

# Kalte additive Pulverbettprozesse für die skalierbare Fertigung funktionalisierter Kunststoffe

**Samuel Schlicht, M.Sc., M.Sc.**

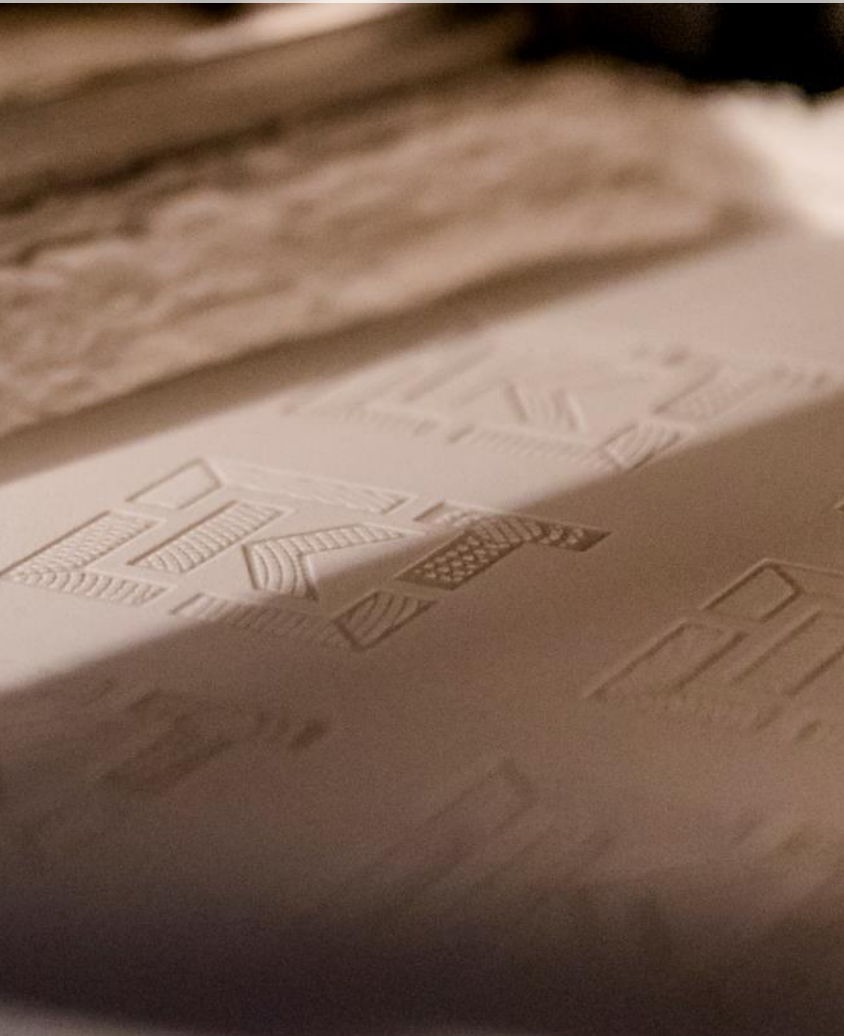
**Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer**

Lehrstuhl für Kunststofftechnik | Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Am Weichselgarten 10 | 91058 Erlangen

# Additive Fertigung am LKT

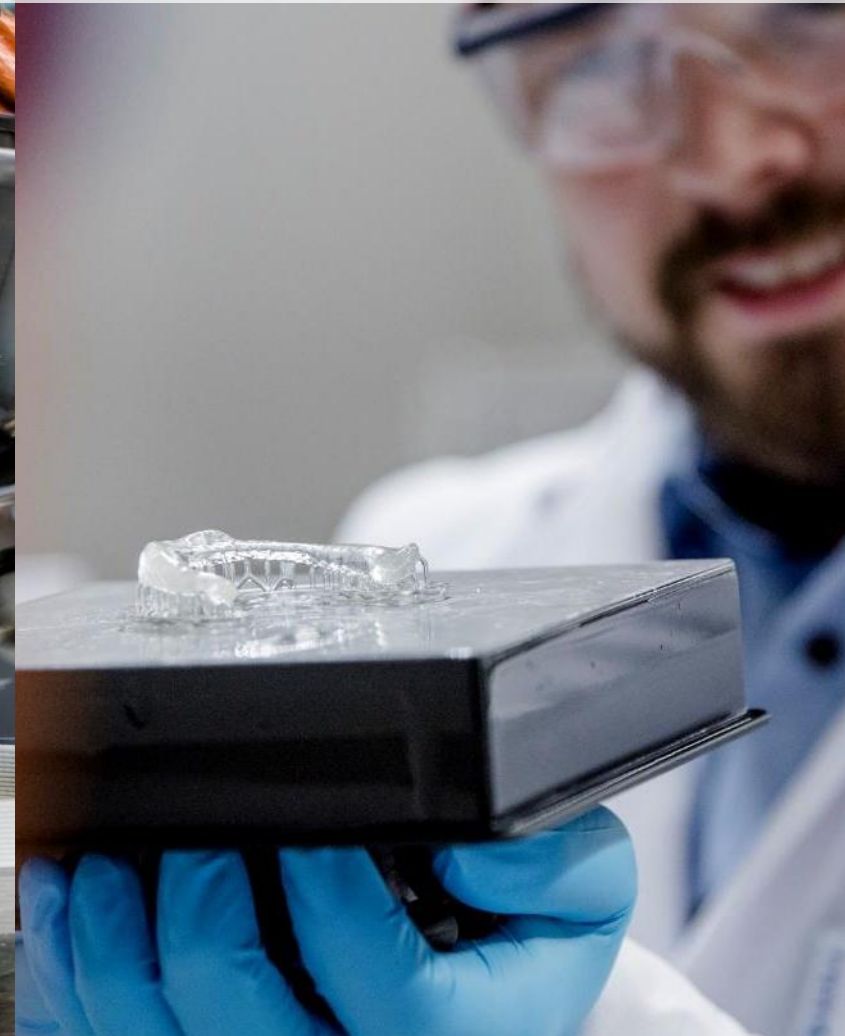
Pulverbasierte Additive Fertigung



Großformatige Additive Fertigung



Flüssigphasenbasierte Additive Fertigung





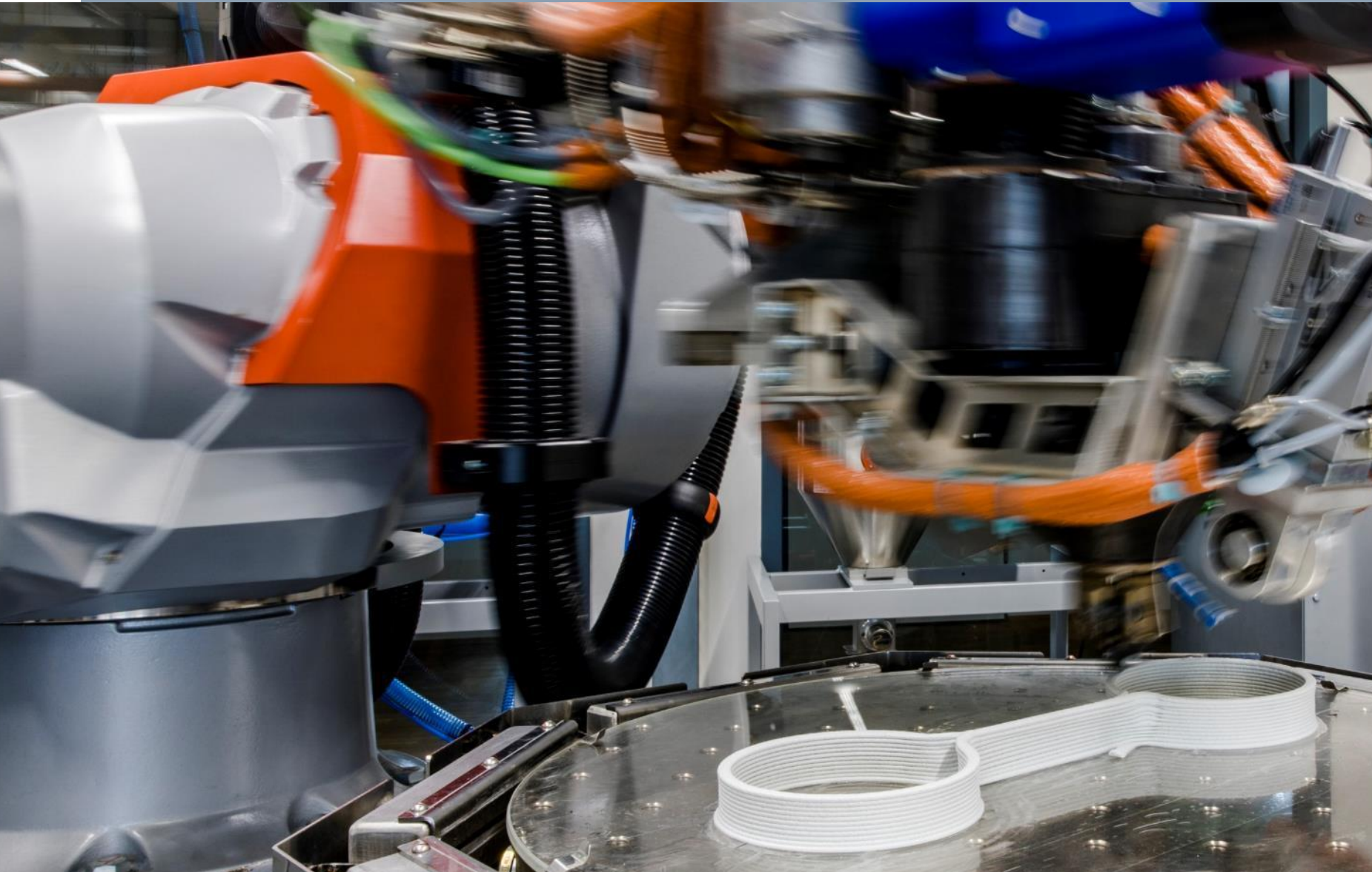
Maßgeschneiderte  
Werkstoffe  
Gefüllte Werkstoffe  
Reaktive Werkstoffe

Prozessoptimierung und  
neue Prozessstrategien

Prozessintegrierte  
Bauteilfunktionalisierung

Prozess-Geometrie-  
Optimierung und  
Eigenschafts-  
homogenisierung

# Extrusionsbasierte Additive Fertigung



Kontinuierliche  
Faserverstärkung

Hybride Fertigung und  
Einlegerintegration

Prozessintegrierte  
Bauteilfunktionalisierung

Großserienfertigung





Maßgeschneiderte  
Vernetzungskinetik

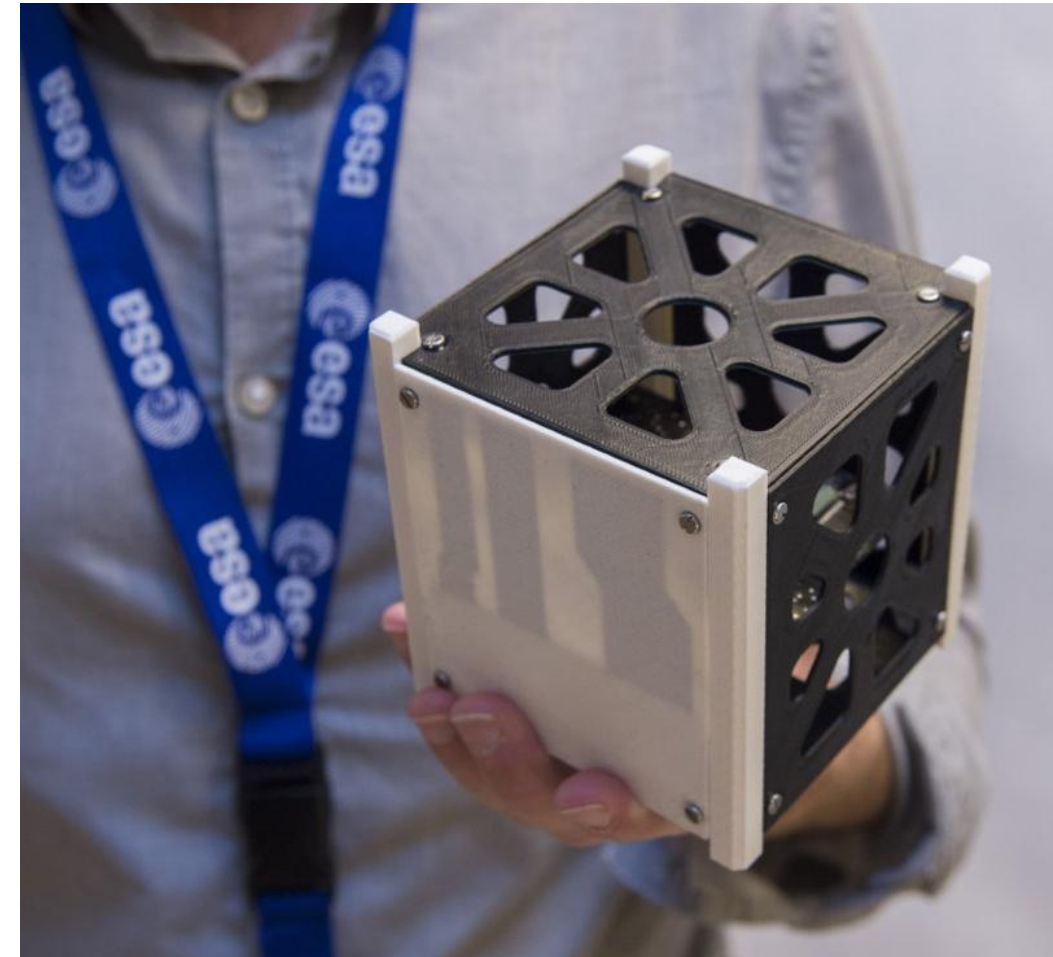
Prozessoptimierung

Mehrkomponenten-  
bauteile

Materialentwicklung und  
anwendungsspezifische  
Optimierung

## PEEK-CF-Verbundwerkstoffe in Raumfahrtanwendungen

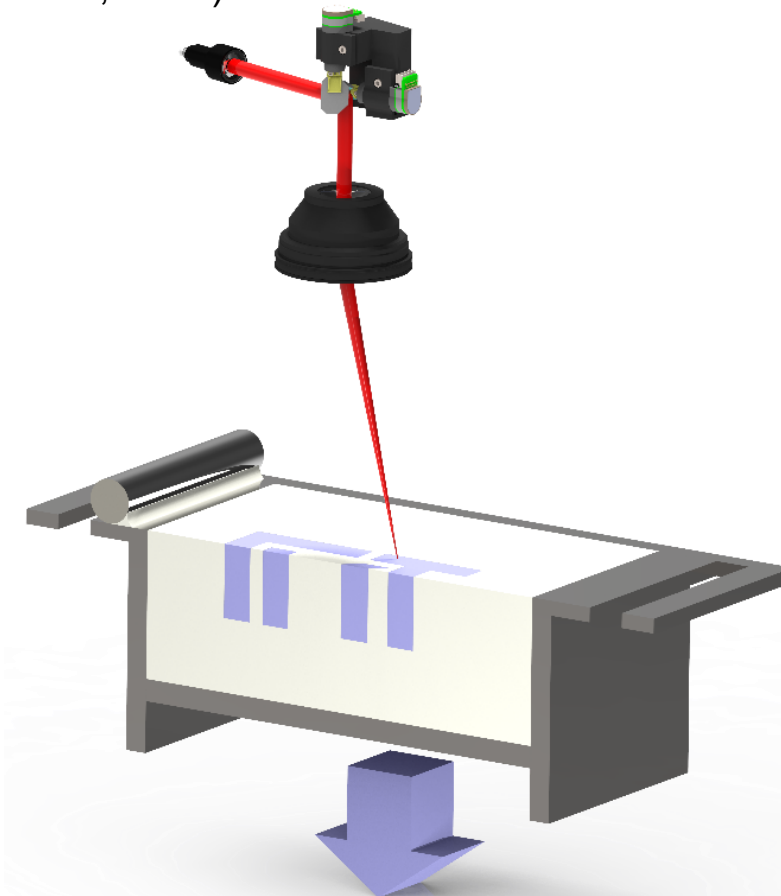
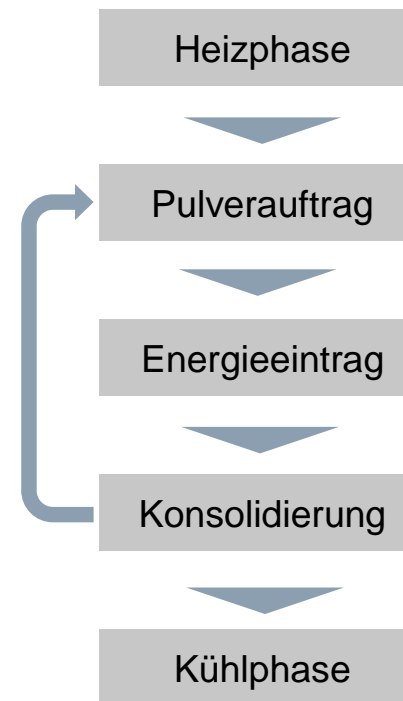
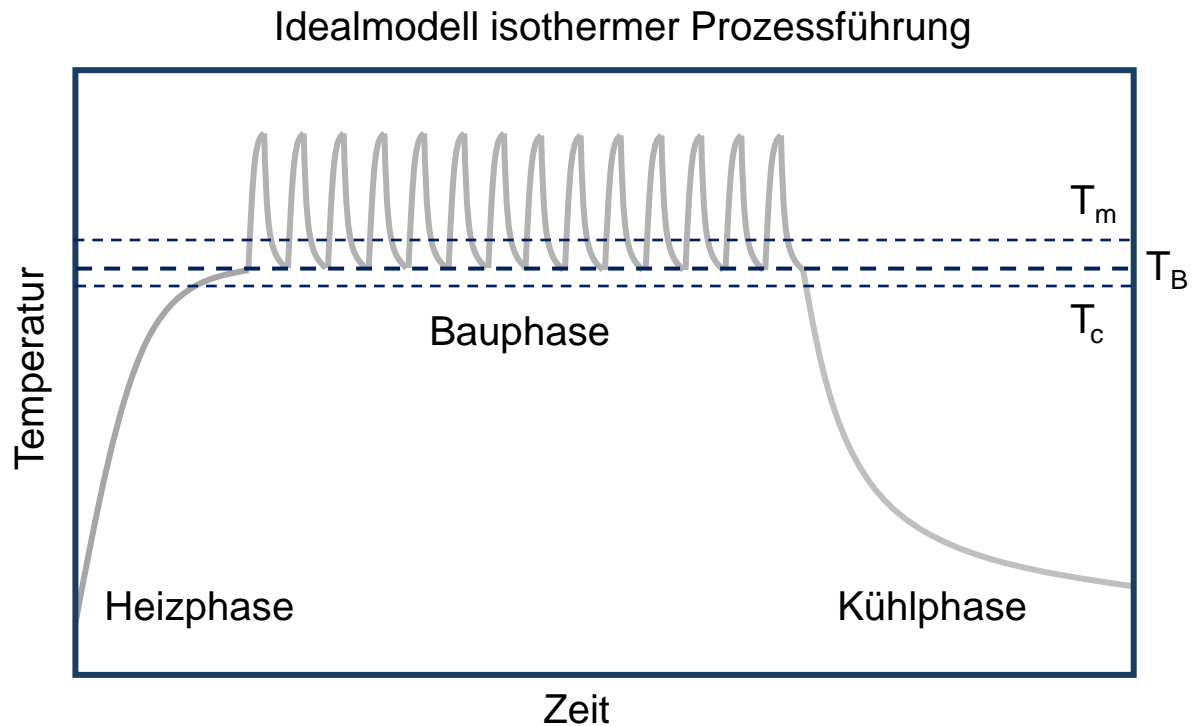
- CubeSats als kostengünstige Möglichkeit für weltraumgestützte Kommunikation und Forschung
  - Etablierte Herstellung durch Zerspanung von Aluminiumwerkstoffen
    - Unzureichende Kontrolle thermischer Ausdehnung
    - Hohe Zerspanvolumina
    - Unzureichende Geometriefreiheit und Erfordernis von Fügeprozessen
  - Eingeschränkte Geometriefreiheit und Skalierbarkeit in strangablegenden additiven Fertigungsprozessen
- ▶ Pulverbettbasierte Fertigung komplexer Strukturen als Lösungsansatz für funktionsintegrierte Bauteile



European Space Agency

## Verzugsminimierung durch *quasi-isotherme* Prozessstrategien

- Schichtweiser Bauteilaufbau durch räumlich selektives, laserbasiertes Erschmelzen (Schmid, 2018)



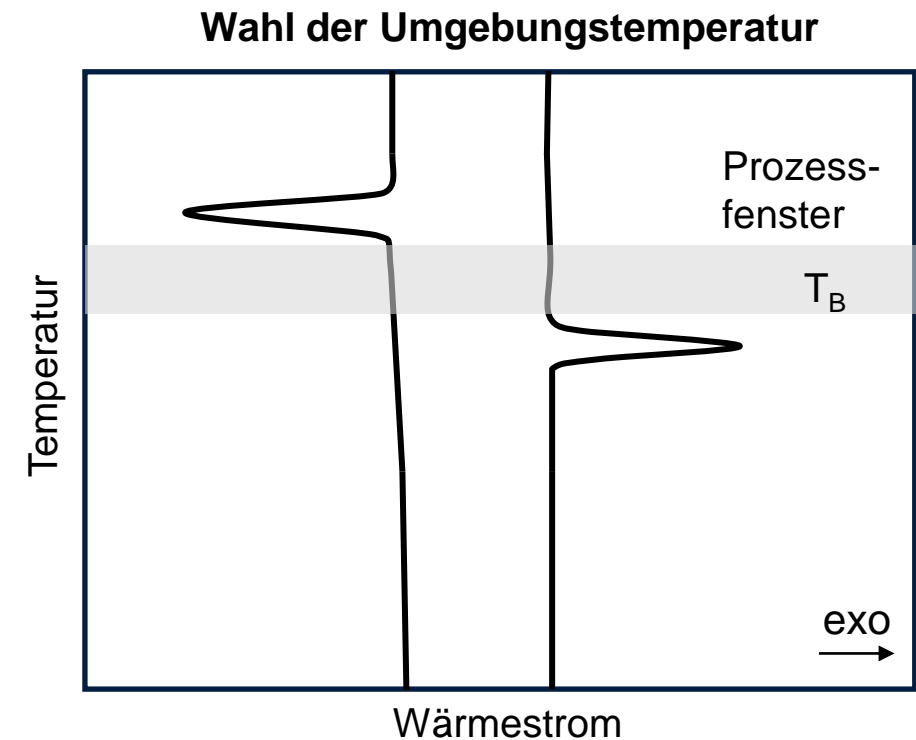
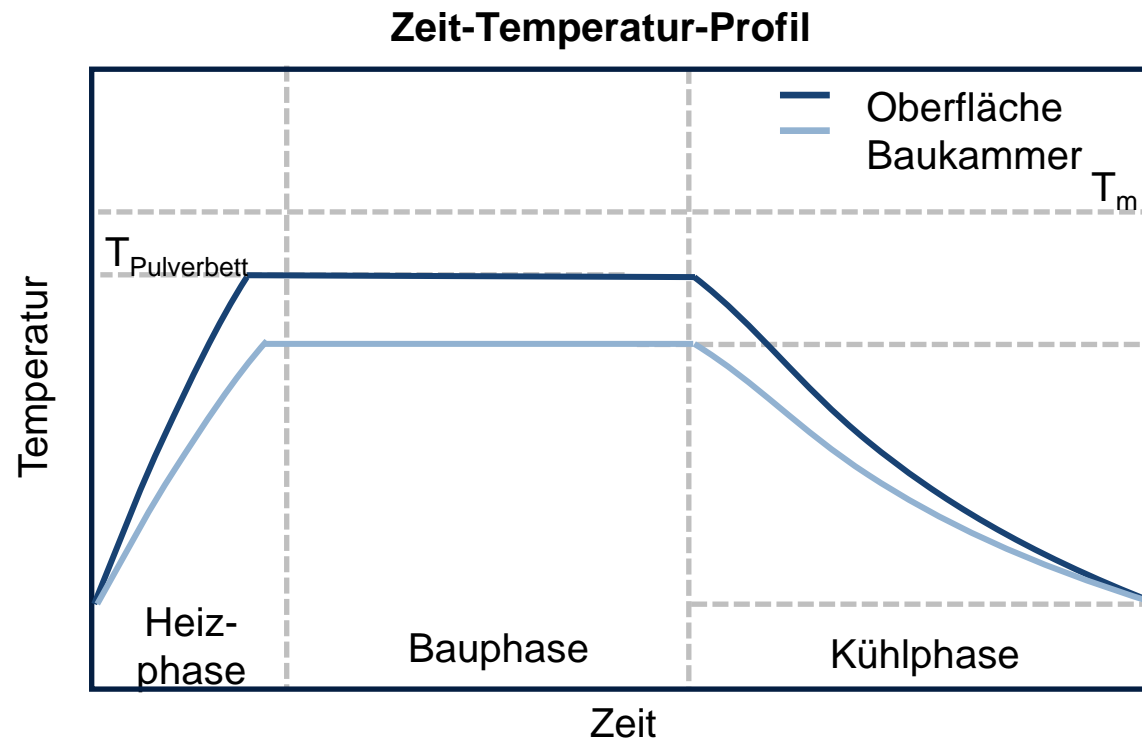
$T_m$ : Kristallitschmelztemperatur |  $T_c$ : Kristallisationstemperatur |  $T_B$ : Pulverbetttemperatur

Grafik in Anlehnung an Schmid, 2018

## Verzugsminimierung durch *quasi-isotherme* Prozessstrategien

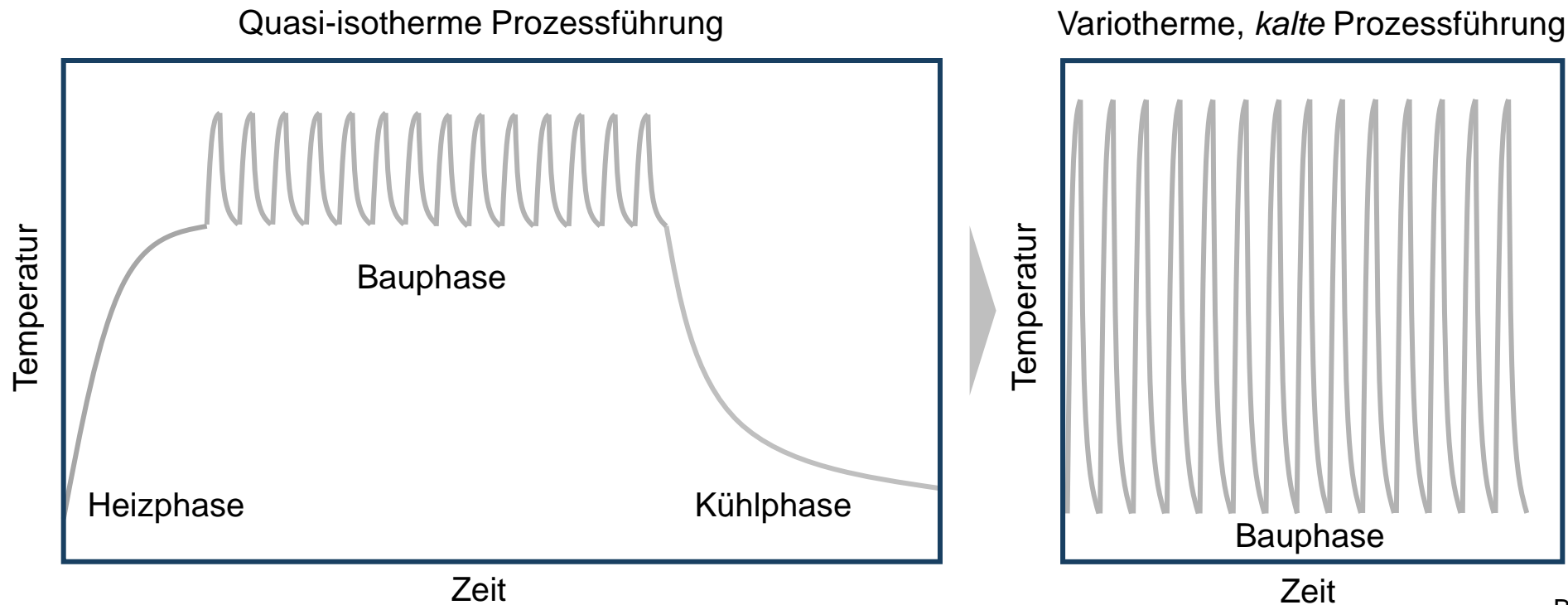
iso (griechisch) ~ gleich, dasselbe

- *Konstante* Temperaturen – der Prozess erfolgt bei **hohen, gleichbleibenden Temperaturen**



## Kalte Prozessstrategien – doch wie?

- Langzeitige thermische Belastung führt zu **starker Werkstoffalterung** (Wudy et al., 2019)
- Temperaturreduktionen führen ohne weitere Maßnahmen zu **starkem Verzug**

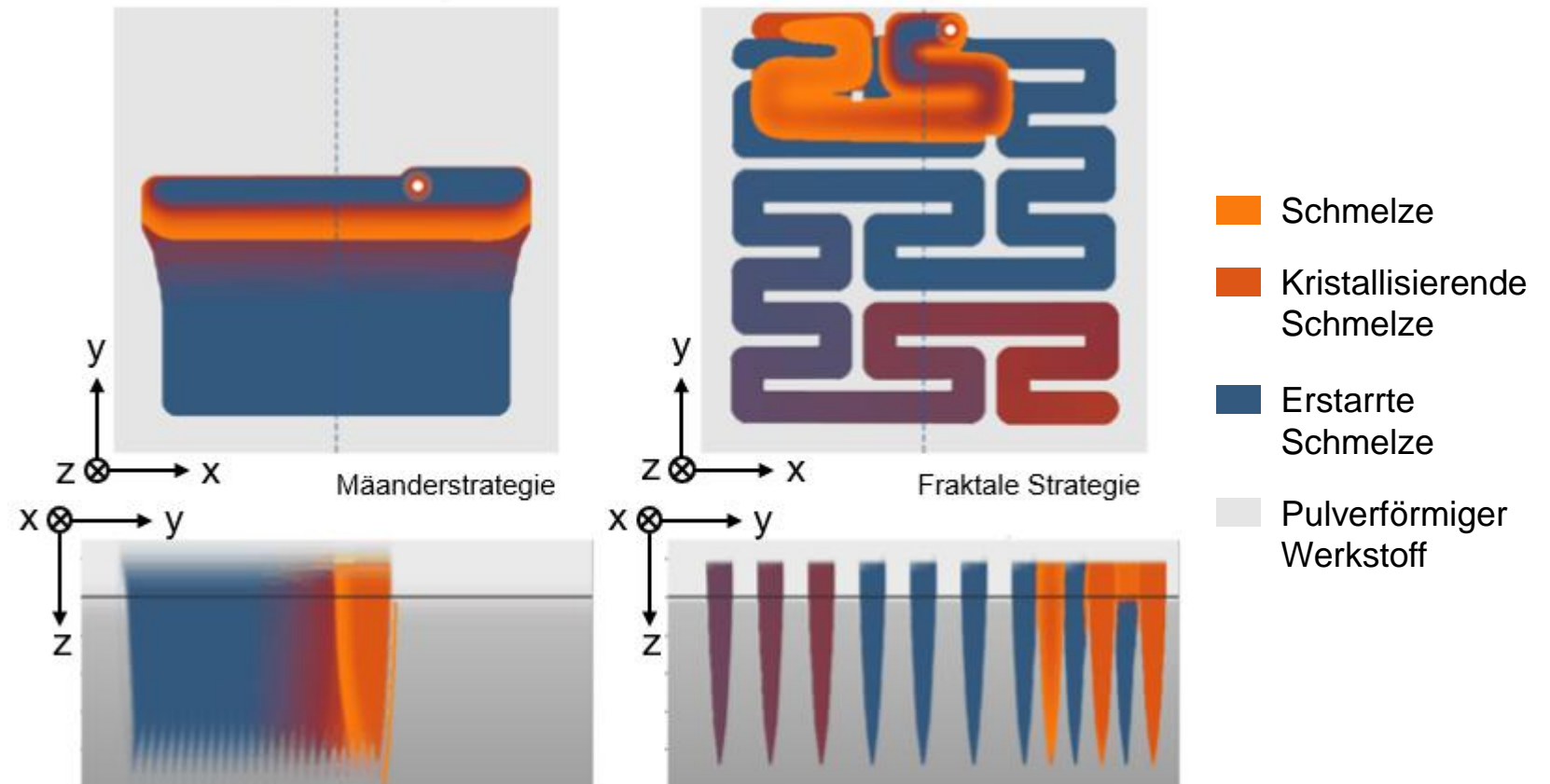


- Verarbeitbarkeit nukleierter Werkstoffsysteme
- Minimierung thermooxidativer Werkstoffalterung
- Reduzierung von Prozessnebenzeiten

Basierend auf Drummer & Schlicht, 2025

## Stützstrukturfreie, kalte Prozessstrategien

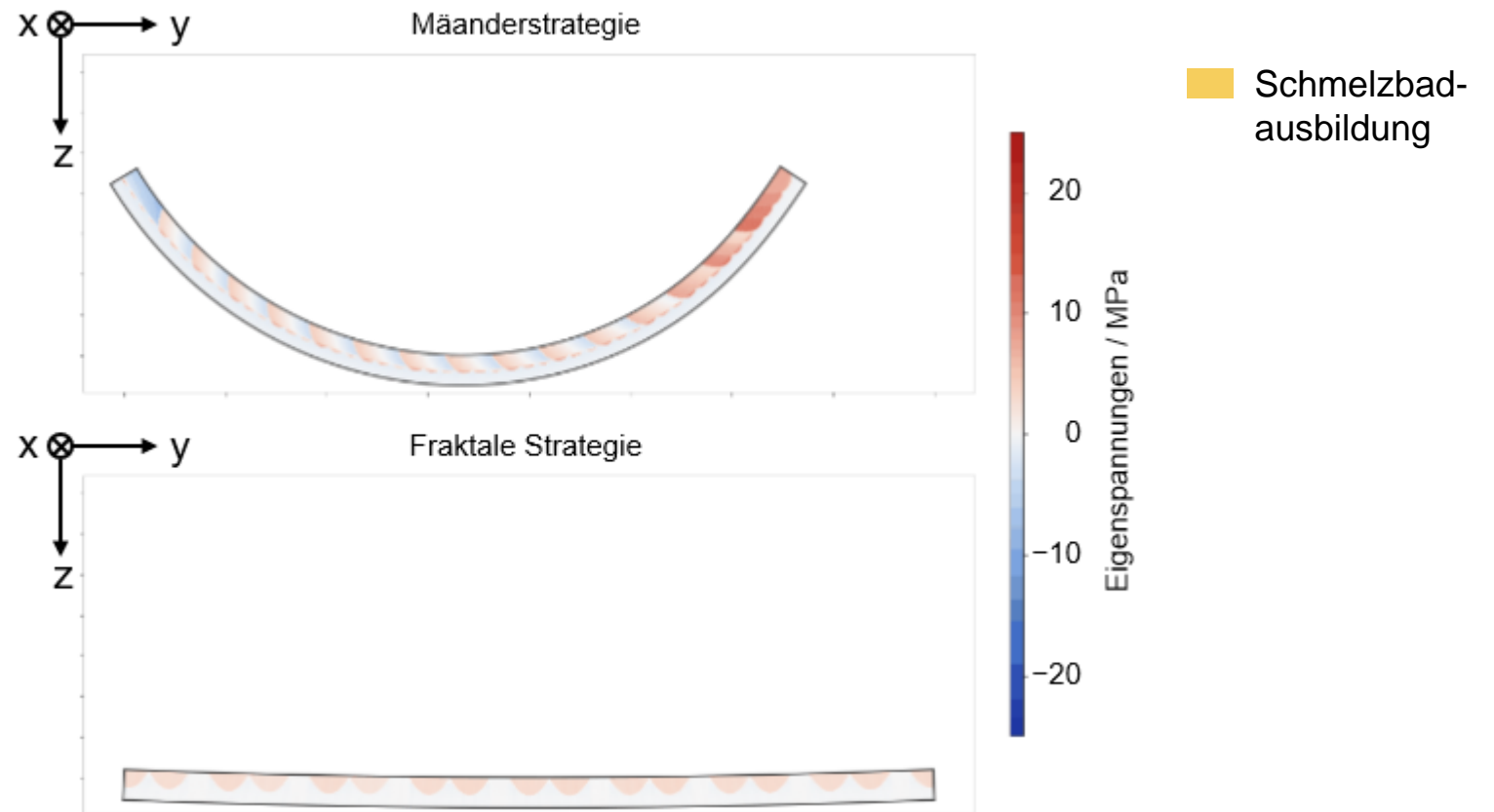
- Intermediäre Ausbildung von *Dehnungsfugen* in diskretisierten, variothermen Prozessen zur Trennung der Werkstoff-schwindung und der Geometrieausbildung (Schlicht et al., 2023)
- Ausbildung kontinuierlicher Schmelzfronten in klassischen, linearen Strategien
- Zunächst **diskrete** Ausbildung und Kristallisation des Schmelzbads in fraktalen, diskretisierten Strategien
- Vermeidung gerichteter Eigenspannungen durch räumlich und zeitlich getrennte Belichtung benachbarter Volumenelemente



Grafik in Anlehnung an Schlicht et al., 2022, Drummer & Schlicht, 2025

## Stützstrukturfreie, kalte Prozessstrategien

- Intermediäre Ausbildung von *Dehnungsfugen* in diskretisierten, variothermen Prozessen zur Trennung der Werkstoffschwindung und der Geometriebildung (Schlicht et al., 2023)
- Ausbildung kontinuierlicher Schmelzfronten in klassischen, linearen Strategien
- Zunächst **diskrete** Ausbildung und Kristallisation des Schmelzbads in fraktalen, diskretisierten Strategien
- Vermeidung gerichteter Eigenspannungen durch räumlich und zeitlich getrennte Belichtung benachbarter Volumenelemente

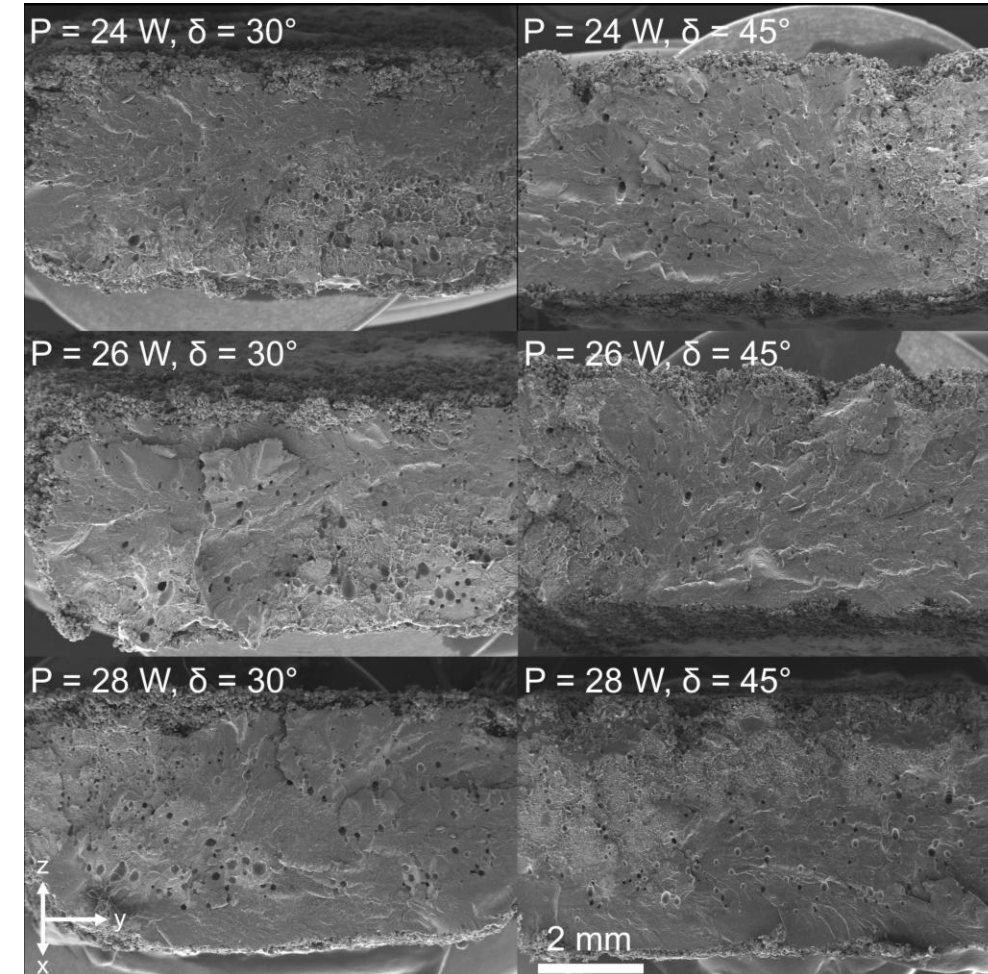


Grafik in Anlehnung an Drummer & Schlicht, 2025

## Polyolefine – Verarbeitbarkeit trotz hoher Schwindung

- Wechselwirkung der Laserleistung und des Aufbauwinkels auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften
- Ausbildung dichter Bauteilmorphologien unter partieller Porenbildung
  - **Erhöhte Dichte** gegenüber warmen SLS-Prozessen
  - Quasi **unbegrenzte Rezyklierbarkeit** von Polypropylen im kalten SLS

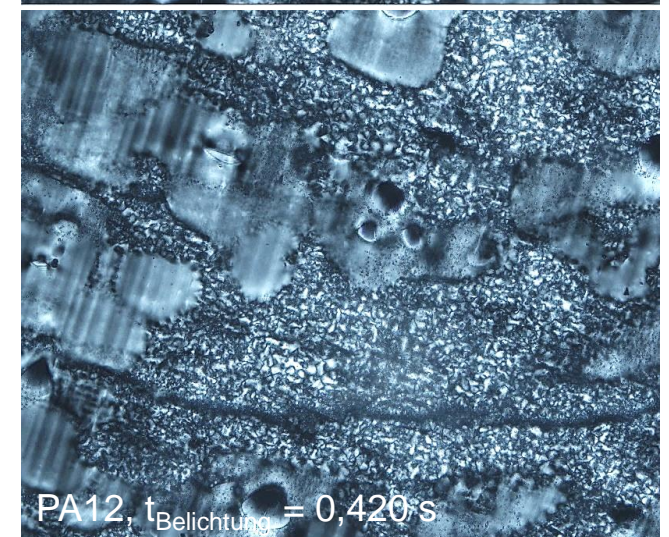
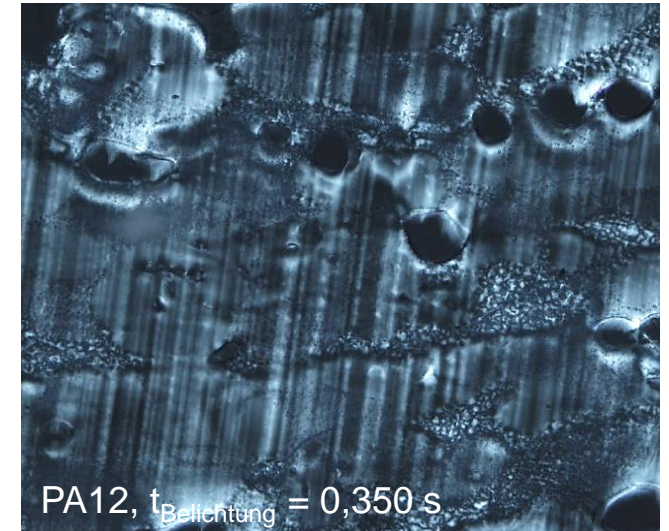
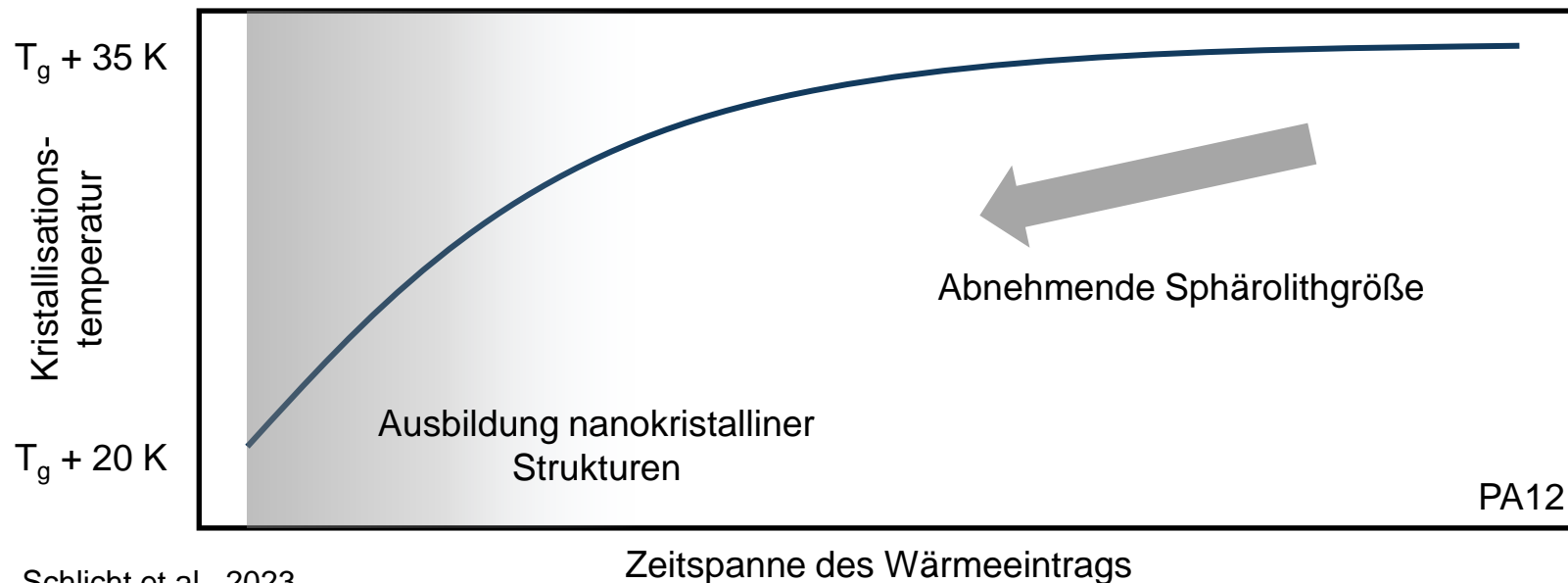
**Verarbeitung von Kunststoffen hoher Schwindung ist bei Raumtemperatur möglich**



Schlicht et al., 2024b

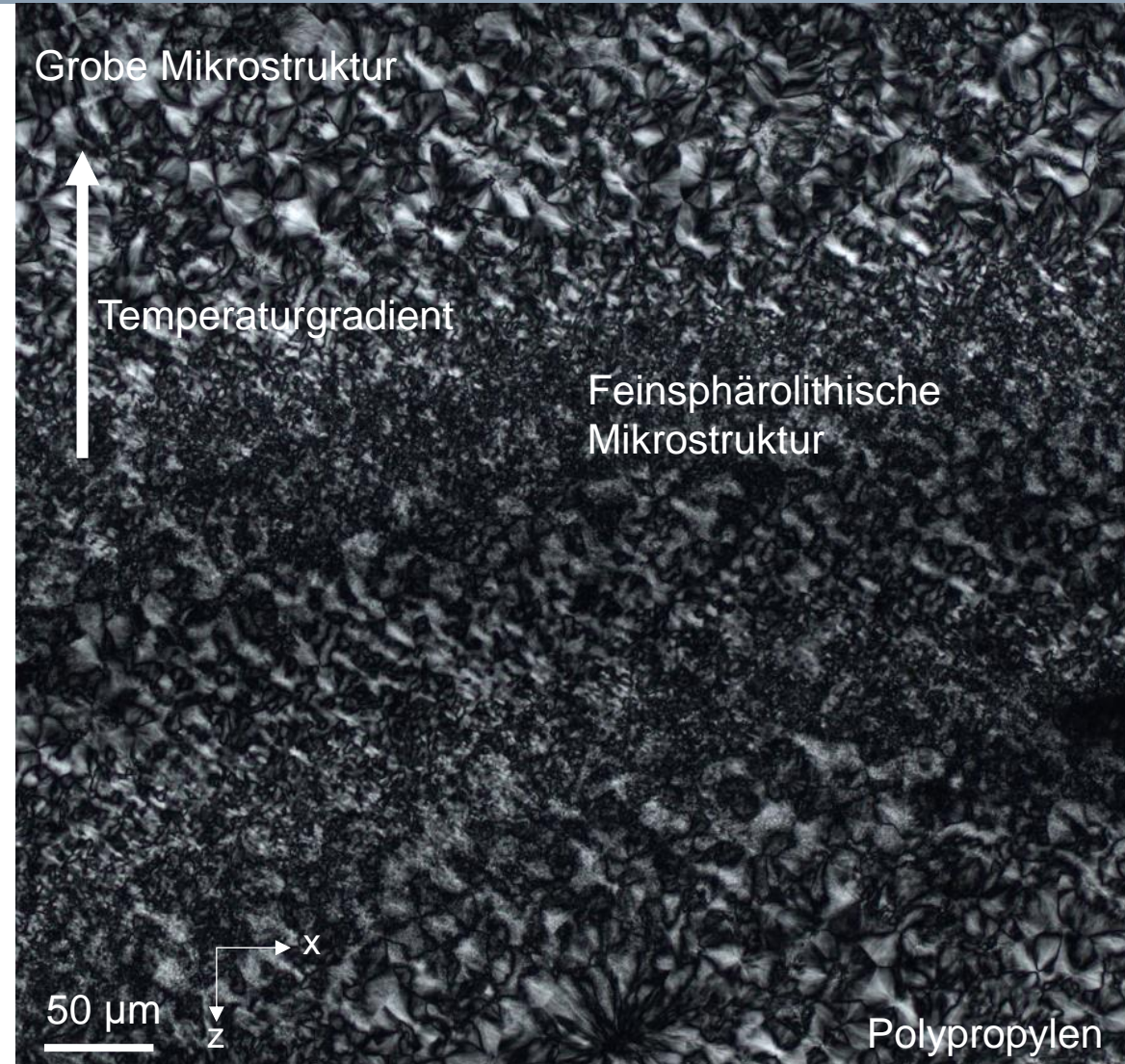
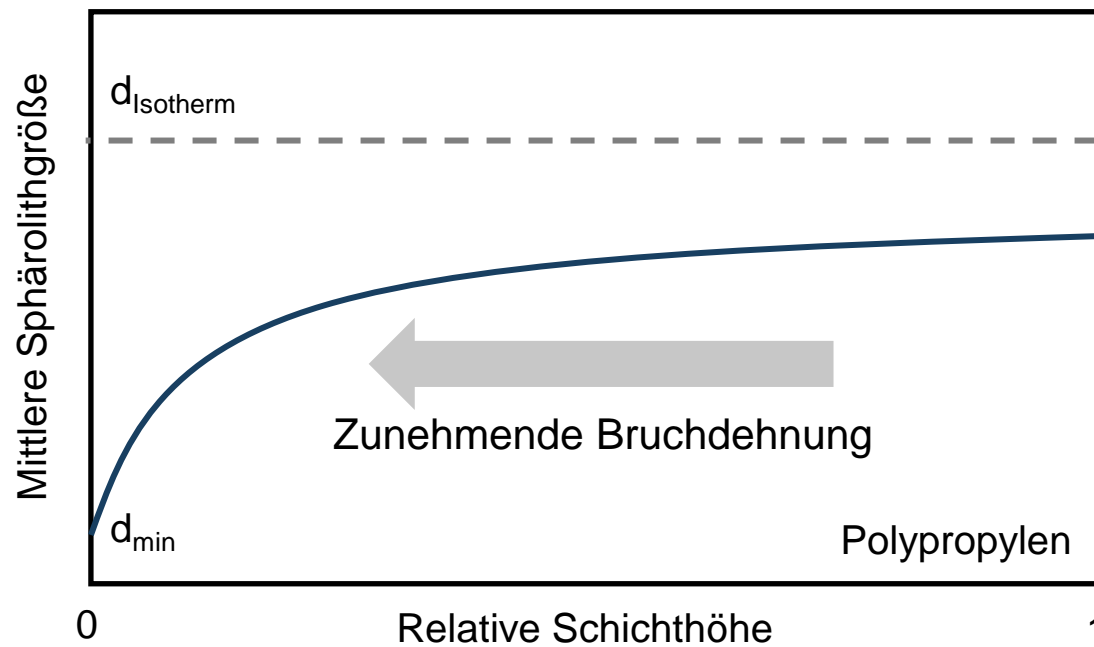
## Strukturbeeinflussung durch Variation der Abkühlbedingungen

- Prozessangepasste Kristallisation
  - Verlangsamte Abkühlung und somit frühere Kristallisation bei erhöhtem Wärmeeintrag
  - Beschleunigte Abkühlung bei reduziertem Wärmeeintrag, Ausbildung feinstkristalliner Strukturen



## Strukturelle Alleinstellungsmerkmale

- Abkühlung ausgehend von erstarrtem Material führt zu ausgeprägter Schichtstruktur mit lokal unterschiedlichen Eigenschaften



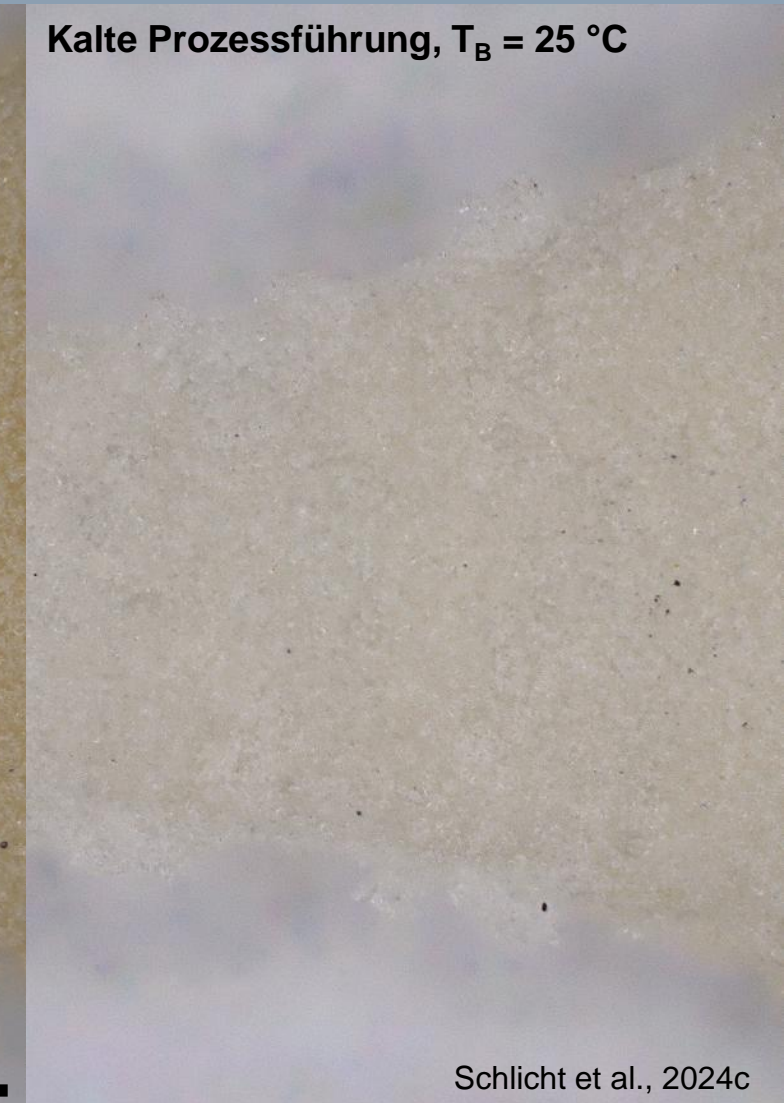
## Verarbeitung technischer Polyamide bei Raumtemperatur

- Hohe Thermooxidationsneigung von Polyamid 6
- **Lösungsansatz:**  
Begrenzung der thermischen Belastung bei  $> 200\text{ °C}$  auf unter 1 s
- Verbesserte Bruchdehnung unter kalter Prozessführung durch reduzierte Größe kristalliner Überstrukturen
- **Reduktion der Energieaufnahme** um  $> 80\%$

Standardprozess,  $T_B = 205\text{ °C}$   
PA6 (BASF Ultramid B27 E)



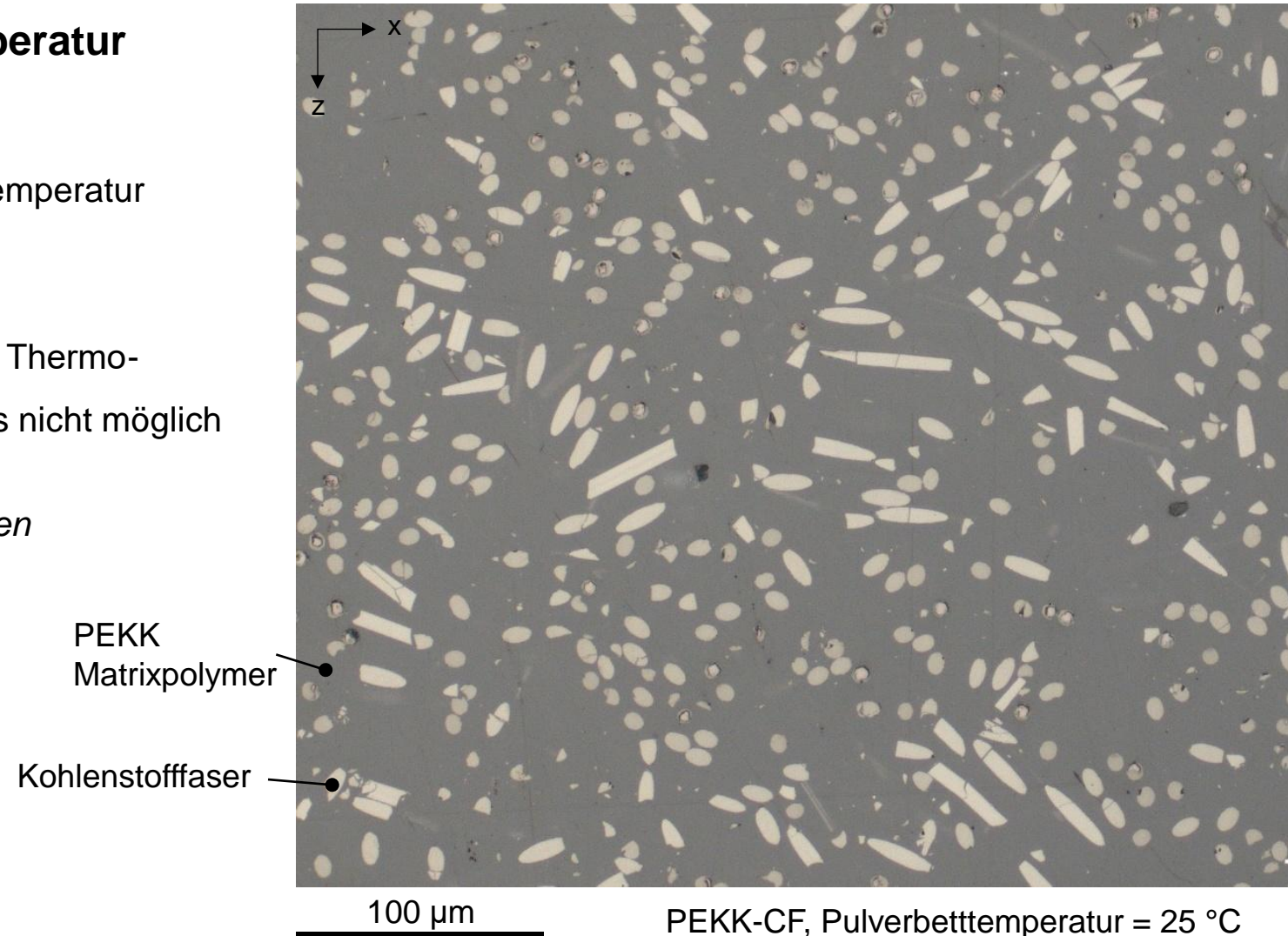
Kalte Prozessführung,  $T_B = 25\text{ °C}$



Schlicht et al., 2024c

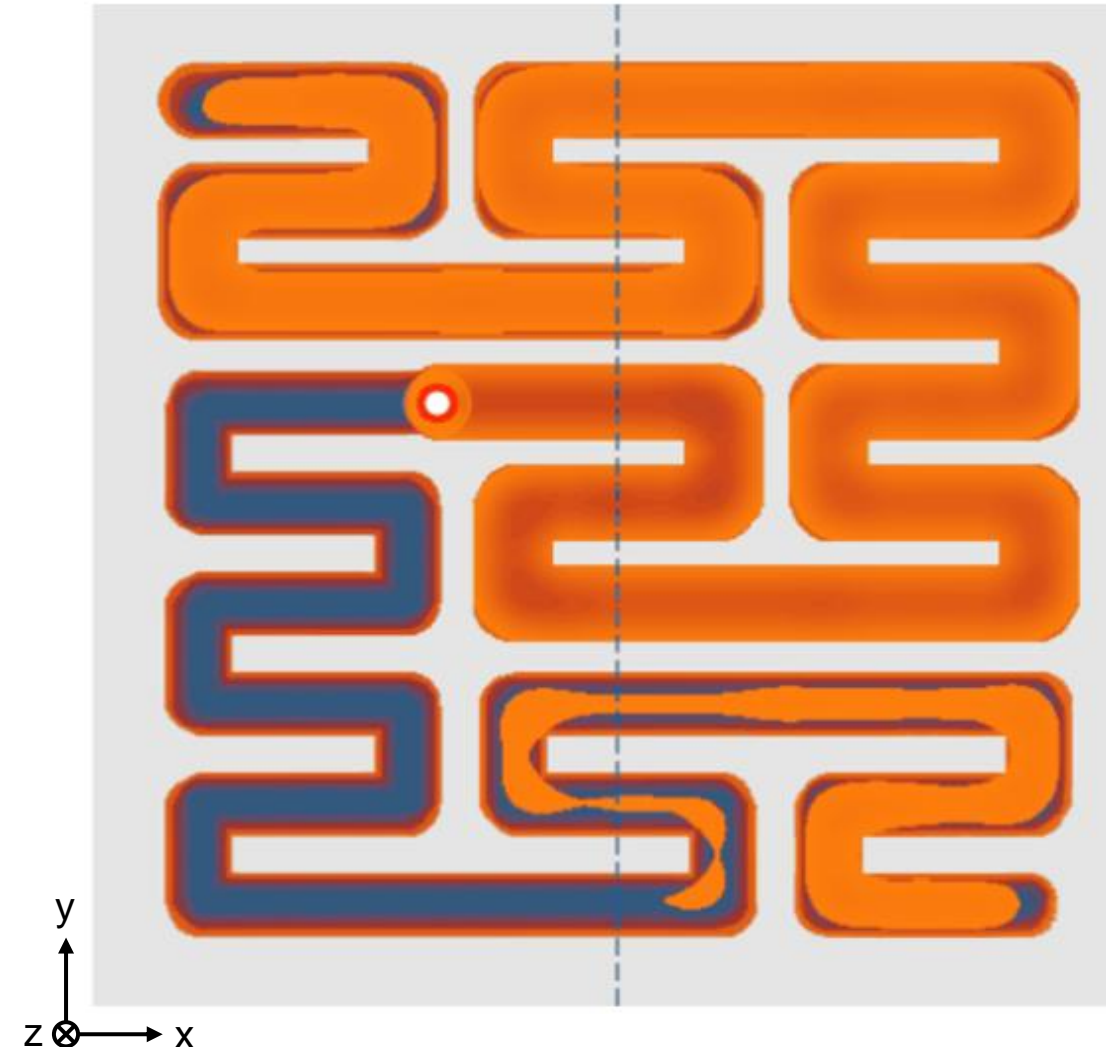
## Verarbeitbarkeit von PAEK bei Raumtemperatur

- **Herausforderung:**  
Dichte Strukturausbildung von PAEKs bei Raumtemperatur  
( $T_{\text{Schmelzpunkt}} > 340 \text{ °C}$ )
- Schwierigkeit: Transfer von Strategien für „weiße“ Thermoplaste auf Grund starker Zersetzung des Materials nicht möglich
- **Lösungsansatz:** Anwendung von *quasi-simultanen* Belichtungsstrategien
  - Mehrfachbelichtung ermöglicht die schrittweise, kontrollierte Temperaturerhöhung



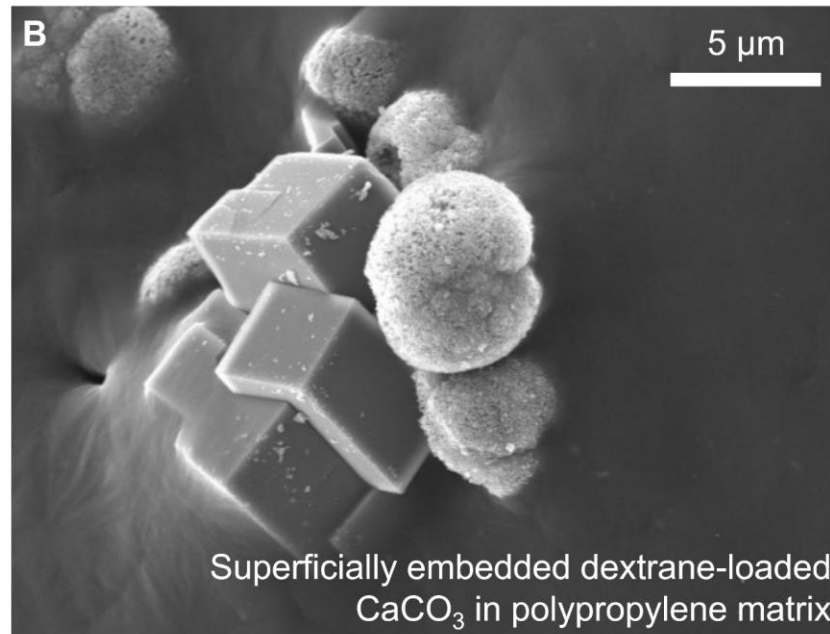
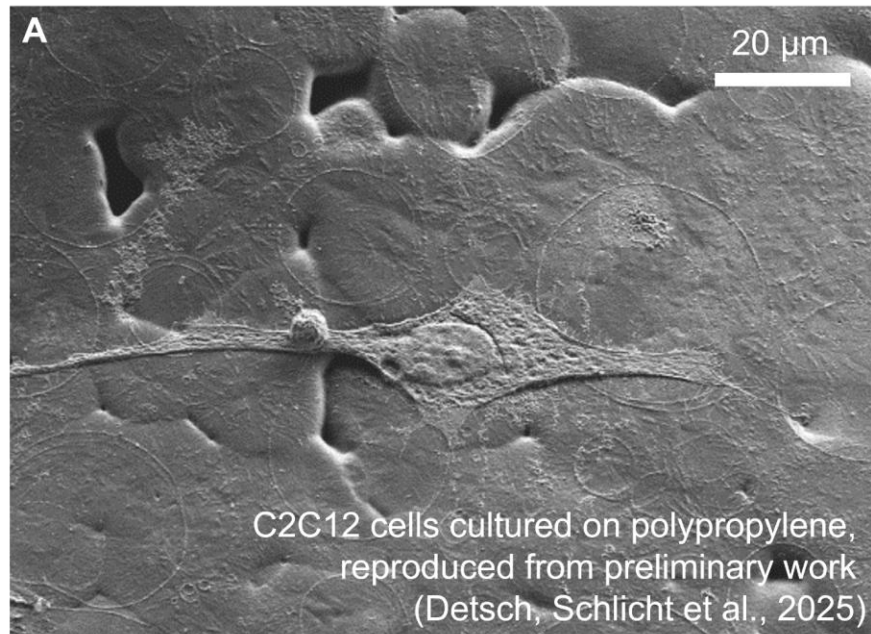
## Verarbeitbarkeit von PAEK bei Raumtemperatur

- **Herausforderung:**  
Dichte Strukturausbildung von PAEKs bei Raumtemperatur  
( $T_{\text{Schmelzpunkt}} > 340 \text{ °C}$ )
- Schwierigkeit: Transfer von Strategien für „weiße“ Thermoplaste auf Grund starker Zersetzung des Materials nicht möglich
- **Lösungsansatz:** Anwendung von *quasi-simultanen* Belichtungsstrategien
  - Mehrfachbelichtung ermöglicht die schrittweise, kontrollierte Temperaturerhöhung

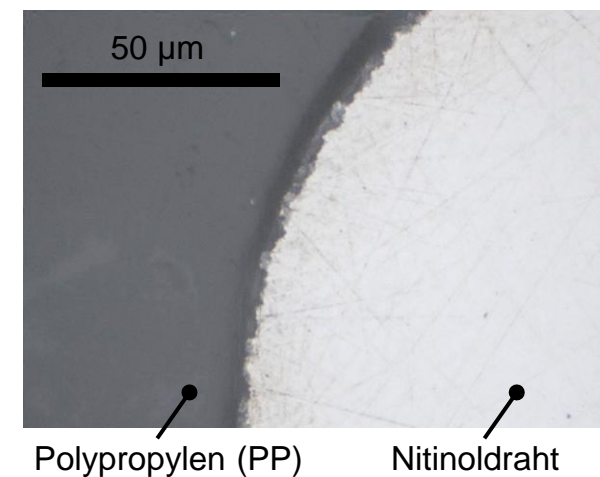
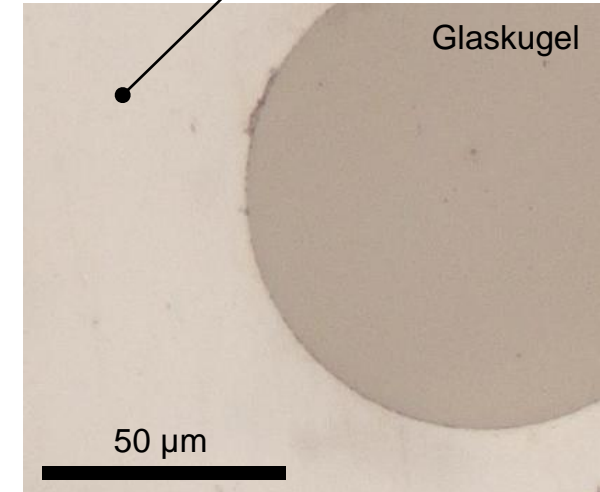


## Medizinisch funktionalisierte Werkstoffe durch kaltes Lasersintern

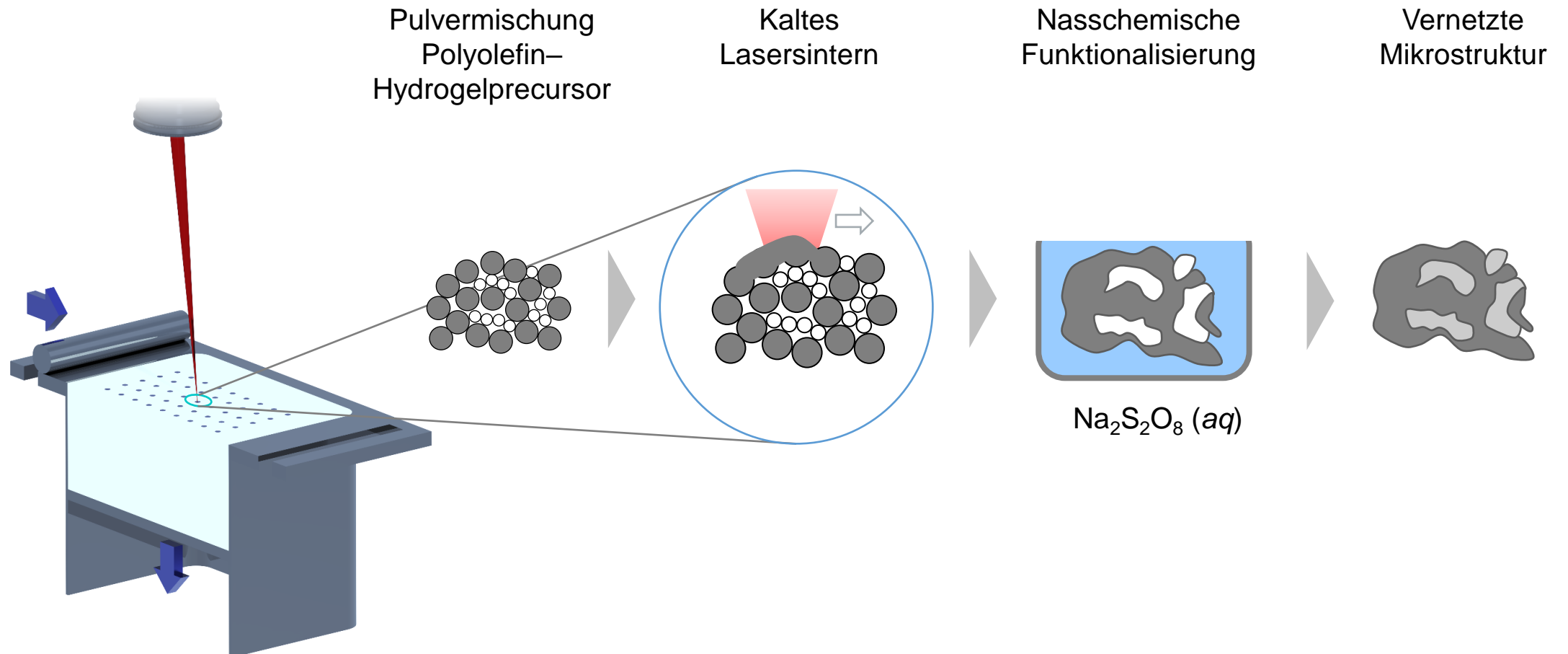
- Anwendung variothermer Prozesse zur Integration
  - biokompatibler Füllstoffe
  - funktioneller Inserts zur gezielten Wirkstoffabgabe
- Herstellung von Bioreaktoren mit integrierten Elektroden für **Organ-on-a-Chip**



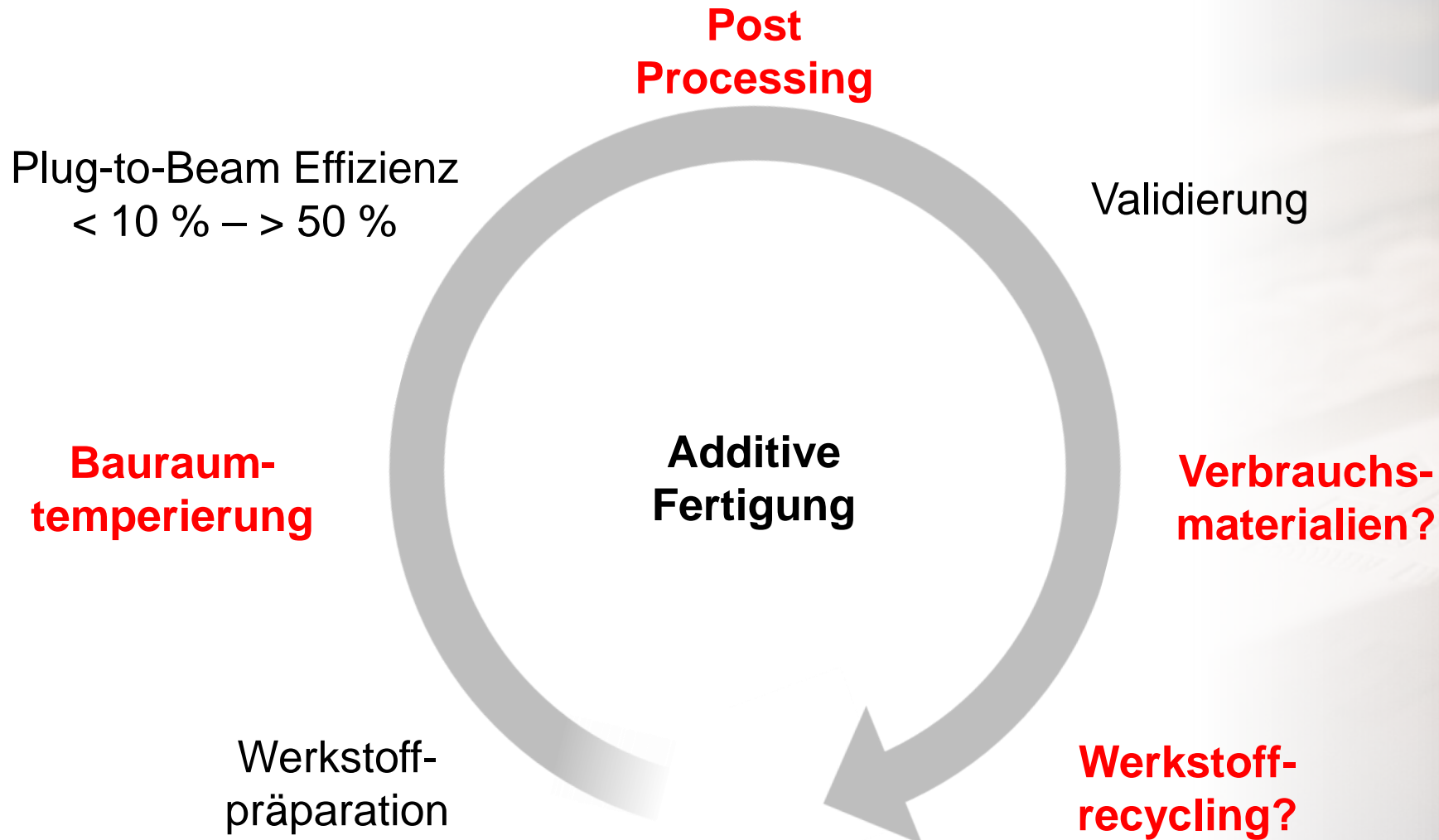
Polyetheretherketon (PEEK)



## Biomimetische Implantate durch kaltes Lasersintern hybrider Werkstoffe



# Perspektiven – und eine Lösung für das ökologische Dilemma



# Umweltkiller 3D-Druck? ...und wie geht es besser?

## Industrielle SLS-Anlage, hochtemperaturfähig

|                                                                         |                     |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Mittlere Leistungsaufnahme<br>einschließlich Kühlung                    | 6 – 8 kW            |
| Bauraumvolumen                                                          | 154 dm <sup>3</sup> |
| Energieaufnahme je Baujob<br>(15 s Schichtzeit,<br>0,1 mm Schichtdicke) | 522 MJ<br>145 kWh   |
| Angenommener<br>Füllgrad                                                | 6 %                 |
| Pulverrecycling                                                         | 30 % vs. 100 %      |

**3 kWh/kg**

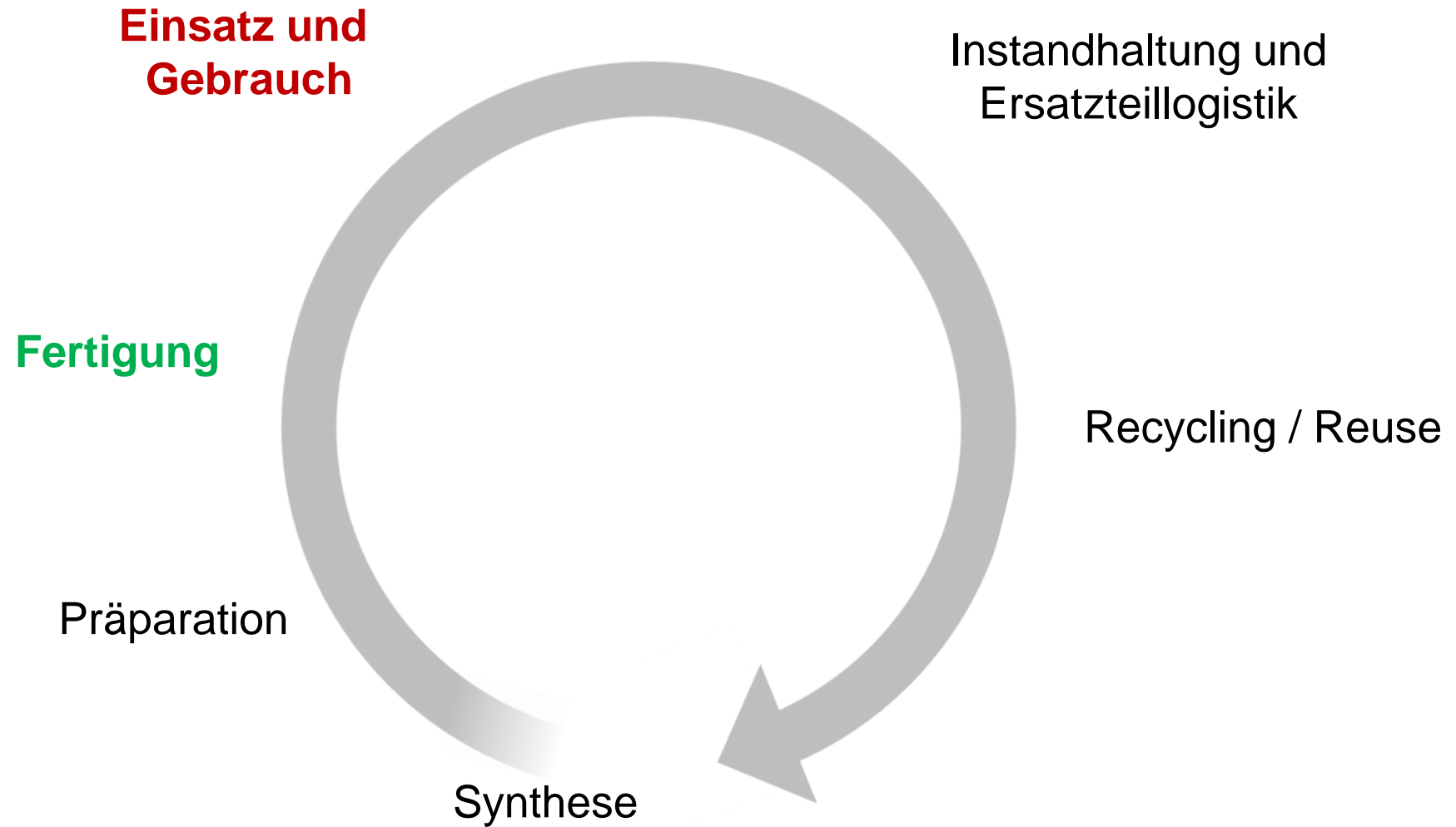
PEEK, kaltes SLS

**17,5 kWh/kg**

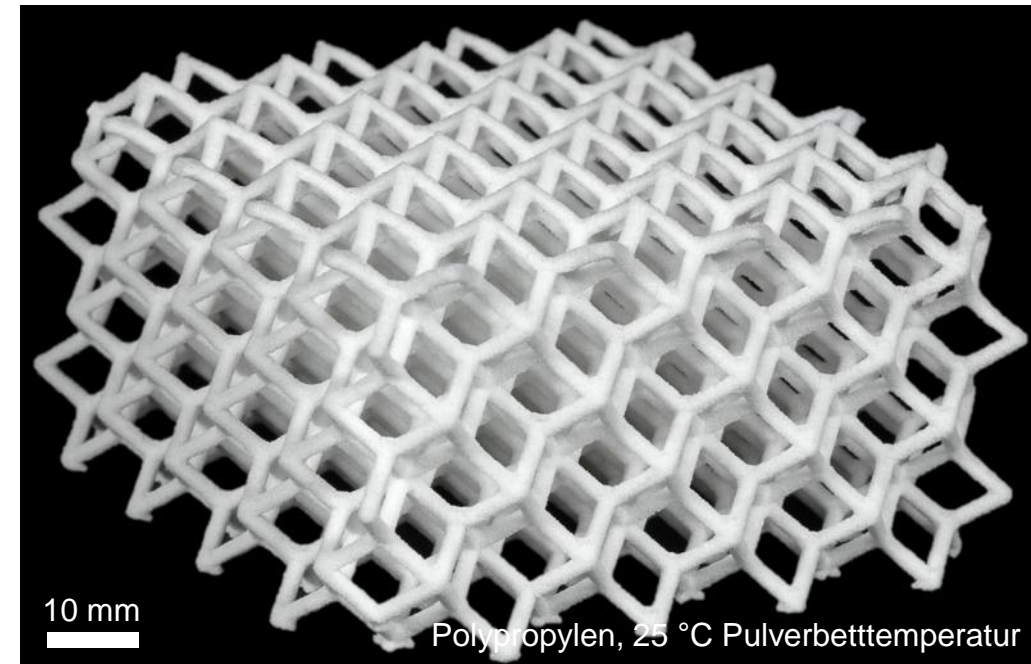
PEEK, SLS

# Umweltbilanzen

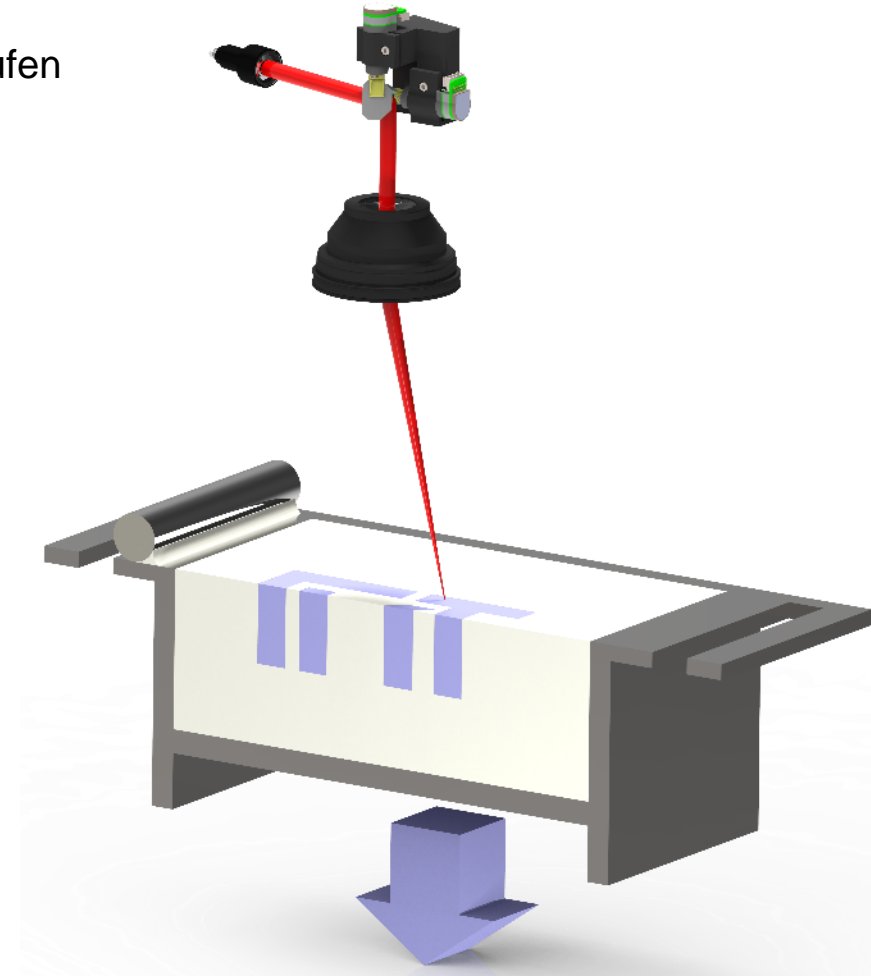
## Eine Frage der Perspektive



- Verarbeitung von schwindenden Werkstoffen erstmals ohne Stützstrukturen bei Raumtemperatur möglich
- Verarbeitung funktionalisierter, thermomechanisch komplexer Werkstoffe, die derzeit keiner Verarbeitung zugänglich sind
  - Verarbeitung fasergefüllter Kunststoffe (> 40 % Glasfasern / Kohlenstofffasern)
  - Verarbeitung von thermoplastischen Elastomeren ohne Alterung umgebenden Werkstoffs
  - Reduzierte thermische Schädigung für medizinische Anwendungen
- Übertragbarkeit auf die Verarbeitung **metallischer Legierungen**
  - Optimierte Verarbeitung heißbrisanfälliger Legierungen
  - Minimiertes Post-Processing durch starke Reduktion der Anzahl an Stützstrukturen



- Kaltes Lasersintern ermöglicht neue Perspektiven für die **Point-of-use-Fertigung**
  - Geringere Kosten für Desktop-Maschinen mit geschlossenen Materialkreisläufen
  - Intrinsisch stabilisierte Prozesse mit reduzierter thermischer Degradation
  - Additive Fertigung für **funktionalisierte Materialien**, die über bestehende Fertigungsprozesse weit hinausgehen



---

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Samuel Schlicht, M.Sc., M.Sc.  
Lehrstuhl für Kunststofftechnik  
Am Weichselgarten 10, 91058 Erlangen  
[samuel.schlicht@fau.de](mailto:samuel.schlicht@fau.de)