

Partikelkontaminationen beim Spritzguss in Reinräumen

Reinraum Innovationsforum 2026

Vortragender

Stephan Puntigam, M.Sc.

Co-Autor*innen

Prof. Dipl.-Ing. Peter Karlinger

Assoc.Prof. Dr.techn. Stefan Radl

- ◆ Spritzgießen ist eines der wichtigsten Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe [1]

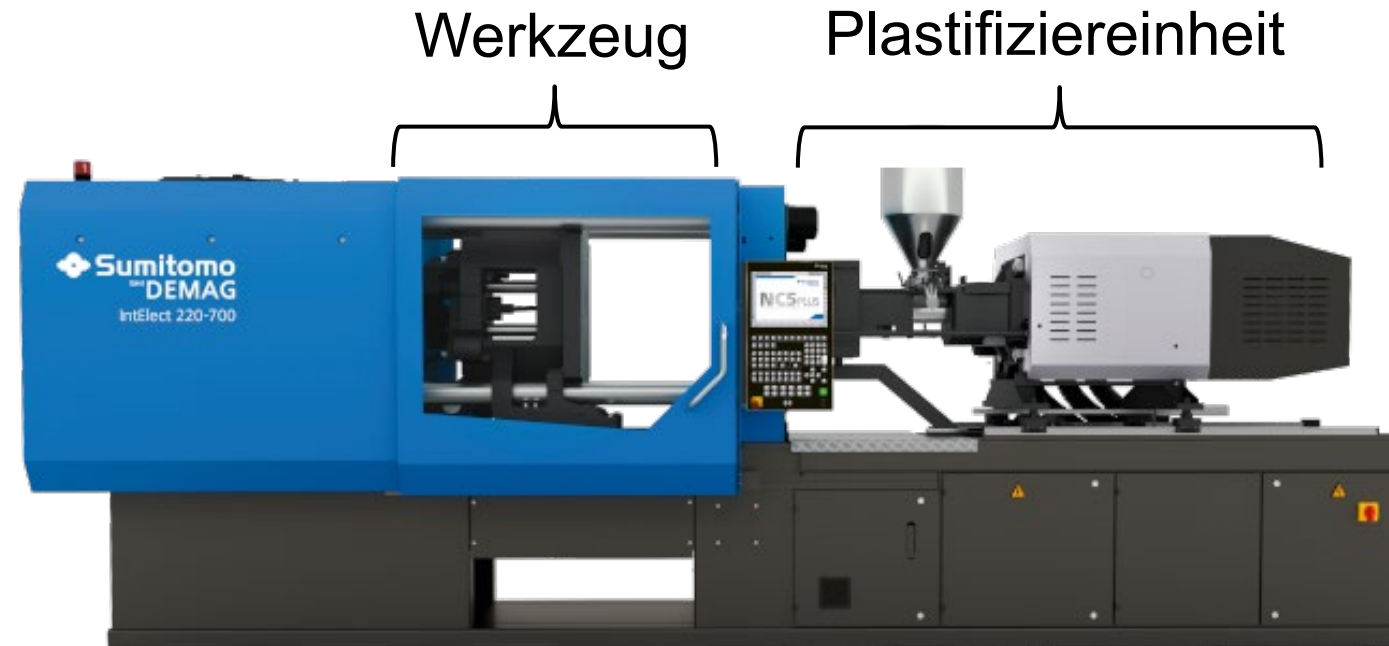
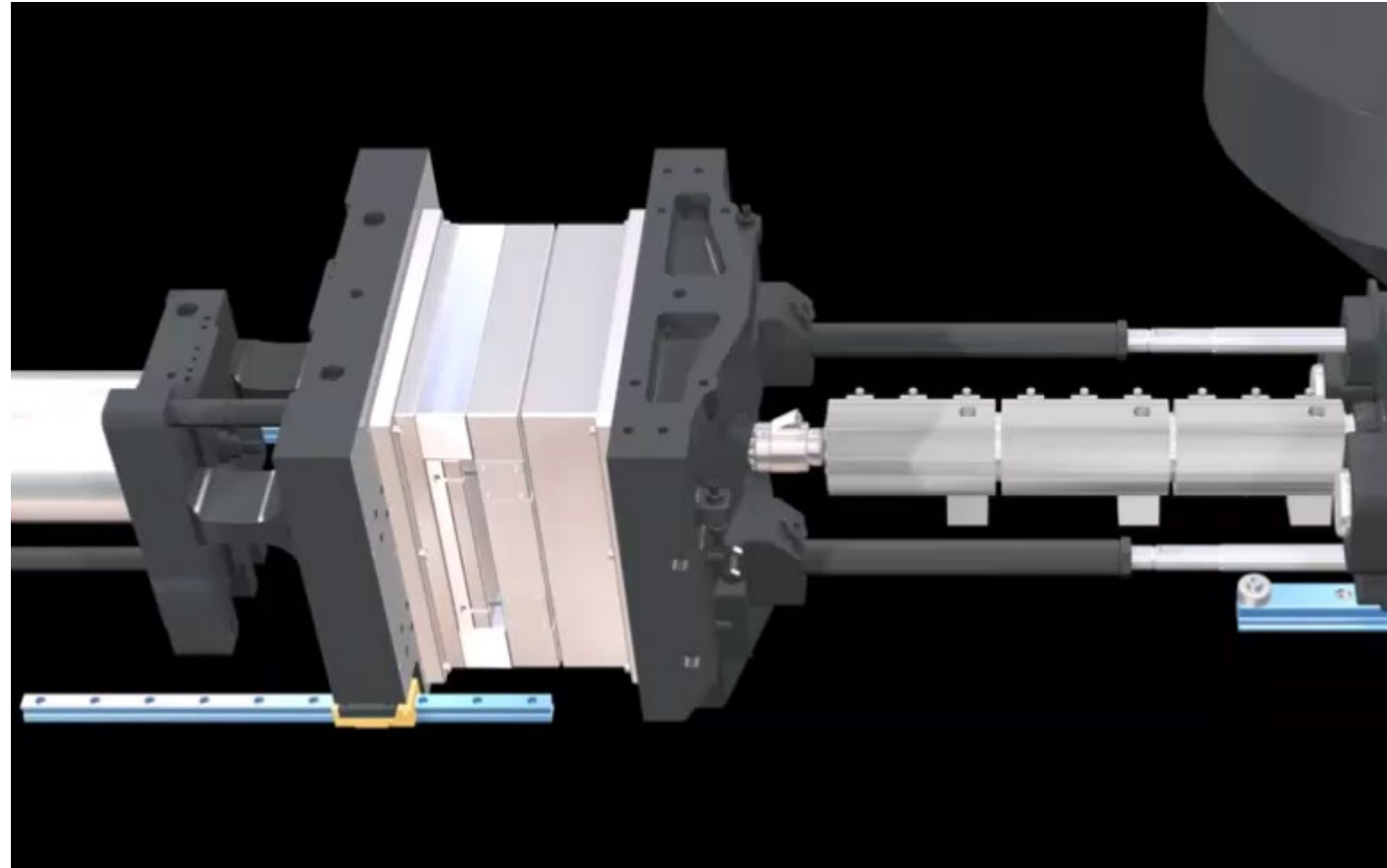


Abbildung: Spritzgussmaschine SumitomoDemag Intellect2 [2]

- ◆ Spritzgießen ist eines der wichtigsten Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe [1]
- ◆ Ablauf eines Zyklus:
 1. Werkzeug schließen
 2. Kunststoffschmelze einspritzen
 3. Werkzeug öffnen
 4. Bauteil entnehmen
- ◆ Oberflächentemperatur des Werkzeugs 20 °C bis 160 °C



Animation: Spritzgussmaschine [3]

- ◆ Kontrollierte Umgebung notwendig für verschiedene Bereiche, z.B. [1]
 - Medizintechnik
 - Optische Bauteile
 - Verpackungen (steril- und nicht steril)

- ◆ Anforderungen an kontrollierte Umgebung
 - Keine luftgetragenen Partikel
 - Verunreinigungen schnell abtransportieren
 - Konstantes und kontrollierbares Klima
 - Kein Eindringen unkontrollierter Luft von außen

- ◆ Diese Anforderungen werden von Reinräumen erfüllt



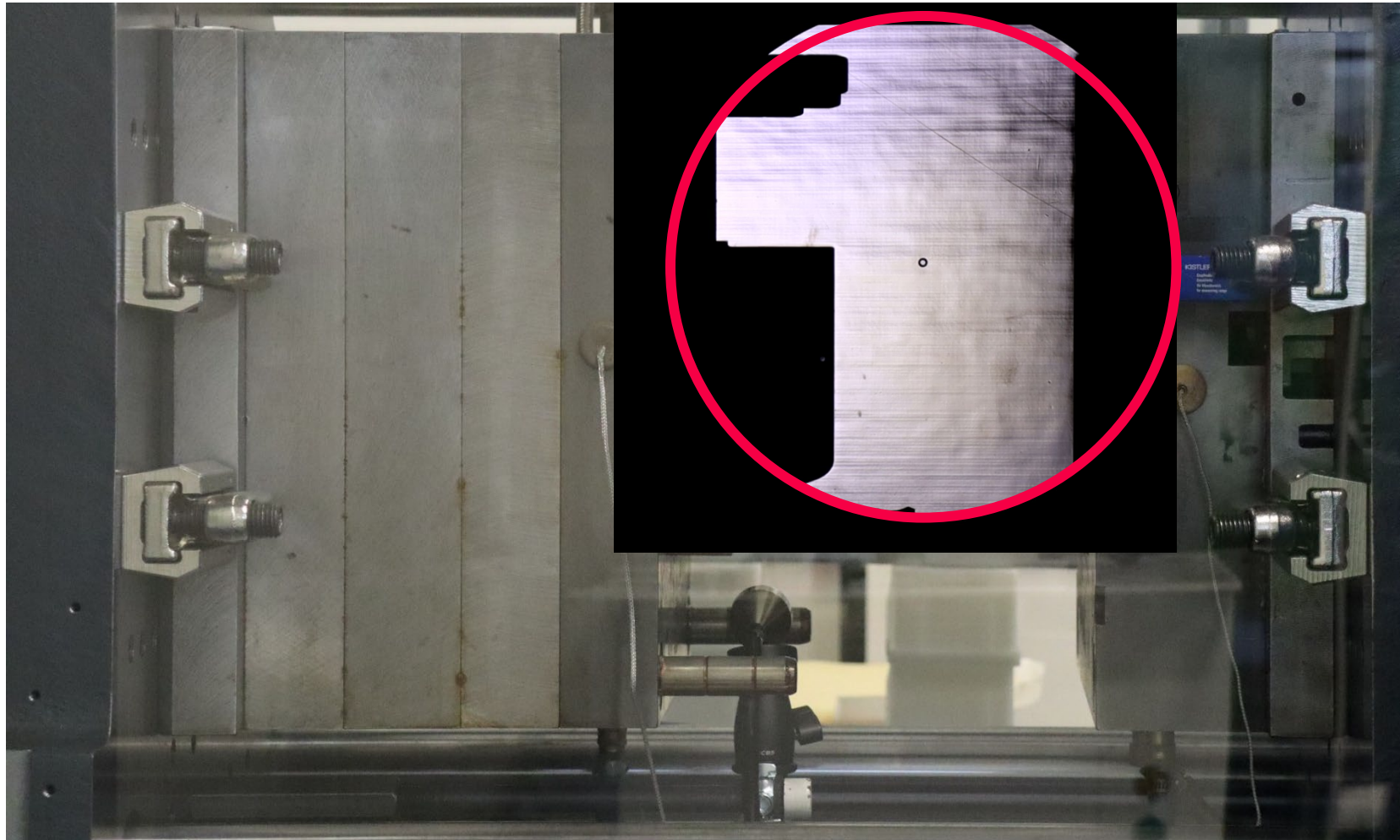
- ◆ Spritzgussmaschinen (SGM) vollständig oder teilweise an den Reinraum angebunden [5]
- ◆ Mit Filter-Fan-Unit (FFU) über dem Werkzeugbereich zusätzlich kontrollierter Bereich möglich [6]
- ◆ Aus Reinraum-Anlagensicht ist die Spritzgussmaschine:
 - Zusätzliche Partikelquelle [8]
 - Wärmelast für die Klimatisierung
 - Hindernis für die Luftströmung im Reinraum

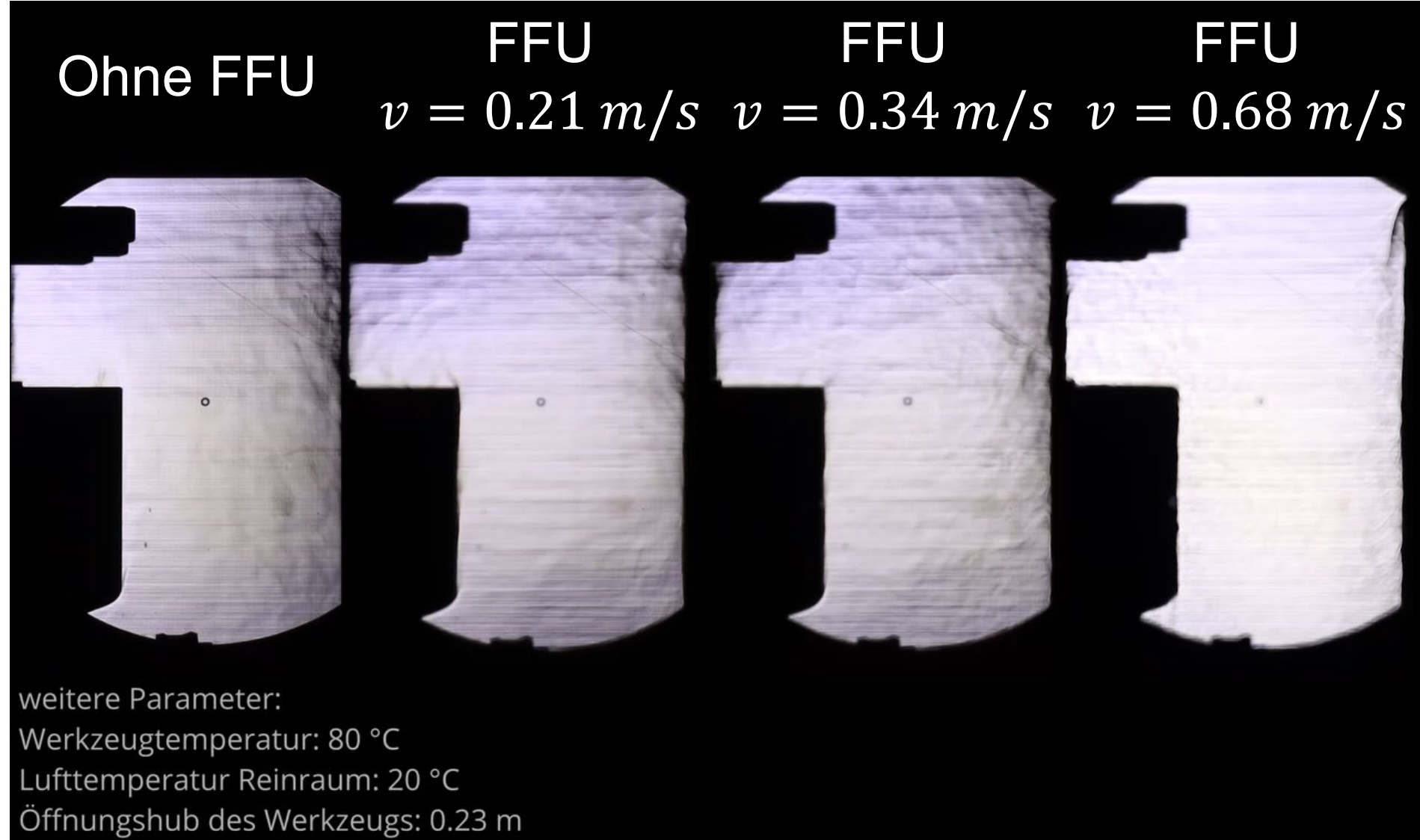


Abbildung: Spritzgussmaschine Engel [7]

Durch Konvektion hervorgerufene Auftriebsströmungen bei **Werkzeugtemperaturen $> 40\text{ °C}$** können zu **Kreuzkontaminationen** führen [5,6].

Konvektionseffekte an der Werkzeugoberfläche



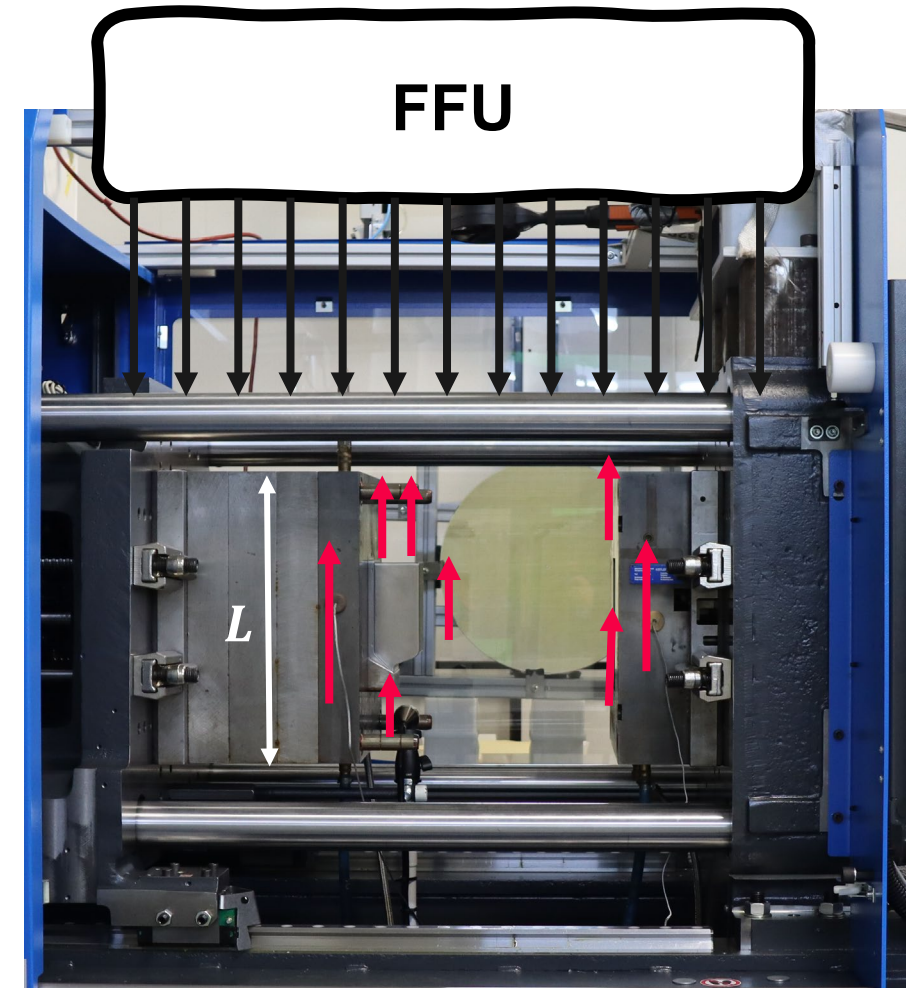


Die Kombination von erzwungener Konvektion (FFU) und freier Konvektion (Werkzeugoberfläche) wird allgemein durch die Archimedes-Zahl Ar beschrieben:

$$Ar = \frac{Lg\beta\Delta T}{w^2}$$

Kritische Ar -Zahlen hängen von untersuchten Fällen ab [9-11]

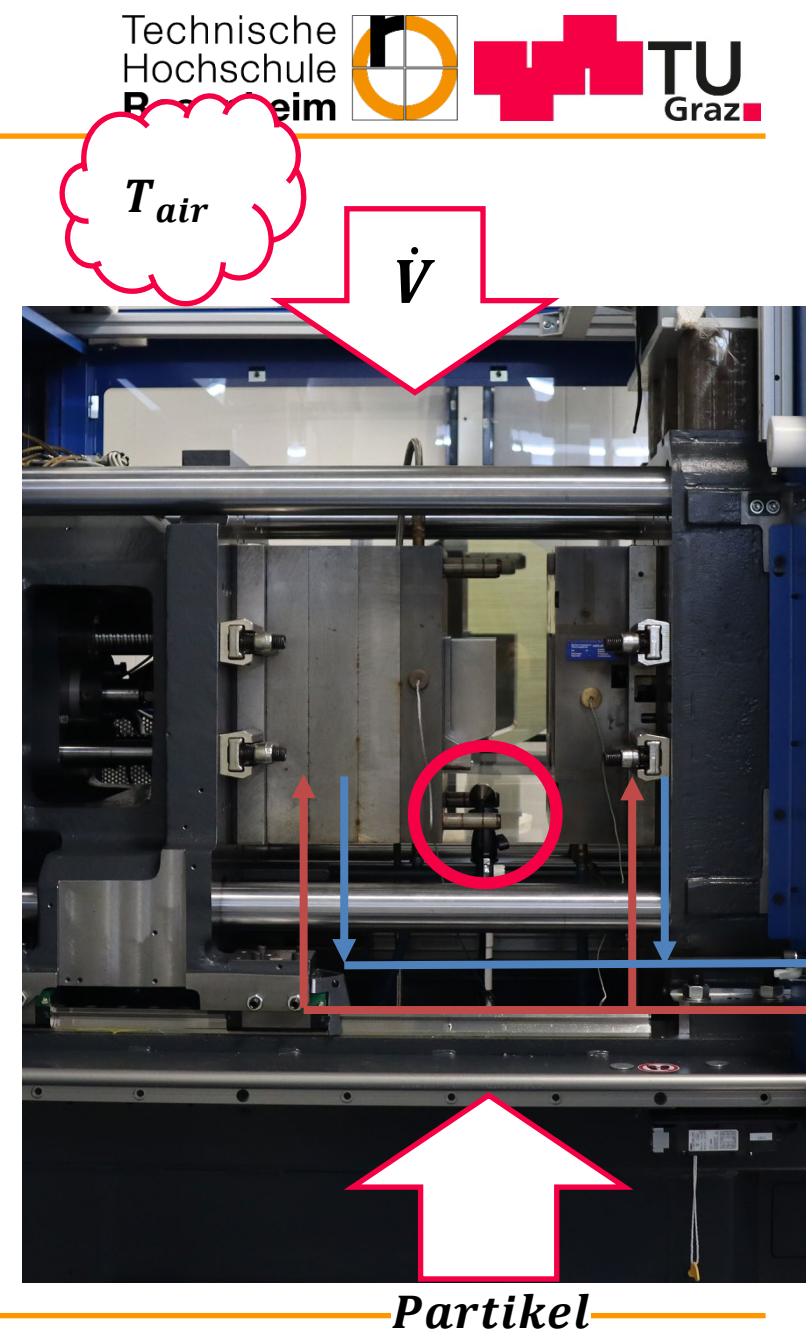
- ◆ Vertikale Wand: $Ar_{krit} = 1 \dots 10$
- ◆ Reinraum: $Ar_{krit} = 25 \dots 1000$
- ◆ Spritzgusswerkzeug: $Ar_{krit} = ?$



Bestimmen der Partikellast als Funktion der Ar-Zahl

Versuchsaufbau

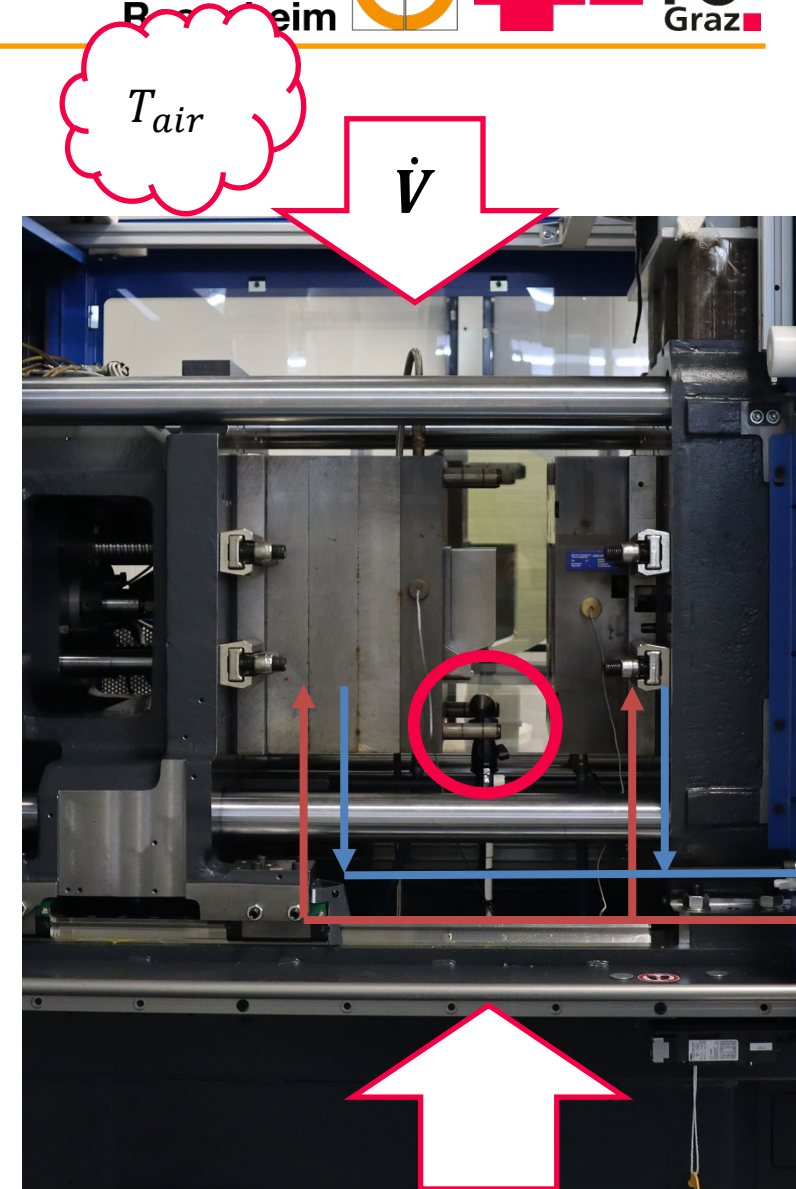
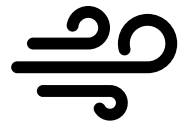
- ◆ Einbringen des Aerosols unterhalb des Werkzeugbereichs
- ◆ Messung der Partikelgrößenverteilung nahe der Kavität
- ◆ Messung des FFU-Volumenstroms (\dot{V})
- ◆ Messung der Lufttemperatur (T_{air})
- ◆ Messung der Werkzeugerwärmung und –temperatur
- ◆ Reinraum im Standardbetrieb
(Luftwechselrate 34, 21 °C, 50 % r.F.)



Bestimmen der Partikellast als Funktion der Ar-Zahl

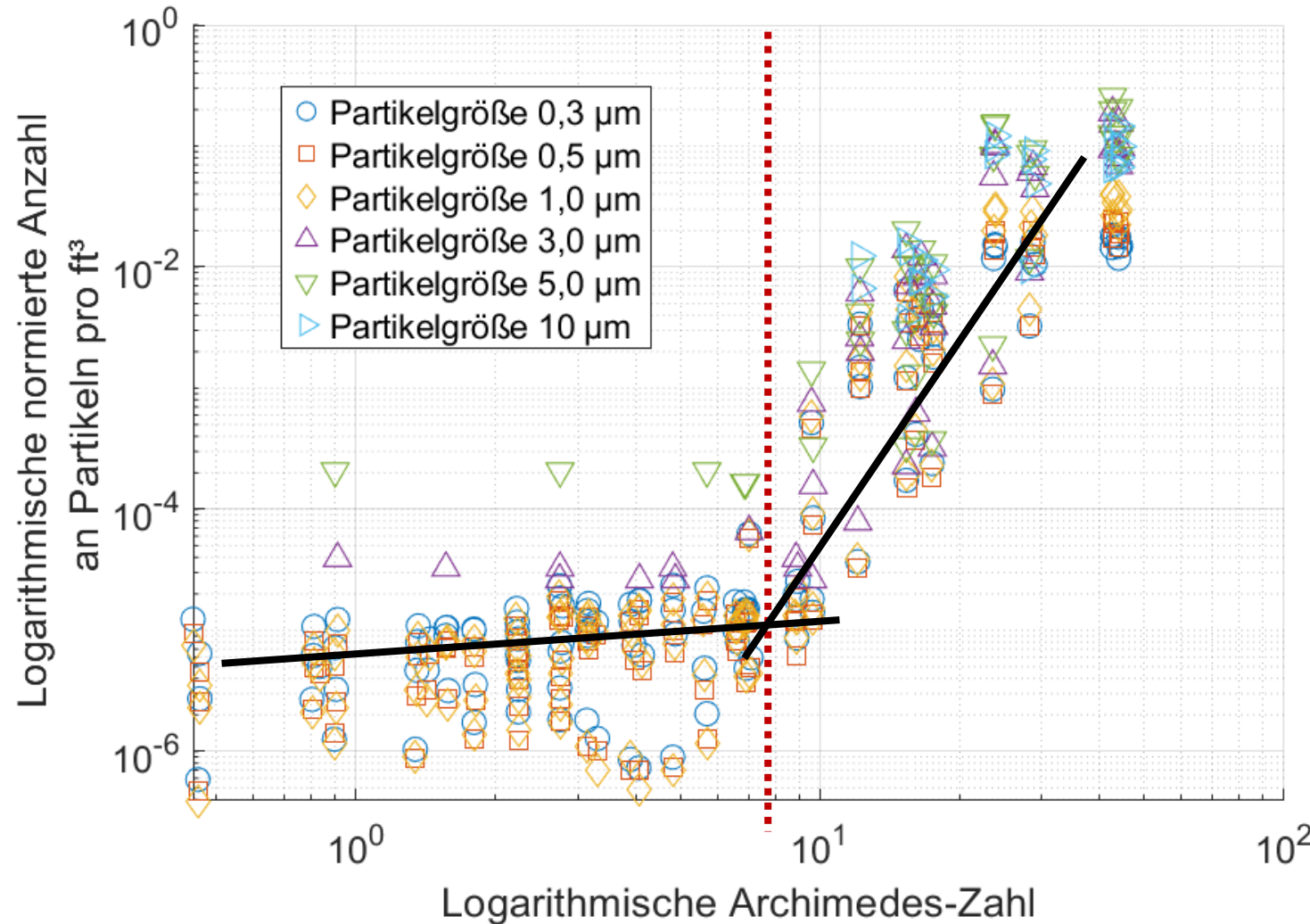
Versuchsplan

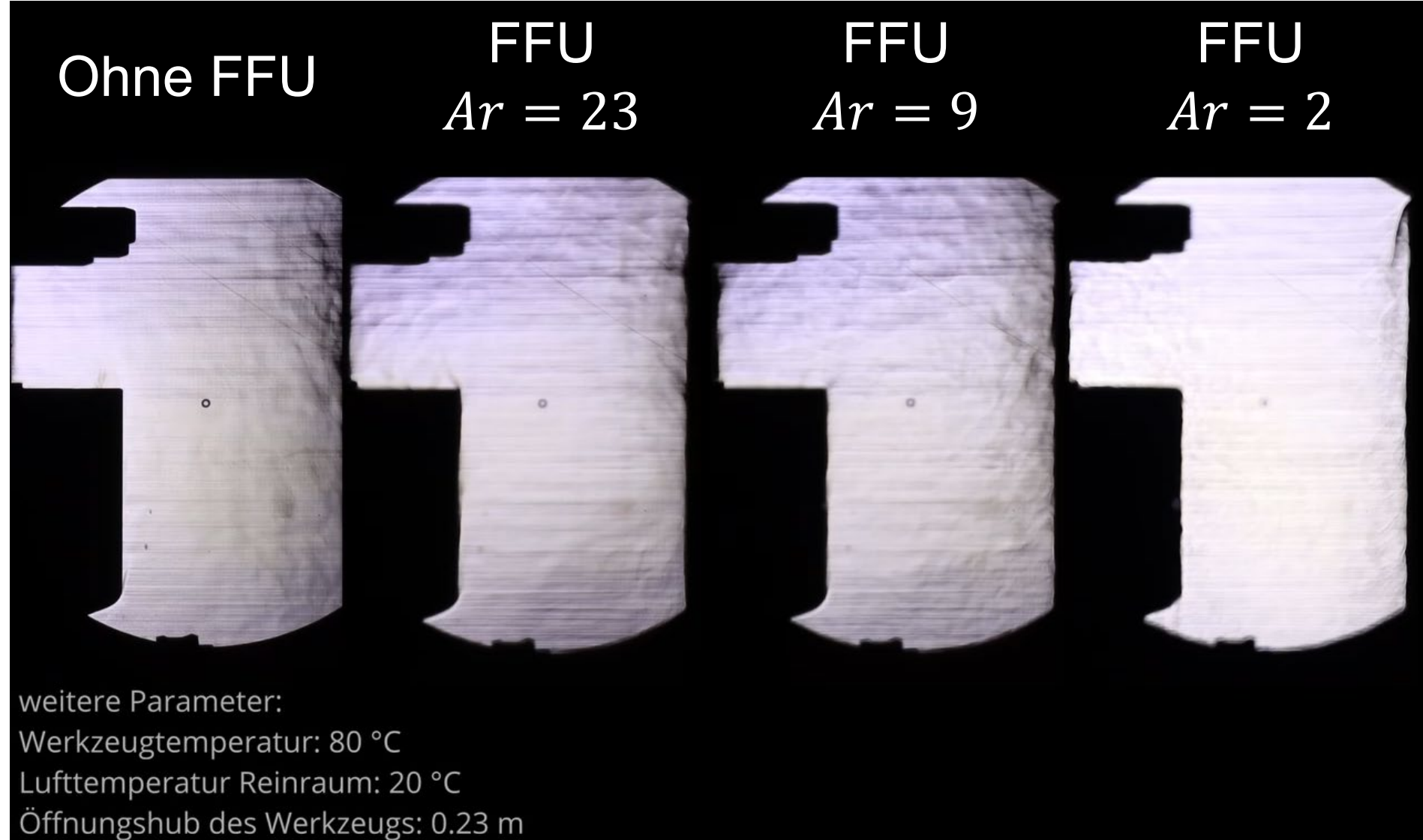
Werkzeug	FFU	Hub
40 °C	no FFU	0,10 m
60 °C	0,22 m/s	0,15 m
80 °C	0,34 m/s	0,23 m
100 °C	0,50 m/s	0,35 m
120 °C	0,67 m/s	↔
140 °C	0,89 m/s	



Normierte Partikellast über Ar-Zahl Betrachtung aller Partikelgrößen

- ◆ $Ar < 10$
 - Relativ konstanter Verlauf
 - Große Streuung
- ◆ $Ar > 10$
 - Stark ansteigende Partikellast
 - Annäherung an Maximum bei 0,1 normierte Partikellast
- ◆ Kritische $Ar \sim 8$





Unter welchen Bedingungen gelangen Partikel in den Werkzeugbereich?

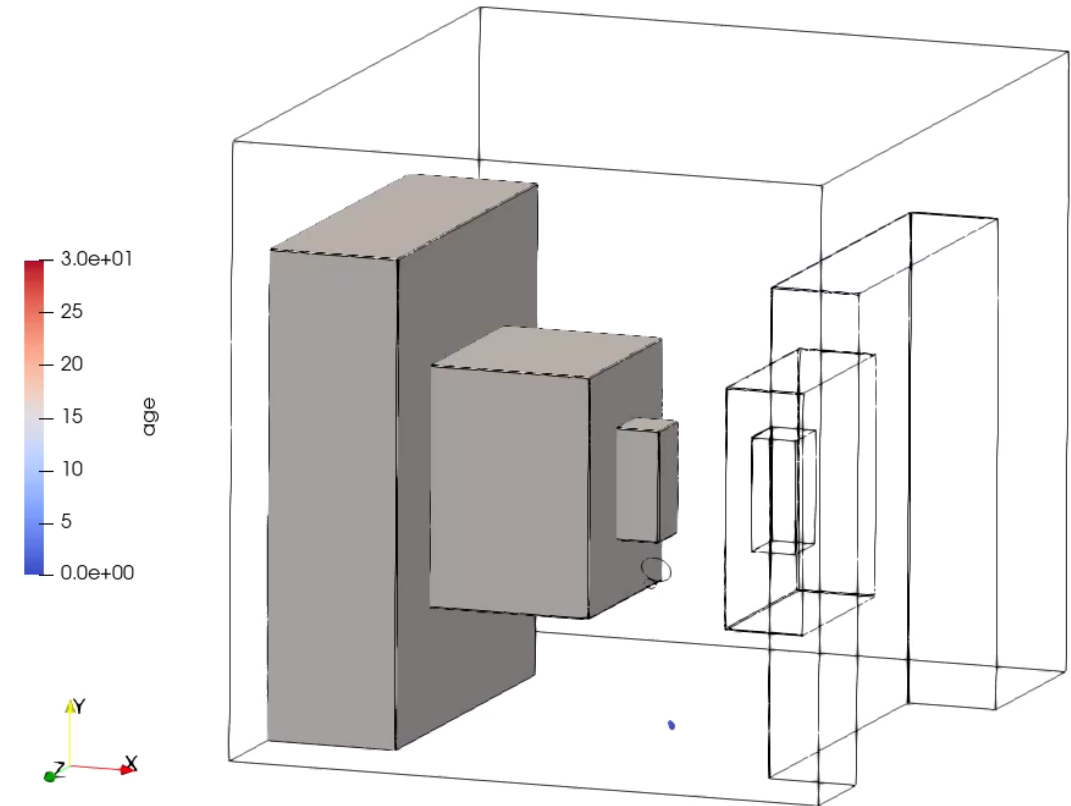
- ◆ Hohe Werkzeugtemperaturen
- ◆ Niedrige FFU-Geschwindigkeiten
- ◆ Hohen Archimedes-Zahlen

Was können wir tun, um dies zu verhindern?

- ◆ FFU-Geschwindigkeit anpassen
- ◆ Wenn nicht vorhanden: FFU nachrüsten
- ◆ Werkzeugtemperatur: wird vom Prozess definiert und kann nicht ausreichend angepasst werden

Weitere Schritte:

- ◆ Variation der Werkzeuggeometrie
 - Weitere Werkzeuggrößen
 - Weitere Kavitäts-Formen
- ◆ CFD-Simulation zur Betrachtung weiterer Variationen
- ◆ Ableiten einer allgemeinen kritischen Archimedes-Zahl



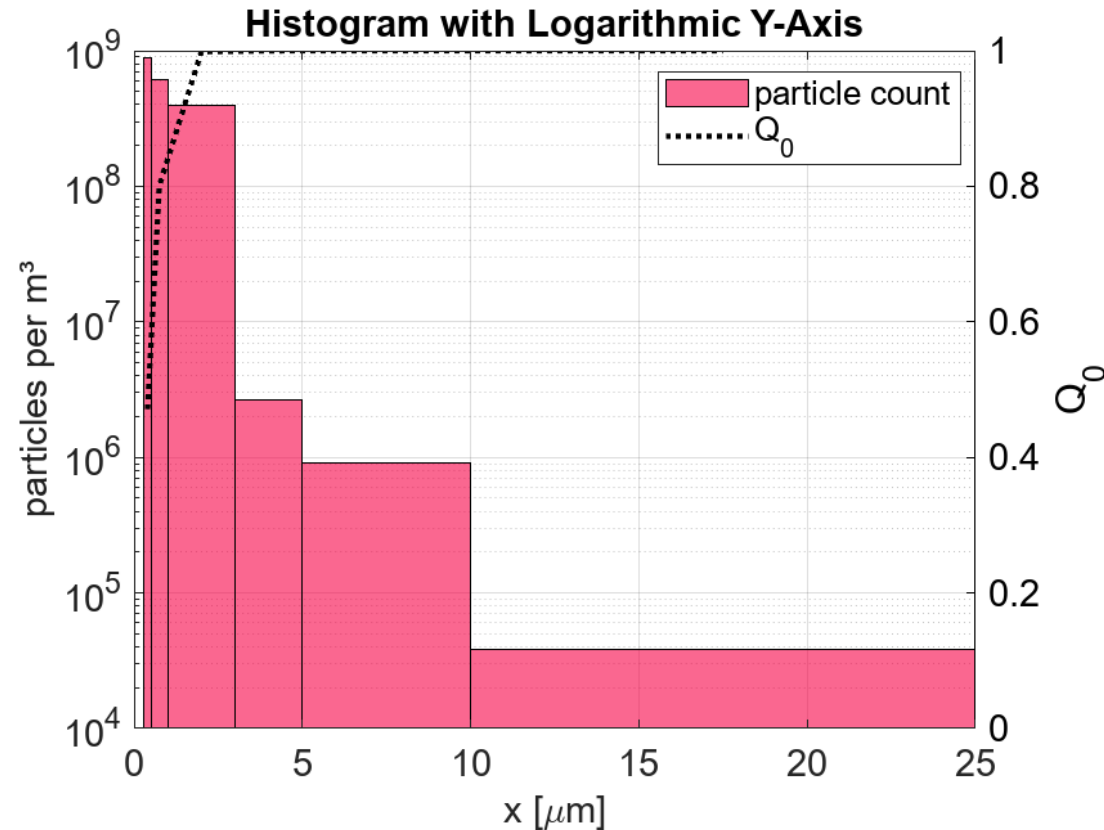
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Stephan Puntigam
stephan.puntigam@th-rosenheim.de
+49 8031 8052265

- ◆ [1] Hopmann, C., Michaeli, W. u. Wolters, L.: Technologie der Kunststoffe. Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. München: Hanser 2021. 978-3-446-46960-0
- ◆ [2] SumitomoDemag. <https://www.sumitomo-shi-demag.eu/de/products/intelect> aufgerufen am 13.01.2026
- ◆ [3] Nortec Maschinenteknik GmbH. <https://www.youtube.com/watch?v=dxr0TRn9ioo>, accessed on 19.09.2022
- ◆ [4] Starlim Sterner. <https://www.starlim-sterner.com/unternehmen/branchen/life-science/>, accessed on 16.06.2025
- ◆ [5] Puntigam, S.: Einfluss der Abwärme des Spritzgusswerkzeugs auf die Produktion unter Reinraumbedingungen. 27. Technomer 2021. Chemnitz 2021
- ◆ [6] Bürkle, E., Karlinger, P. u. Wobbe, H.: Reinraumtechnik in der Spritzgießverarbeitung. München: Carl Hanser Verlag; CARL HANSER Verlag GMBH & 2013. 978-3-446-43428-8
- ◆ [7] Quelle fehlt
- ◆ [8] Bürkle, E. u. Dittel, G.: Produktionssicheres Spritzgießen im ISO5/GMP-A-Reinraum. Kunststoffe (2005), S. 138–143
- ◆ [9] Hofer, V.: Zum kontaminierten Raumvolumen von Partikel und Wärmequellen in laminarer Verdrängungsströmung, Technische Universität Berlin Dissertation. Berlin 2019
- ◆ [10] Zhang, J., Liu, J. u. Lu, W.: Study on Laminar Natural Convection Heat Transfer from a Hemisphere with Uniform Heat Flux Surface. Journal of Thermal Science 28 (2019) 2, S. 232–245; doi: 10.1007/s11630-018-1051-y
- ◆ [11] Motegi, K., Sibamoto, Y., Hibiki, T., Tsukamoto, N. u. Kaneko, J.: Opposing Mixed Convection Heat Transfer for Turbulent Single-Phase Flows. International Journal of Energy Research 2024 (2024), S. 1–22; doi: 10.1155/2024/6029412

- ◆ Gerät: Topas ATM 222
- ◆ Material: DEHS
- ◆ Dichte: 910 kg/m^3

i	x min [μm]	x max [μm]	ΔQ_0	Q_0
1	0.3	0.5	0.4651	0.4651
2	0.5	1	0.3238	0.7889
3	1	3	0.2092	0.9981
4	3	5	0.0014	0.9995
5	5	10	0.0005	1.0000
6	10	25	0.0000	1.0000



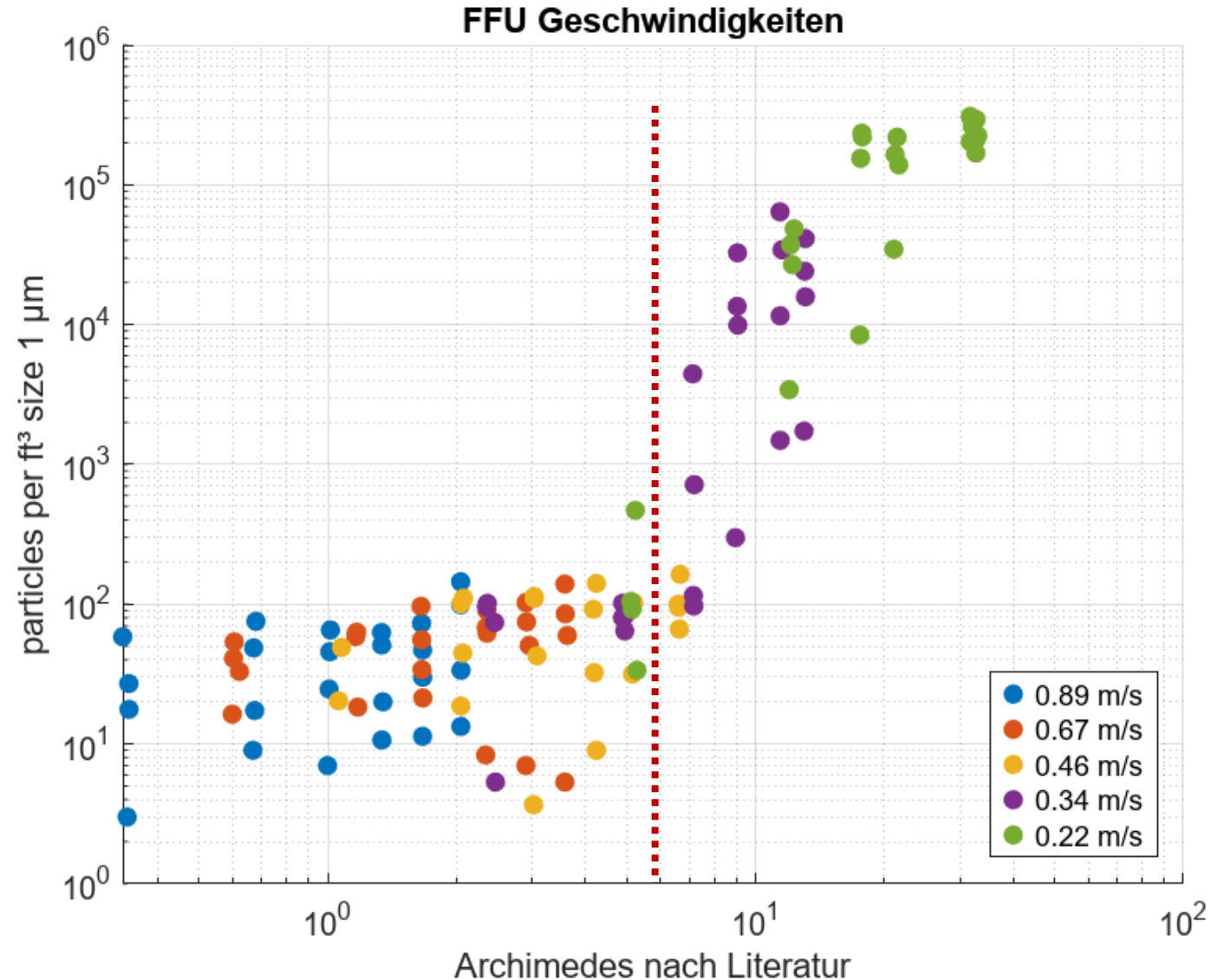
<https://www.topas-gmbh.de/produkte/generierung/produkt/atm-222>

Für das betrachtete Werkzeug ist eine

- ◆ Geschwindigkeit von 0.46 m/s für eine maximale
- ◆ Werkzeugtemperatur von 140 °C ausreichend.

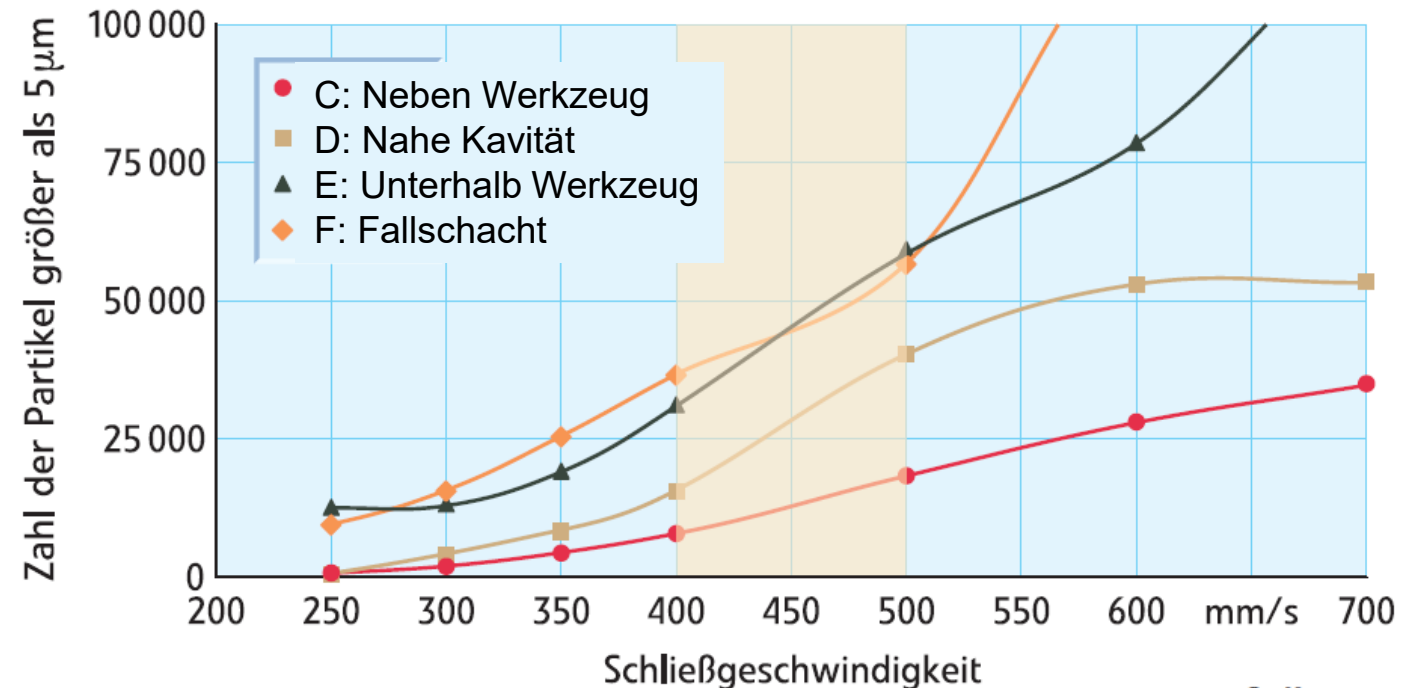
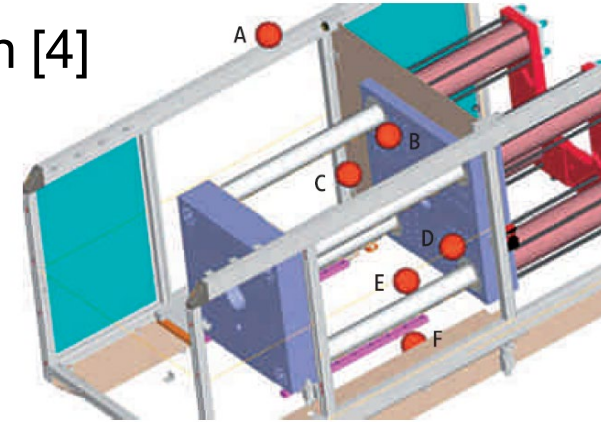
Erhöhung der Werkzeugtemperatur:

°C	Ar
140	7.5
160	8.7
180	10.0
200	11.2



Partikellast im Werkzeugbereich – Maschinenbewegungen [4]

- ◆ Werkzeug öffnen: Luft wird in den Bereich der Kavität gesaugt
- ◆ Werkzeug schließen: Luft wird wegdrückt
- ◆ Dadurch entstehen Kreuzkontaminationen und die Partikellast im Bereich der Kavität steigt mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Werkzeugs



- ◆ Temperaturdifferenz nicht trivial, deshalb Formulierung von ΔT über die konvektive Wärme

$$Ar = \frac{Lg\beta\Delta T}{w^2} = \frac{Lg\beta}{w^2} \frac{L\dot{Q}}{A\lambda Nu}$$

- ◆ Daraus abgeleitet dimensionslose Werkzeuggröße

$$\Pi_{mold} = \frac{L^2}{A}$$

- ◆ Näherung des konvektiven Wärmestroms für Frontfläche und Kavität führt zu

$$\dot{Q} = Nu * \lambda * (T_{wkz} - T_{luft}) * \left[\frac{A_{kav}}{h_{kav}} + \frac{1}{2} \frac{A_{front}}{h_{front}} \right]$$

- ◆ Dimensionslose Temperatur

$$\Pi_{temp} = \beta * (T_{wkz} - T_{luft})$$

- ◆ Charakteristische Länge

$$L_{conv} = \left[\frac{A_{kav}}{h_{kav}} + \frac{1}{2} \frac{A_{front}}{h_{front}} \right]$$

Durch Konvektion hervorgerufene Auftriebsströmungen bei Werkzeugtemperaturen $> 40\text{ °C}$ können zur **Strömungsumkehr** und damit zur Gefahr von **Kreuzkontamination** führen [5,6].



Die Kombination von erzwungener Konvektion (FFU) und freier Konvektion (Werkzeugoberfläche) wird allgemein durch die Archimedes-Zahl Ar beschrieben:

$$Ar = \frac{Lg\beta\Delta T}{w^2} = \frac{Lg\beta}{w^2} \frac{L\dot{Q}}{A\lambda Nu}$$

Kritische Ar -Zahlen hängen von untersuchten Fällen ab [9-11]

L : charakteristische Länge

g : Erdbeschleunigung

β : Wärmeausdehnungskoeffizient der Luft

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Form und Luft

w : Strömungsgeschwindigkeit FFU

