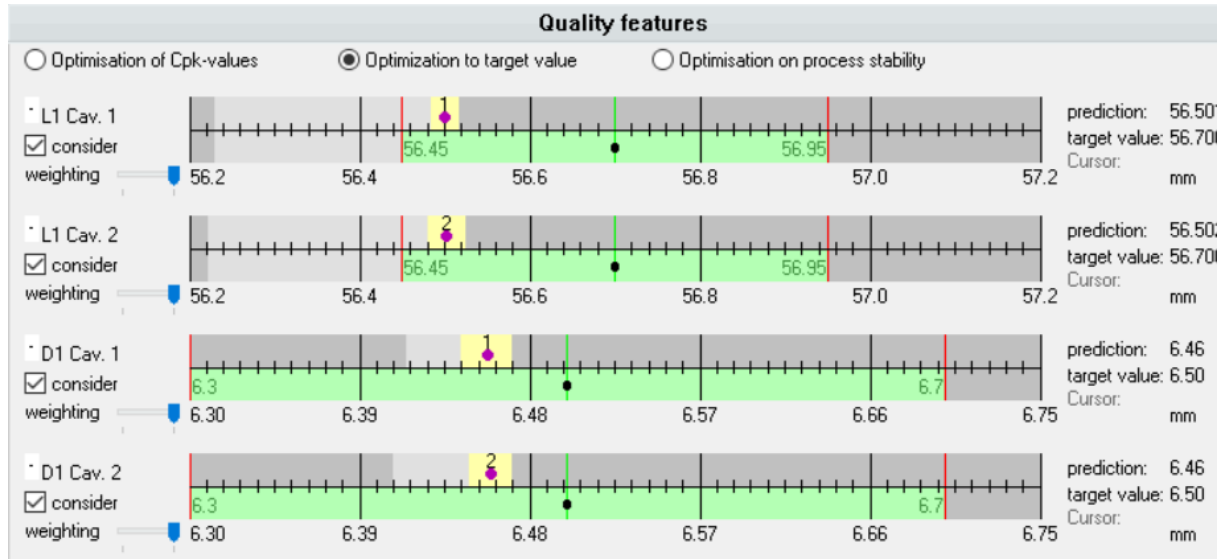
Total estimated process capability index: **-4.47** Please note that this is only an estimation of the process capability.

Process capability estimation okay? **no** Threshold: Cpk-values > 1.33

Quality feature	Cav.	Lower Tolerance	Target	Upper Tolerance	Model value	Cp-value	Cc-value	Cpk-value	Process capability okay?	tool adjustment	value for tool adjustment	potential Cpk after tool adjustment
L1	1	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.371 mm	>10	1.32	-4.47	no	necessary	0.329 mm	>10
L1	2	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.372 mm	9.75	1.31	-2.84	no	necessary	0.328 mm	9.75
D1	1	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.439 mm	>10	0.30	>10	yes	not necessary	0.061 mm	>10
D1	2	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.439 mm	>10	0.30	>10	yes	not necessary	0.061 mm	>10

Bilder: Screenshots STASA QC2022 Software

Qualitätslage nach Optimierung



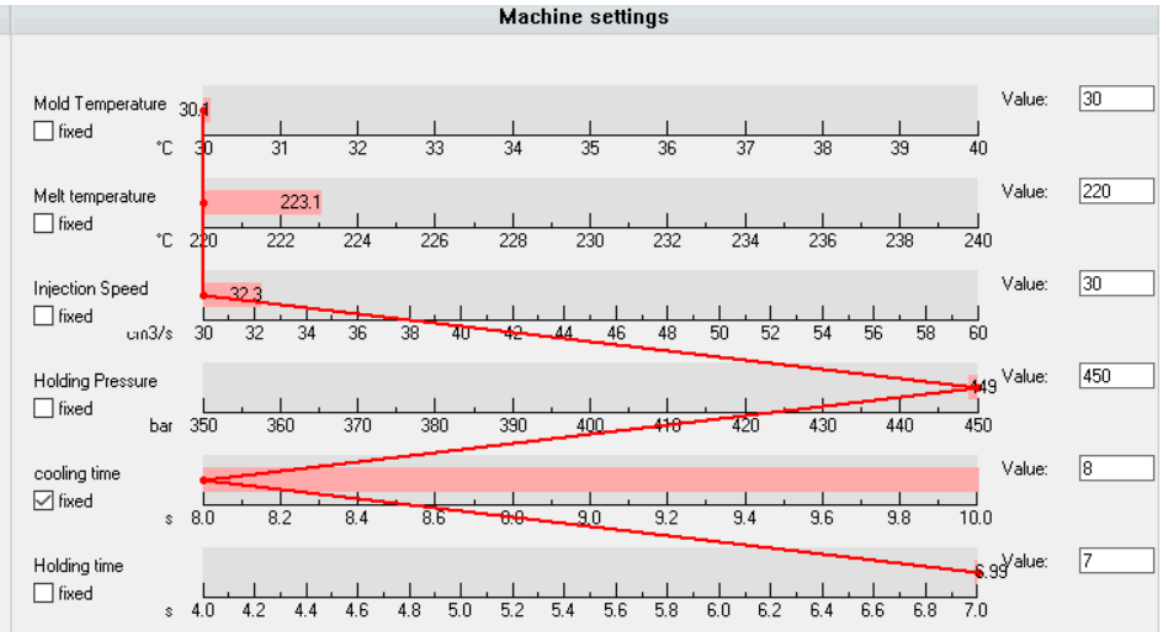
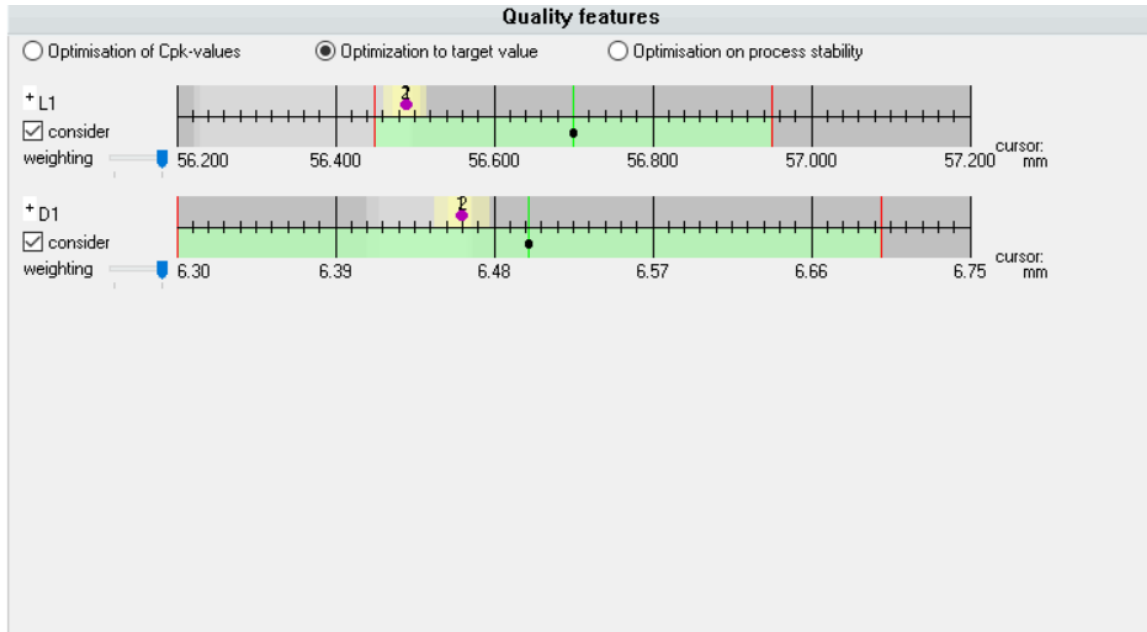
Total estimated process capability index: 2.35 Please note that this is only an estimation of the process capability.

Process capability estimation okay? **yes** Threshold: Cpk-values > 1.33 Legend

Quality feature	Cav.	Lower Tolerance	Target	Upper Tolerance	Model value	Cp-value	Cc-value	Cpk-value	Process capability okay?	tool adjustment	value for tool adjustment	potential Cpk after tool adjustment
L1	1	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.501 mm	>10	0.80	2.96	yes	not necessary	0.199 mm	>10
L1	2	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.502 mm	>10	0.79	2.35	yes	recommended	0.198 mm	>10
D1	1	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.457 mm	>10	0.21	>10	yes	not necessary	0.043 mm	>10
D1	2	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.459 mm	>10	0.20	>10	yes	not necessary	0.041 mm	>10

Bilder: Screenshots STASA QC2022 Software

Qualitätslage nach Optimierung 2



Total estimated process capability index: 1.37 Please note that this is only an estimation of the process capability.

Process capability estimation okay? yes Threshold: Cpk-values > 1.33 Legend

Quality feature	Cav.	Lower Tolerance	Target	Upper Tolerance	Model value	Cp-value	Cc-value	Cpk-value	Process capability okay?	tool adjustment	value for tool adjustment	potential Cpk after tool adjustment
L1	1	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.491 mm	>10	0.84	2.32	yes	recommended	0.209 mm	>10
L1	2	56.45 mm	56.7 mm	56.95 mm	56.488 mm	9.60	0.85	1.37	yes	recommended	0.212 mm	9.60
D1	1	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.461 mm	>10	0.20	>10	yes	not necessary	0.039 mm	>10
D1	2	6.3 mm	6.5 mm	6.7 mm	6.462 mm	>10	0.19	>10	yes	not necessary	0.038 mm	>10

Bilder: Screenshots STASA QC2022 Software



- Typische Optimierziele: Qualität, Energie, Kosten
- Unterschiede Prozessparameter vs. Einstellparameter
- Die Art der Optimierungsmethode ist von der Zieldefinition abhängig
 - Werkzeugoptimierung → Funktion WKZ; QM im Zielgebiet
 - Prozessorientierte Optimierung → robuster Prozess
 - Evolutionsbasierte Optimierung → Korrektur einzelne QM, Wirtschaftlichkeit
 - Optimierung Prozessmodellen → Optimierung in def. Prozessfenster;
Prozessfähigkeit, konkurrierende QM
- Beispiel systematische Optimierung mit Prozessmodellen