

Mechanische und rheologische Untersuchungen neuer Laser Sinter Materialien



M. Sc. Stefan Josupeit

M. Sc. Stefan Rüsenberg

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

7. Merseburger Rapid Prototyping Forum

10. Oktober 2013

Agenda

Einleitung

LS Qualitäts-Prozesskette

Ergebnisse für PA 2200

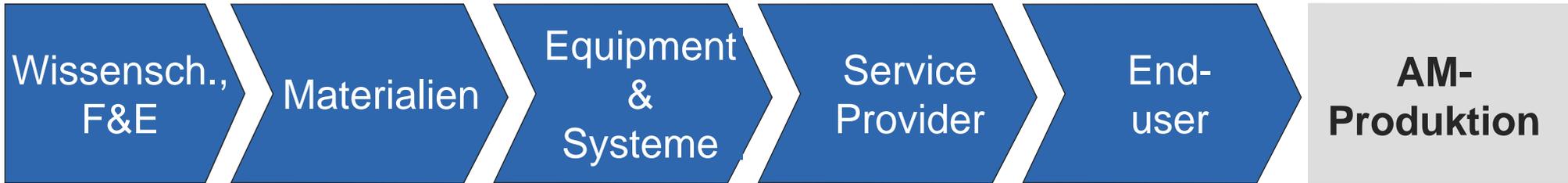
Untersuchung von PA 2221 / PA 2241 FR

Zusammenfassung und Ausblick



- ansässig an der Universität Paderborn
- gegründet 2009
- 16 wiss. Mitarbeiter + ca. 40 Studentische Hilfskräfte
- Know-How von 8 Lehrstühlen (Maschinenbau)
- 10 Industriepartner





Gründungs-
mitglieder

EVONIK INDUSTRIES
SLM Solutions GmbH
BOEING
UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft
EOS
e-Manufacturing Solutions

Neue
Mitglieder

StratasyS
FOR A 3D WORLD™
SAC
EISENHÜTH
blue production

Qualifikation

- Übereinstimmung mit Bauteilanforderungen
- Materialdaten

Verifizierung

- Nachweis von Bauteileigenschaften
- Qualitätsmanagement

Validierung

- Reproduzierbarkeit
- Prozessstabilität

Qualitätsmerkmale

- **Mechanische, elektrische, thermische, physikalische Eigenschaften**
- **Oberflächeneigenschaften**
- **Maßgenauigkeit**
- ...

Agenda

Einleitung

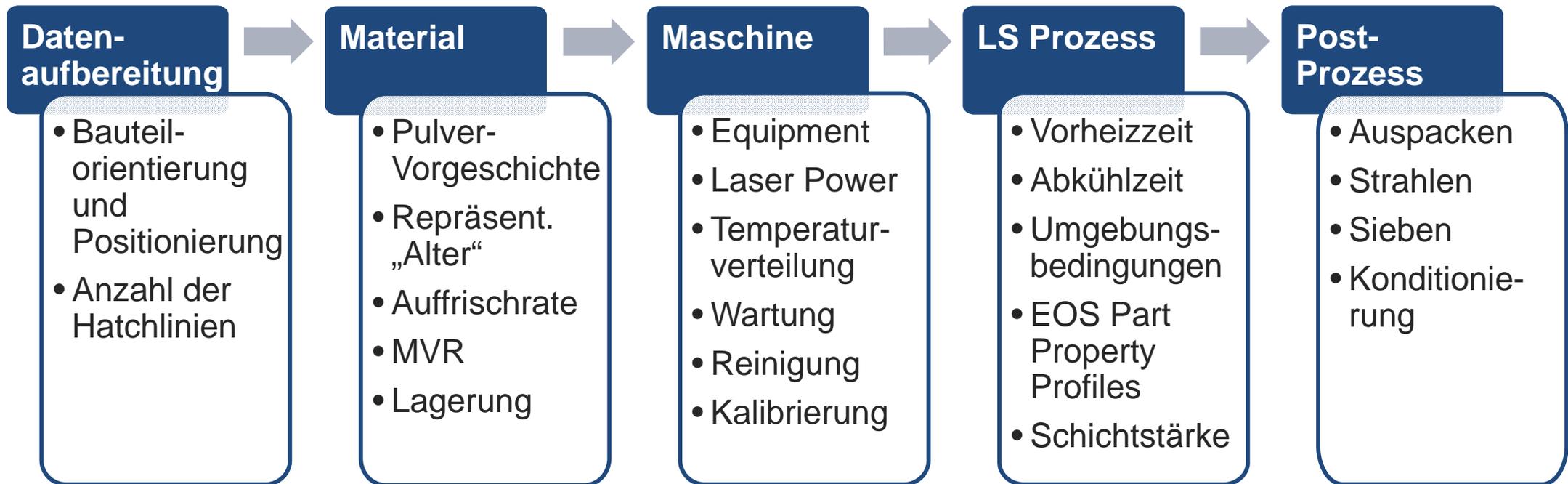
LS Qualitäts-Prozesskette

Ergebnisse für PA 2200

Untersuchung von PA 2221 / PA 2241 FR

Zusammenfassung und Ausblick

Schritt 1: Sicherstellung reproduzierbarer Qualitätsmerkmale entlang einer definierten Prozesskette:



Step 2: Ermittlung von Pulver- und Bauteileigenschaften (→ verlässliche Materialdaten):

→ Mechanik (statisch & dynamisch), Schlag, Rheologie, Chemie, ...

→ **Vergleich von verschiedenen Materialien**

Daten-
aufbereitung



Material



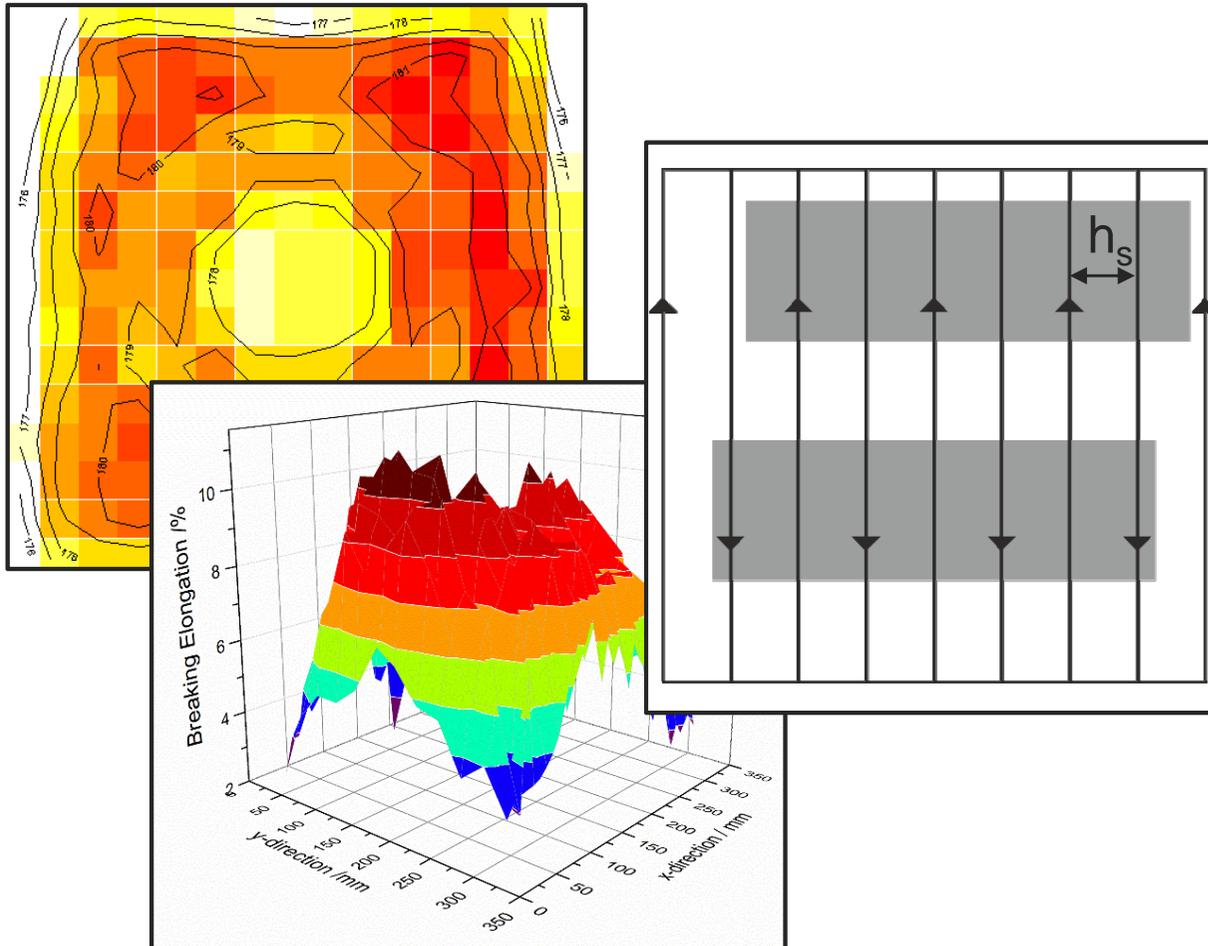
Maschine



LS Prozess



Post-
Prozess



- Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung auf der Pulverbettoberfläche verursacht inkonstante Bauteileigenschaften
 - Die Positionierung beeinflusst die Anzahl an Hatchlinien
- **Hatch-konforme Bauteilpositionierung mit einem minimalen Abstand von 50 mm zur Bauraumbegrenzung**

Daten-
aufbereitung



Material



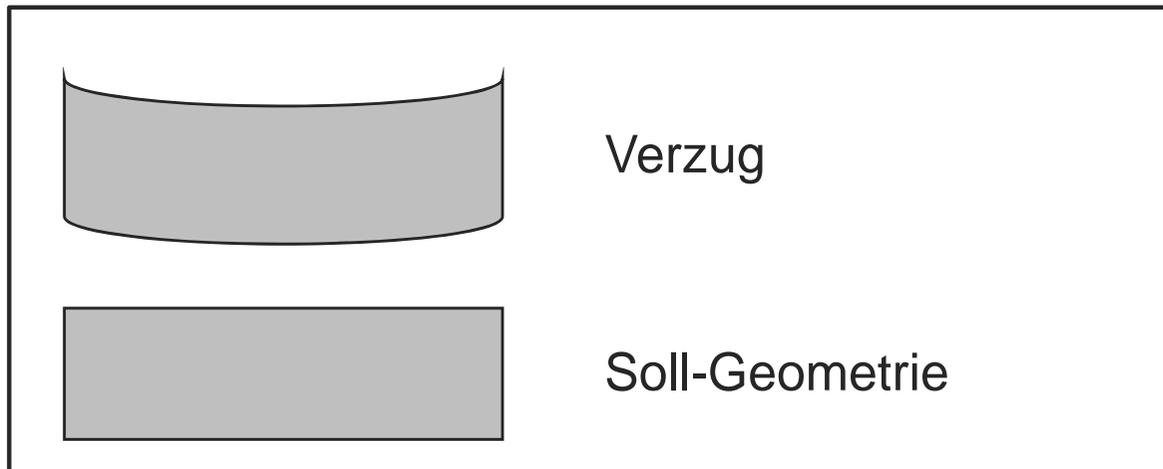
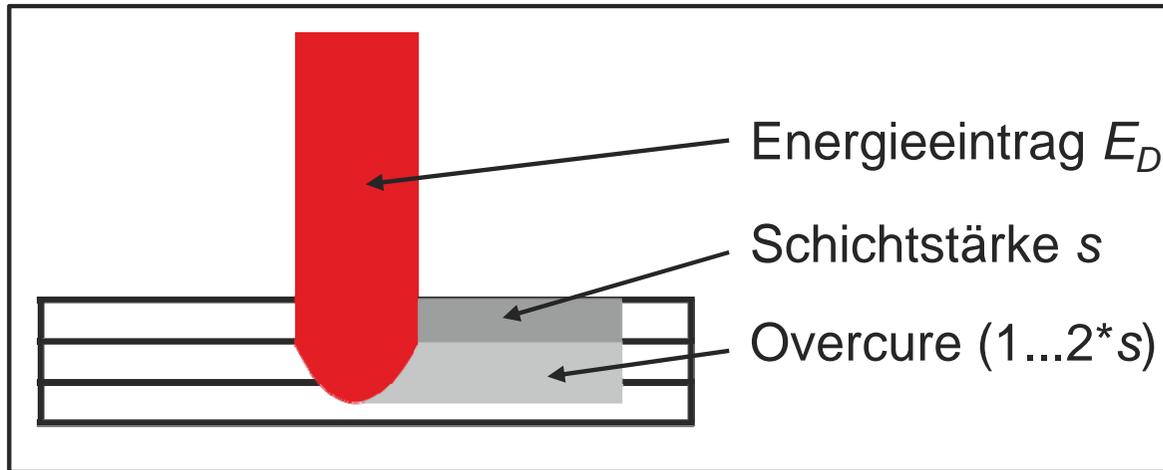
Maschine



LS Prozess



Post-
Prozess



- Overcure in z-Richtung
 - Schwund durch thermische Ausdehnung
 - Ungleichmäßige Abkühlraten verursachen Verzug (besonders bei großen Teilen am Baufeldrand)
- **Subtraktion des Overcures in Z-Richtung und Schwundfaktor**
- **Maßhaltigkeit muss den Prüfnormen entsprechen**

Daten-
aufbereitung



Material



Maschine



LS Prozess



Post-
Prozess

PA 2200

- Standardmaterial (Polyamid 12)

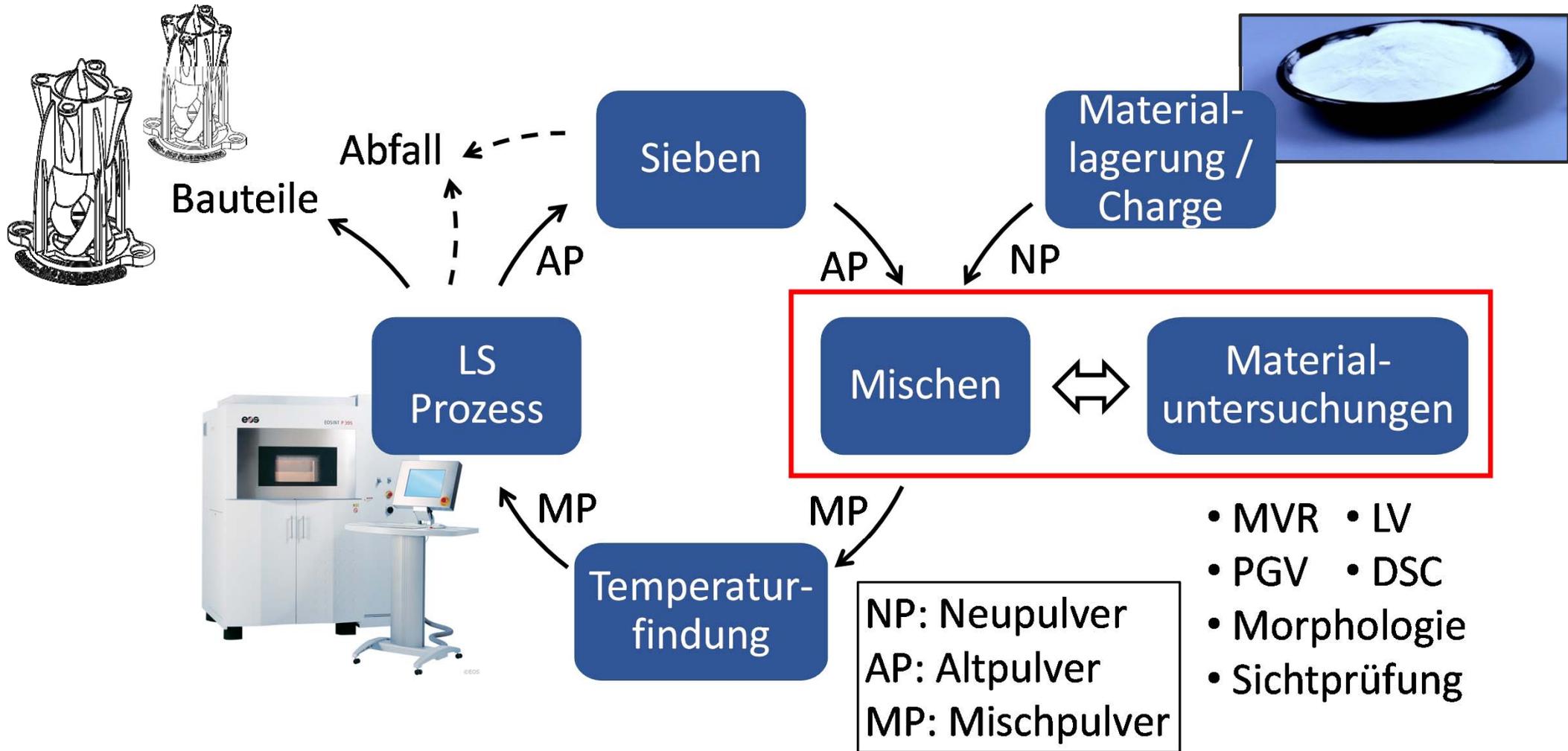
PA 2241 FR

- Halogenbasiertes, auffrischbares und flammgeschütztes Polyamid 12
- Typische Anwendung: Luftfahrt, z.B. Luftführungen

PA 2221

- Hinsichtlich der Auffrischrate optimiertes Polyamid 12 (Auffrischrate ~30%)
- Verringerung von Materialverbrauch und Abfall







Vortrocknung

- Thermo Scientific Konvektionsofen
- 10 min bei 105°C
- 5 min bei 105°C bis 140°C
- 2 min bei 140°C

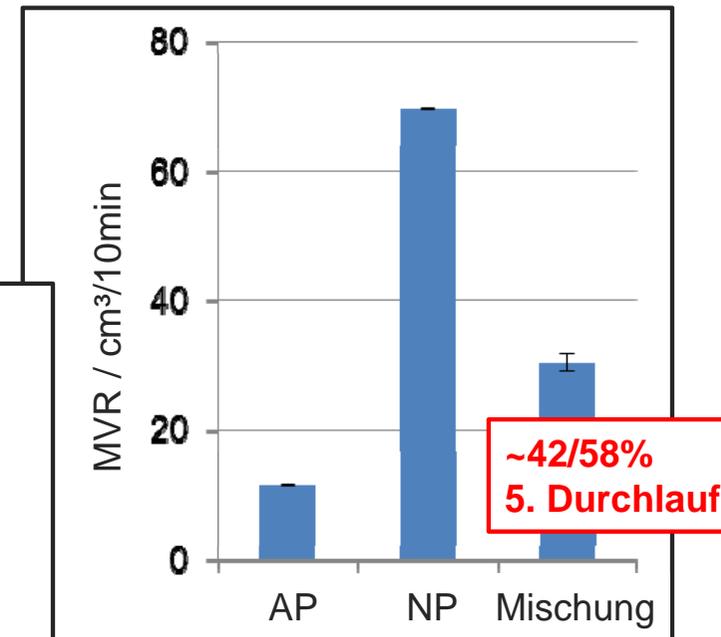


MVR Messmethode

- Zwick „mflow“ Messgerät
- 5 kg Kolbenlast
- 300 s Vorheizzeit
- 325°C Vorheiztemperatur



www.zwick.de



→ Die MVR ist ein bisher übliches und bewährtes Verfahren, um die Materialalterung von Polyamid 12 zu bestimmen

Daten-
aufbereitung



Material



Maschine



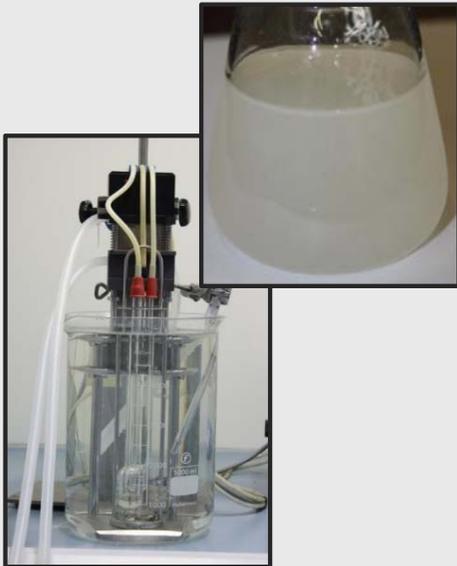
LS Prozess



Post-
Prozess

Lösungviskosität (LV)

- Ubbelohde Viskosimeter
- Lösemittel: m-Kresol



GPC

- Gel-Permeations-Chromatographie
- Ermittlung der Molekülgrößenverteilung
- Lösemittel: HFIP



www.shodex.com

DSC

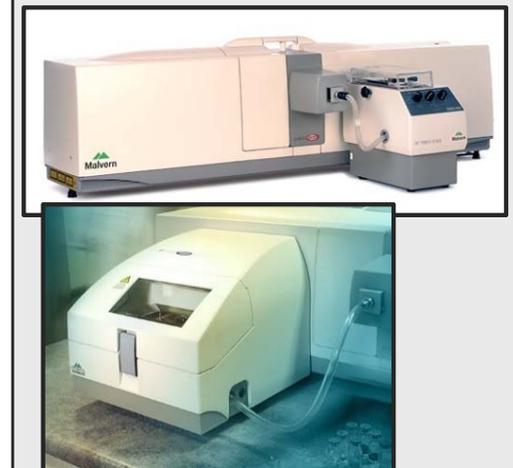
- Dynamische Differenzkalorimetrie
- Schmelz- und Rekristallisationsverhalten



de.mt.com

Partikelgrößenverteilung

- Malvern Mastersizer 2000 (Laserbeugung)
- Trocken-dispergierung



www.malvern.de

Daten-
aufbereitung



Material



Maschine



LS Prozess



Post-
Prozess

EOSINT P395



→ Nutzung von state-of-the-art Equipment

→ Lagerung von Maschine, Material und Testequipment in Standardatmosphäre

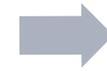
Daten-
aufbereitung



Material



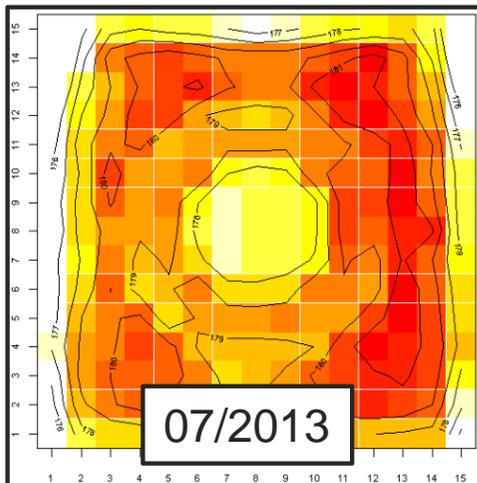
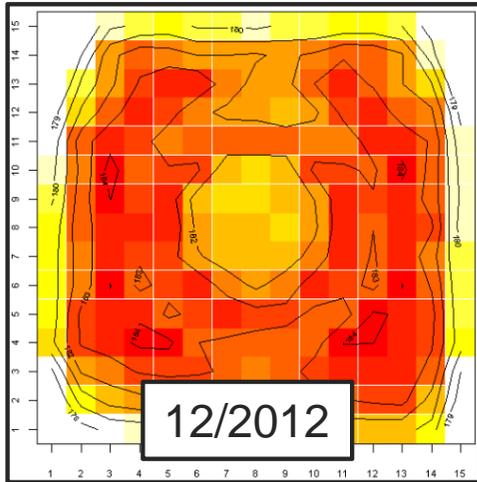
Maschine



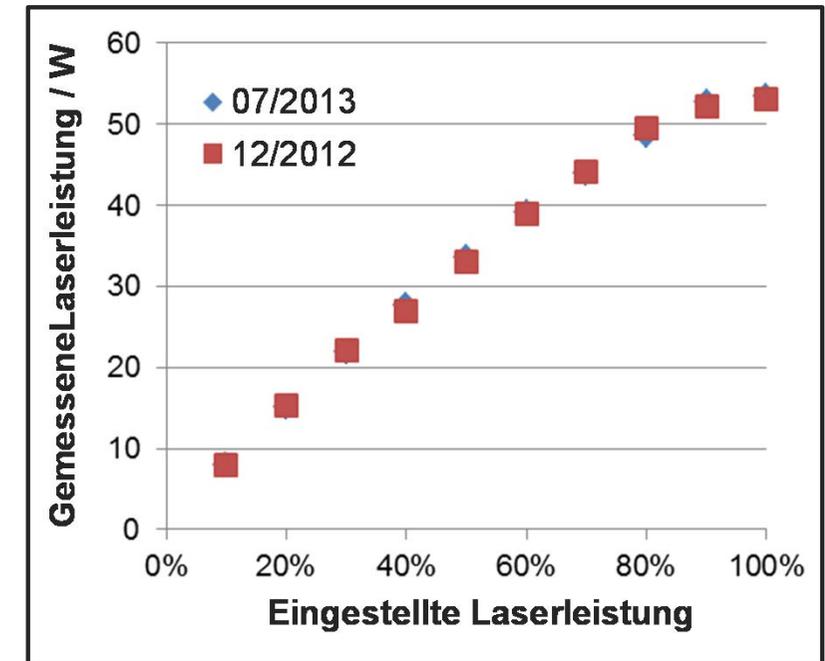
LS Prozess



Post-
Prozess



- Messung der Temperaturverteilung auf der Pulverbett-oberfläche mittels Pyrometer durch die Laser-Scanning-Einheit (alle 6 Monate)
- Messung der Laserleistung (mittig, alle 6 Monate)
- Reinigung des Laserfensters (mind. jede Woche)
- Beschichtereinstellung (nach jedem Baujob)



→ Konstante Maschinenbedingungen



PPP (PA 2200)	Schichtstärke	Bautemperatur (aktuell)	Klingengeometrie des Beschichters
Top Quality	60 µm	177°C	flach 
Performance	100 µm	178°C	rund 
Balance	120 µm (Standard)	179°C	
Speed	150 µm	180°C	konisch 
Top Speed	180 µm	181°C	

→ Die EOS Part Property Profiles (PPPs) sind festgelegte Parametersätze

→ Hier: Betrachtung des LS Prozesses als „Black Box“

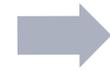
Daten-
aufbereitung



Material



Maschine



LS Prozess



Post-
Prozess

Abkühlprozess

1. 10 Stunden in der Maschine (Stickstoff)
 2. mind. 24 Stunden außerhalb der Maschine
- **Kriterium: max. Kerntemperatur 50°C**
- **Größtmögliche Temperaturhomogenität**

Auspacken

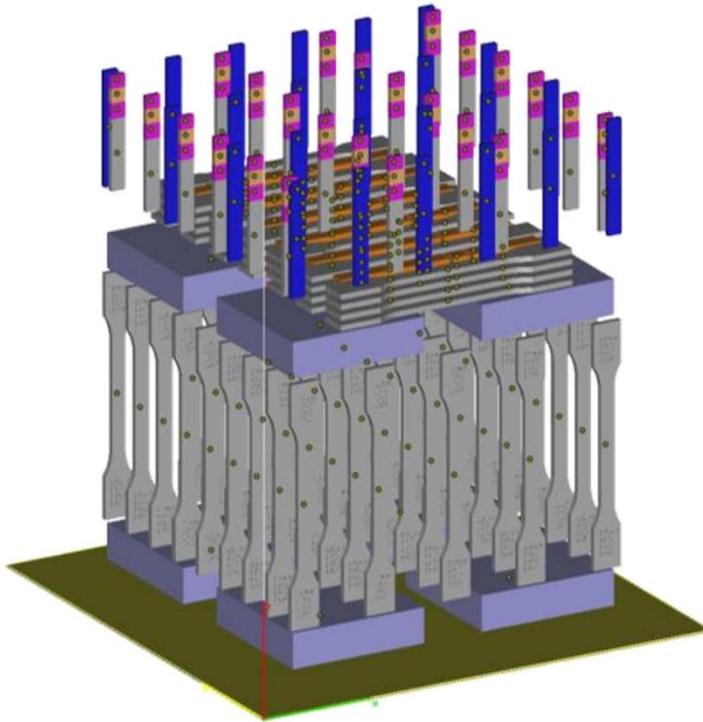
Automatisches Strahlsystem

Einstellbarer Strahldruck, Abstand, Rotationsgeschwindigkeit und Zeit

→ **Definierter Strahlprozess**



Jobaufbau



- Zug-, Biege-, und Druckproben (x- und z-Richtung)
- Pulverboxen (unten & mitte)
- 60, 100, 120, 150 und 180 μm Schichtstärke (PA 2200)

Mechanische Bauteilprüfung



instron.us

Instron 5569

- Universalprüf-system
- 5 kN Kraftmessdose
- Integrierte Klimakammer
- Videoextensiometer („AVE“) zur Dehnungsmessung

- 1 Gruppe (Zug, z) jedes Baujobs wird trocken getestet (Reproduzierbarkeit & Verifizierung)
- 4 Gruppen (Zug / Biegung / Druck, x & z) werden konditioniert und bei verschiedenen Temperaturen geprüft (-60°C bis +90°C)

Agenda

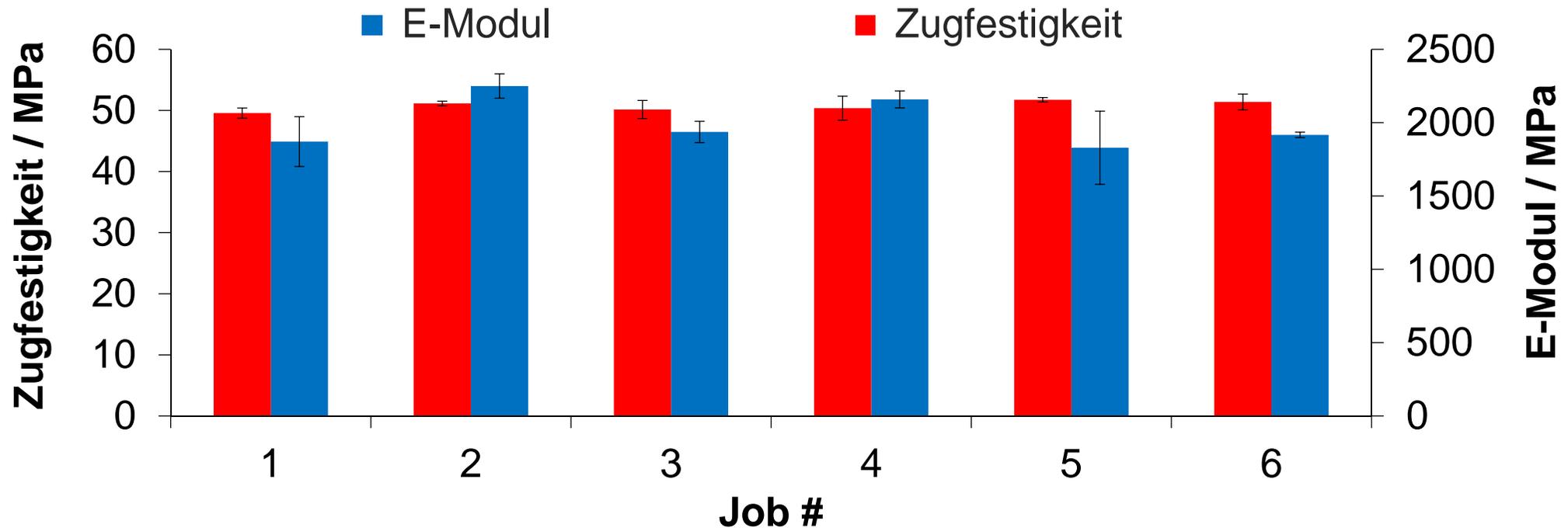
Einleitung

LS Qualitäts-Prozesskette

Ergebnisse für PA 2200

Untersuchung von PA 2221 / PA 2241 FR

Zusammenfassung und Ausblick

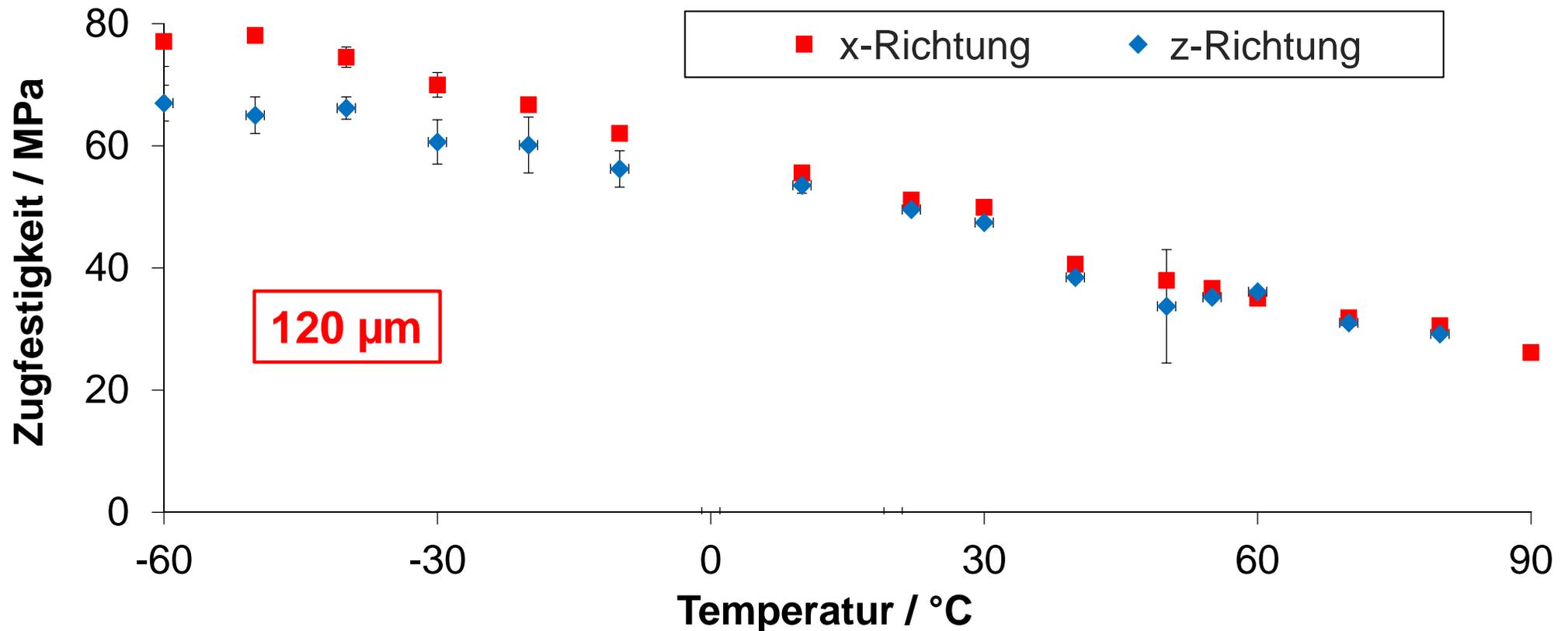


Reproduzierbarkeit über 6 Baujobs

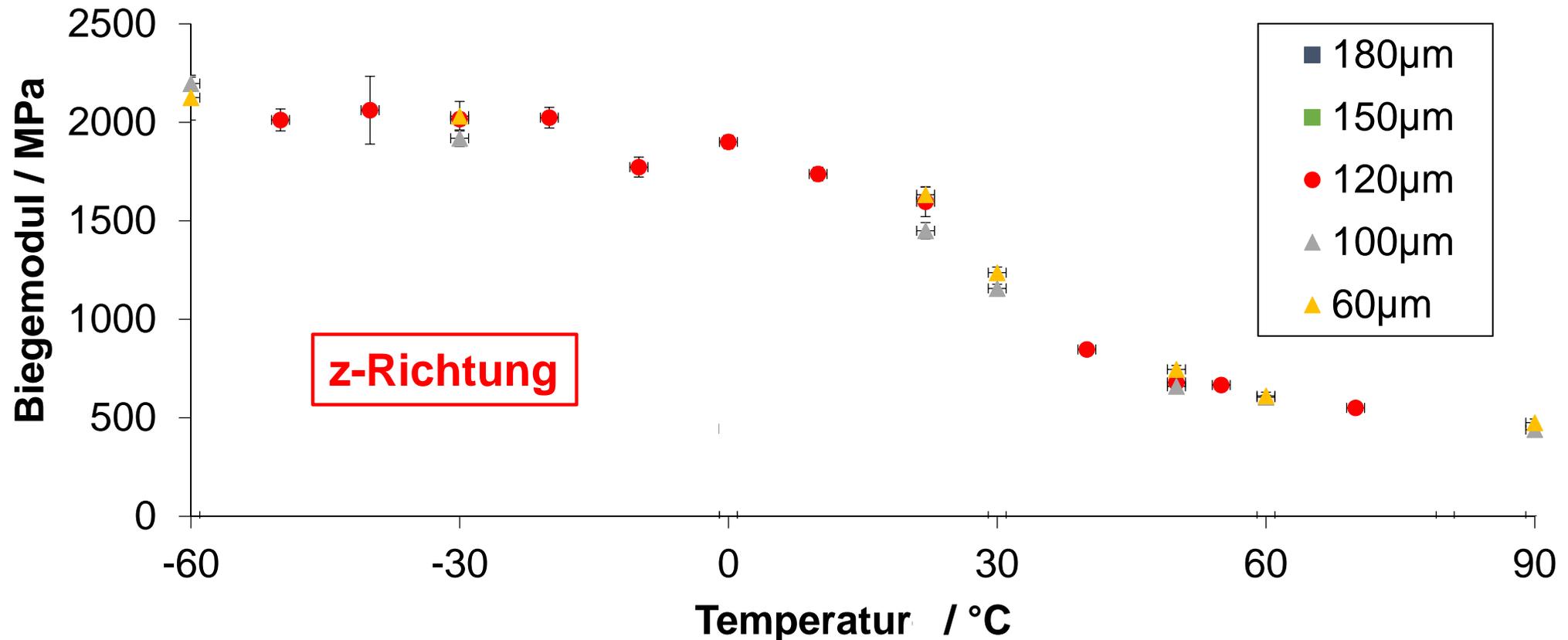
- trocken, z-Richtung, 120 μ m Schichtstärke
- Zugfestigkeit: $50,73 \pm 0,83$ MPa ($\pm 1,6\%$)
- E-Modul: 1994 ± 170 MPa ($\pm 8,5\%$)
- Bruchdehnung (not shown): $9,51 \pm 1,87$ % ($\pm 19,6\%$)

→ Die Zugfestigkeit ist der am besten reproduzierbare Parameter

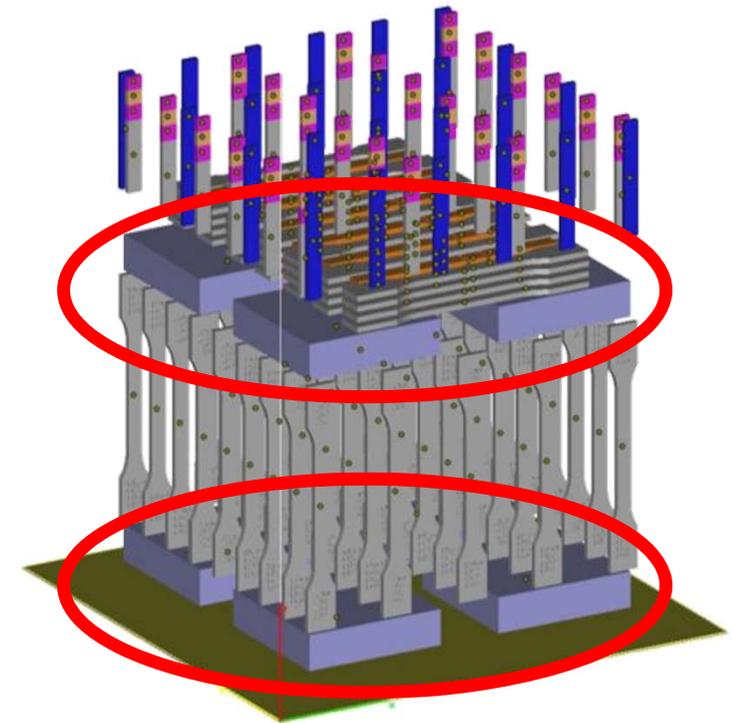
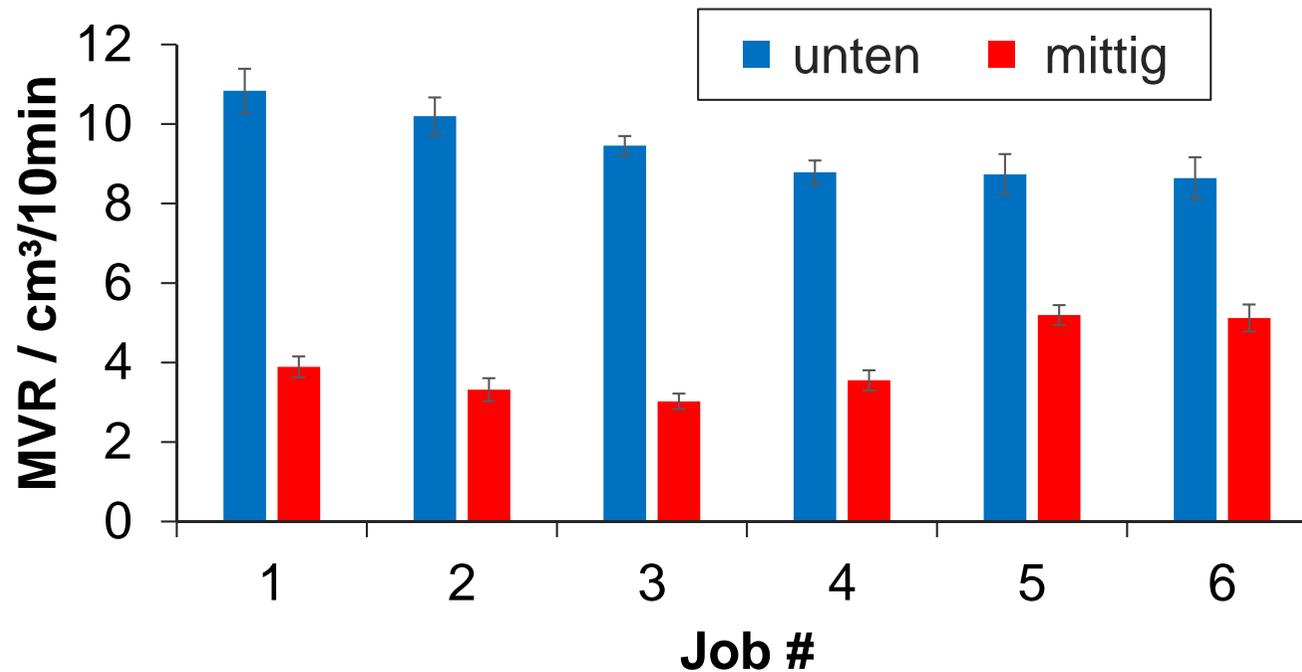
→ Die Bruchdehnung variiert stark über die verschiedenen Baujobs



- Die Zugfestigkeit sinkt mit steigender Temperatur deutlich ab
- Der Unterschied zwischen x- und z-Richtung wird besonders bei tiefen Temperaturen unter 0°C deutlich

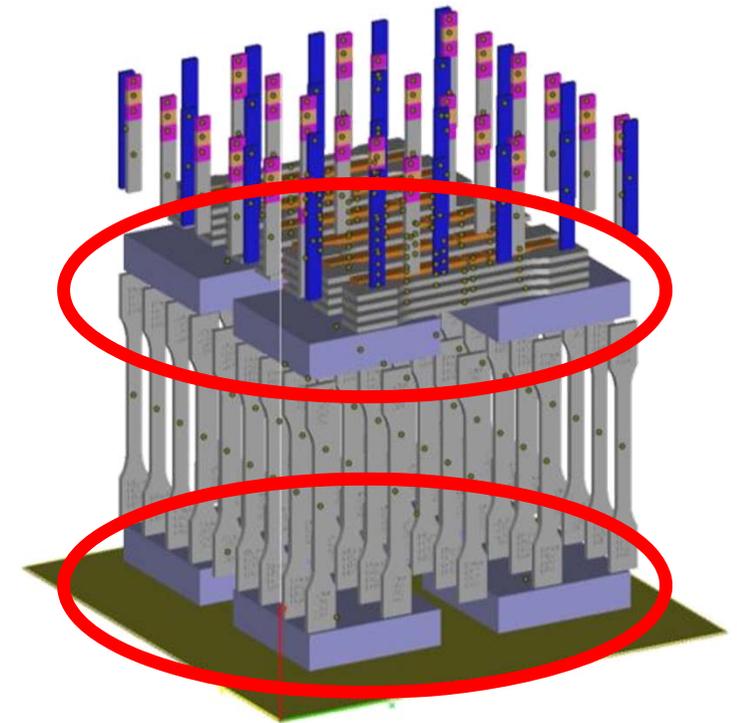
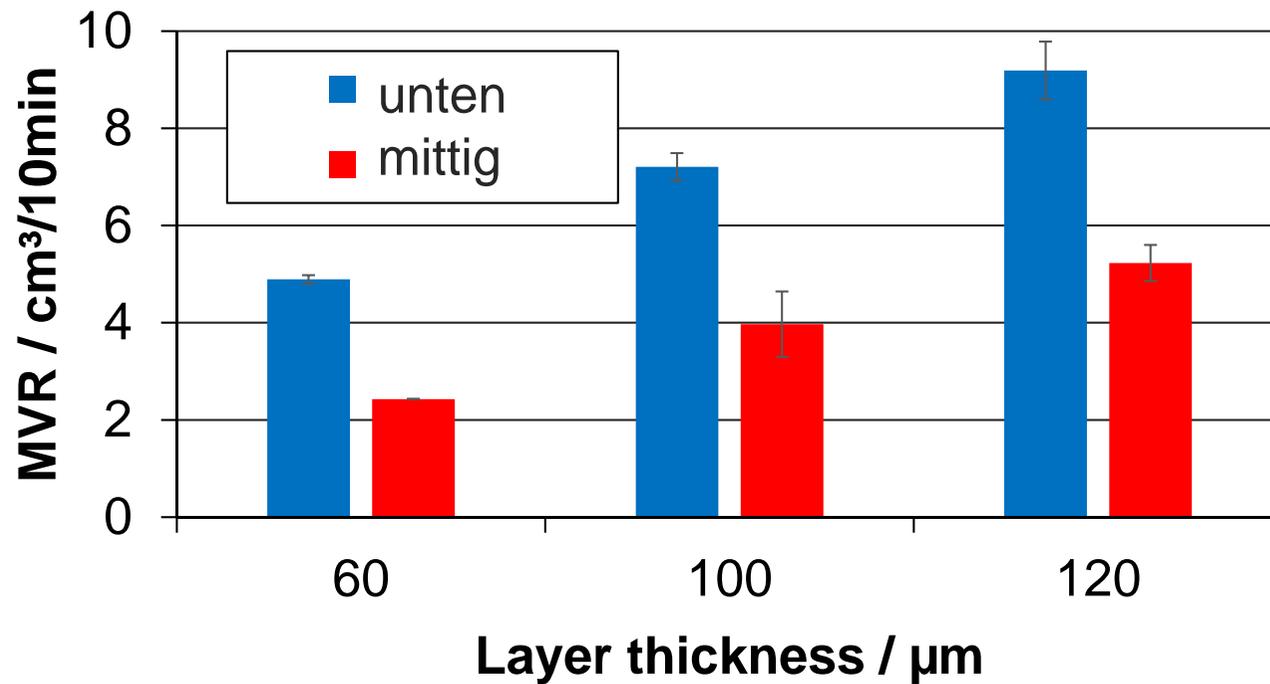


- Die größten Änderungen können zwischen 0°C und 60°C beobachtet werden
- Bisher kein großer Unterschied zwischen den verschiedenen Schichtstärken

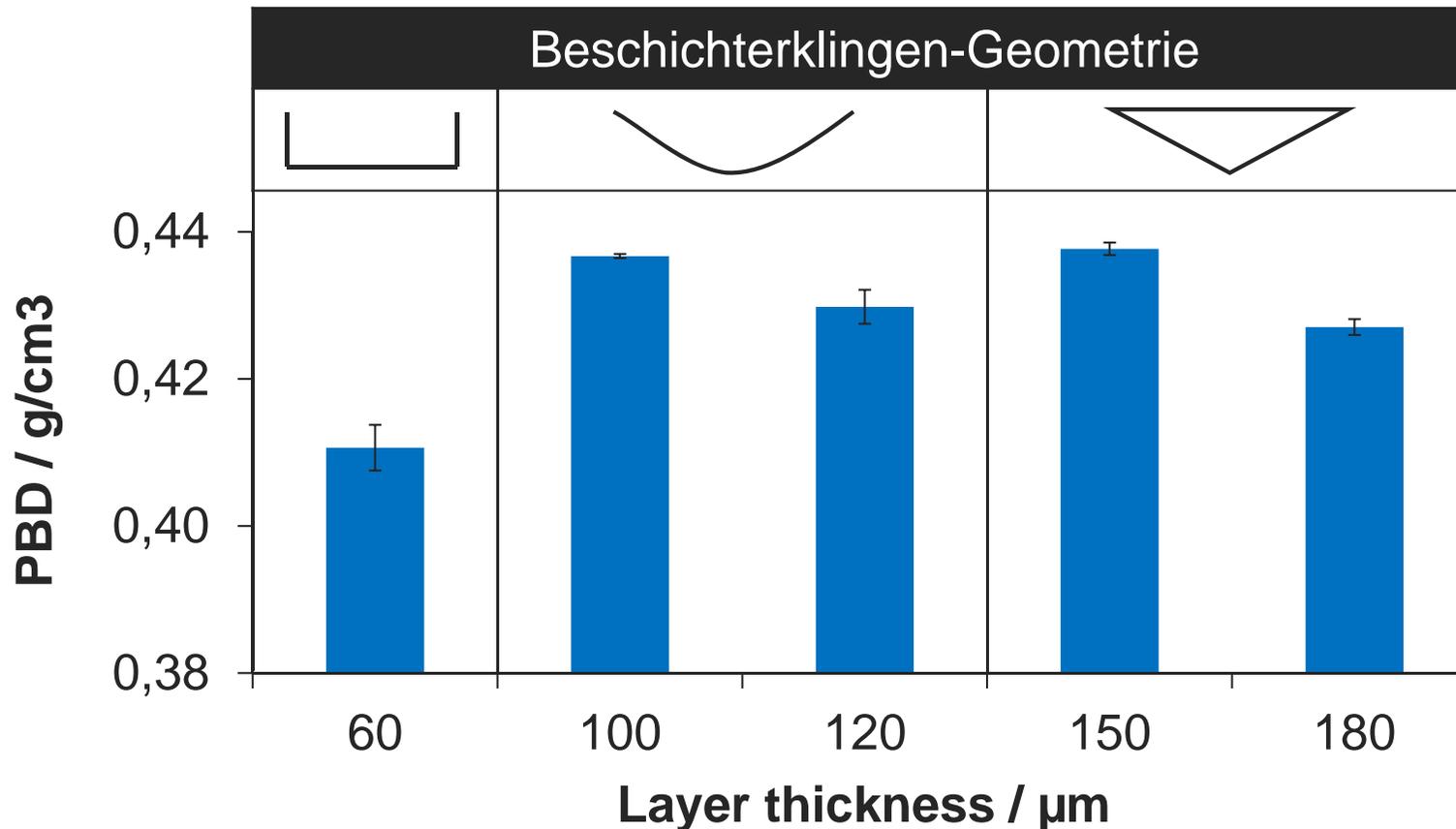


Reproduzierbarkeit über 6 Baujobs (120 µm)

- MVR (unten): $9,4 \pm 0,9 \text{ cm}^3/10\text{min}$ ($\pm 9,6\%$)
- MVR (mitte): $4,0 \pm 0,9 \text{ cm}^3/10\text{min}$ ($\pm 22,5\%$)



- MVR des Baupulvers: $31 \text{ cm}^3/10\text{min}$
- Pulver wurde nach dem Bau aus den Pulverboxen entnommen und homogenisiert
- **Dünne Schichtstärken verursachen niedrige MVR-Werte (→ stärkere therm. Belastung)**
- **Höhere MVR-Werte am Bauraumrand (→ schnelleres Abkühlen → geringere th. Belast)**



- Durchschnittswert aller Baujobs der jeweiligen Schichtstärke
- Keine Abweichungen zwischen verschiedenen Positionen im Bauraum

- PBD verändert sich bei unterschiedlichen Beschichterklängen und Schichtstärken
- Für dieselbe Klingengeometrie liefert die dünnere Schichtstärke die höhere PBD
- Angleich der unterschiedlichen Kompressionsgrade

Agenda

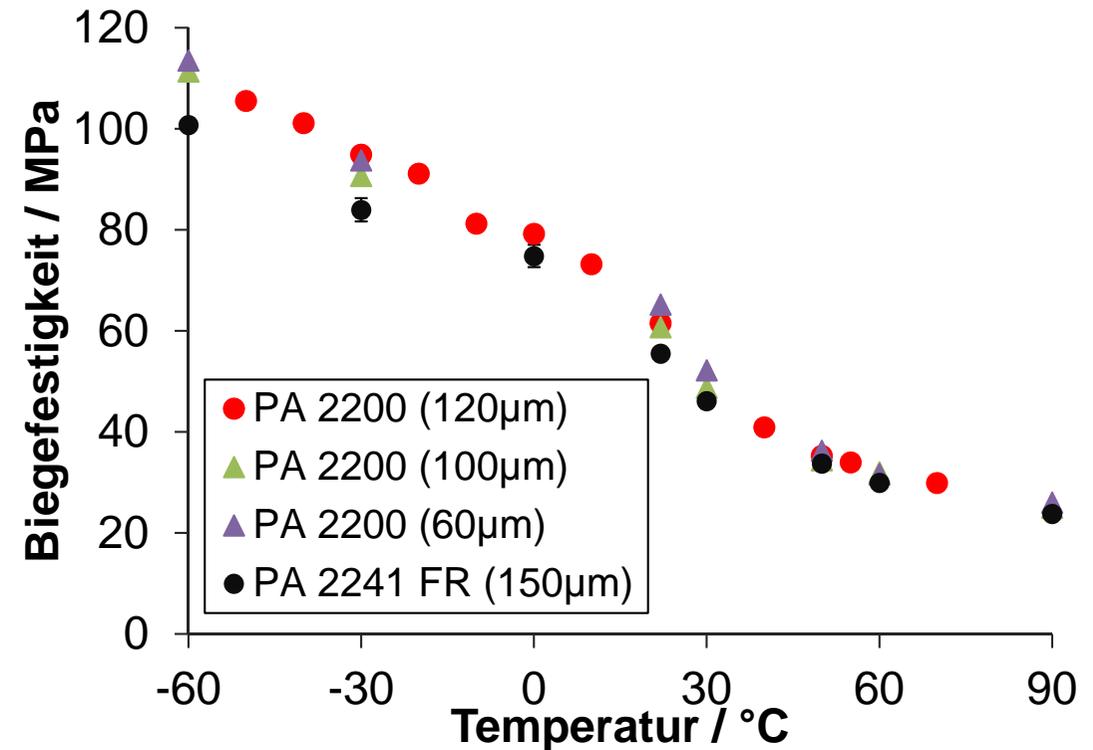
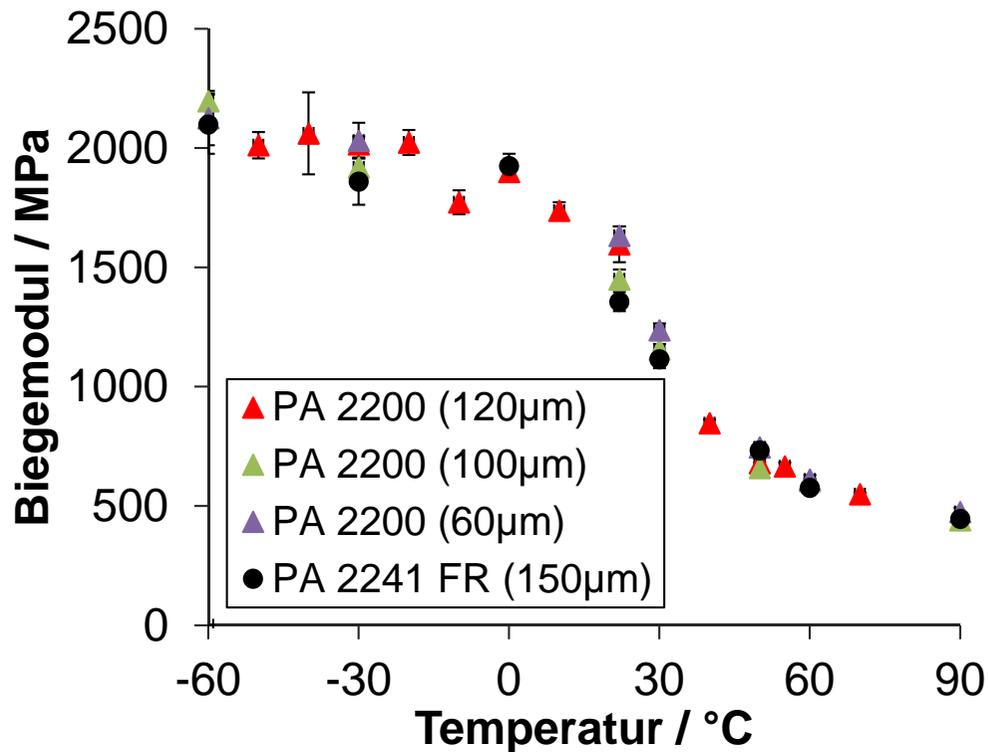
Einleitung

LS Qualitäts-Prozesskette

Ergebnisse für PA 2200

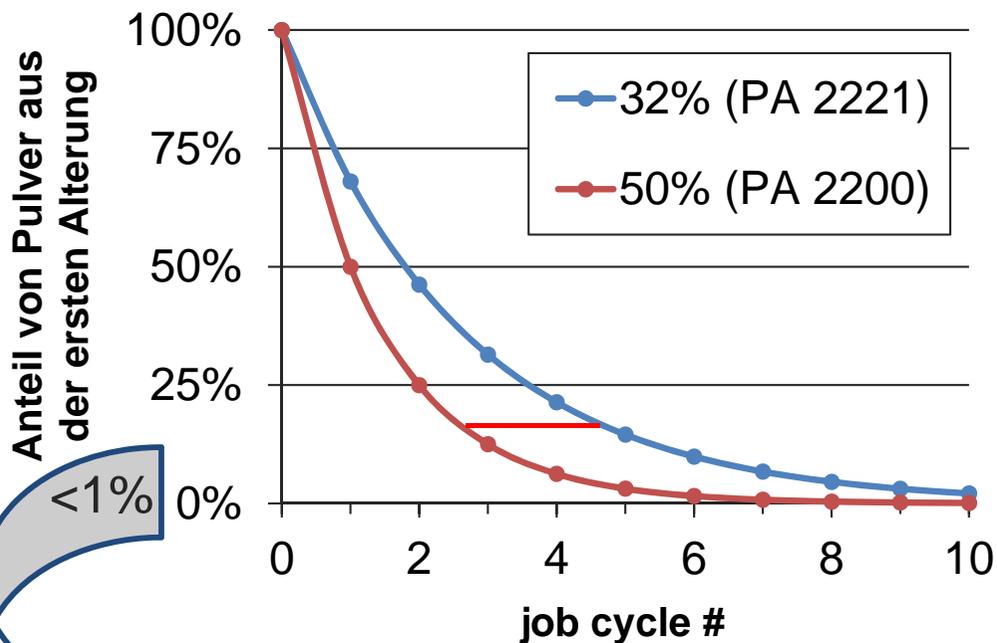
Untersuchung von PA 2221 / PA 2241 FR

Zusammenfassung und Ausblick



- Hier: Ergebnisse für verschiedene Schichtstärken, da noch Messreihen ausstehen
- Vergleichbarkeit ist wegen geringer Schichtstärkenabhängigkeit gegeben
- **Biegemodul liegt im selben Bereich wie PA 2200**
- **Biegefestigkeit ist nur bei tiefen Temperaturen etwas geringer als bei PA 2200**

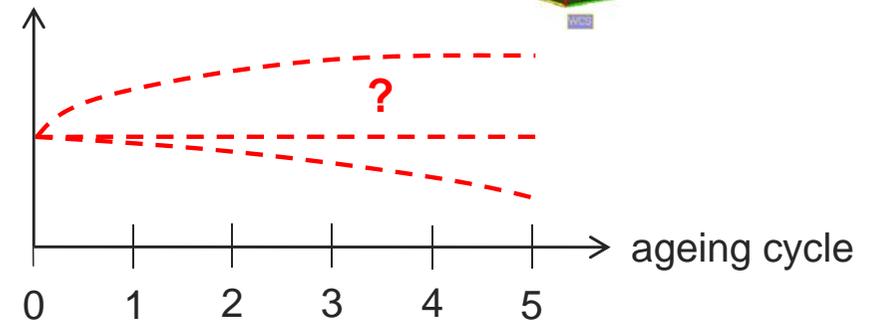
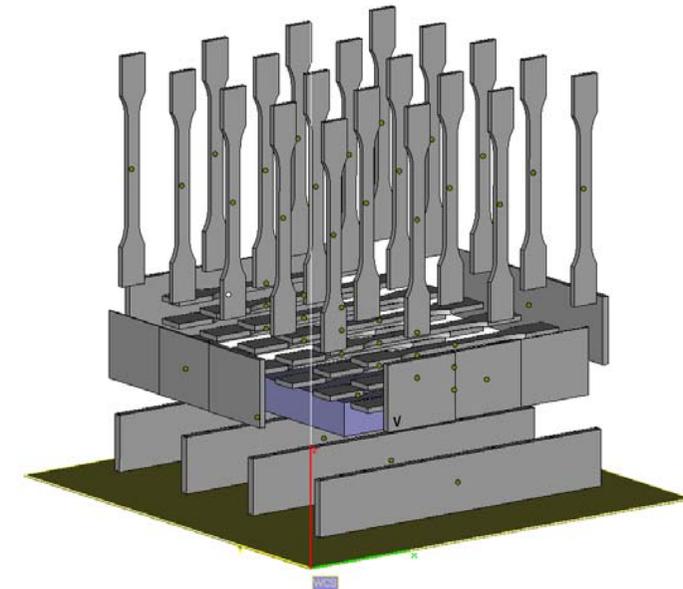
Problem: Repräsentatives Pulveralter muss erst ermittelt werden (Anzahl / Intensität der Bauzyklen)

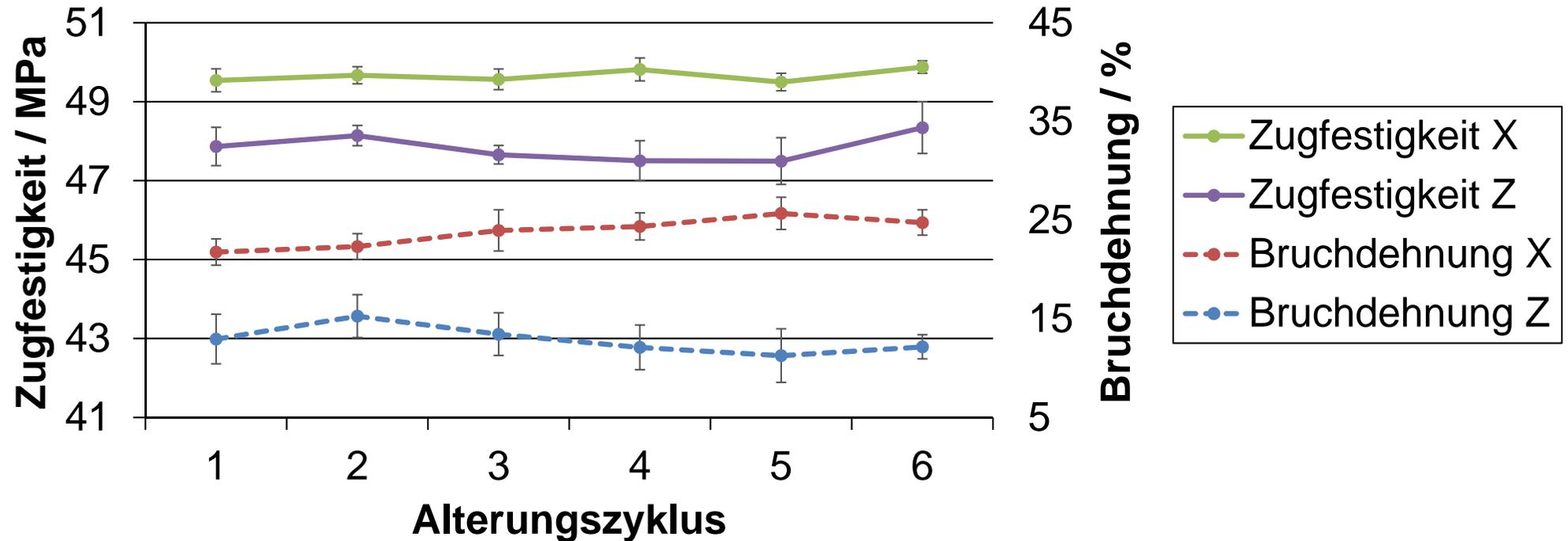


PA 2200: 7 Bauzyklen
PA 2221: 12 Bauzyklen

Ansatz: Experimente mit fortschreitendem Pulveralter, bis sich konstante Messwerte einstellen

tensile strength,
MVR,
warpage,
sink marks





- Prüfung trocken bei Raumtemperatur, Auffrischrates 32%
- Bis zum 6. Alterungszyklus lässt sich kein klarer Trend erkennen
- Für trockene Proben in z-Richtung liegt die Zugfestigkeit von PA 2221 ca. 3 MPa unterhalb jener von PA 2200; die Bruchdehnung ist ca. 3 % größer

Agenda

Einleitung

LS Qualitäts-Prozesskette

Ergebnisse für PA 2200

Untersuchung von PA 2221 / PA 2241 FR

Zusammenfassung und Ausblick

LS Qualitäts-Prozesskette

- Zur Qualifikation, Verifizierung und Validierung des Laser Sinter Prozesses müssen eine Vielzahl an Einflussfaktoren entlang der Prozesskette berücksichtigt werden.
- Die erarbeiteten Maßnahmen erlauben die Fertigung von Bauteilen mit reproduzierbaren mechanischen Eigenschaften, sofern keine Fehler auftreten

→ **Reproduzierbare Qualitätsmerkmale und verlässliche Materialdaten**

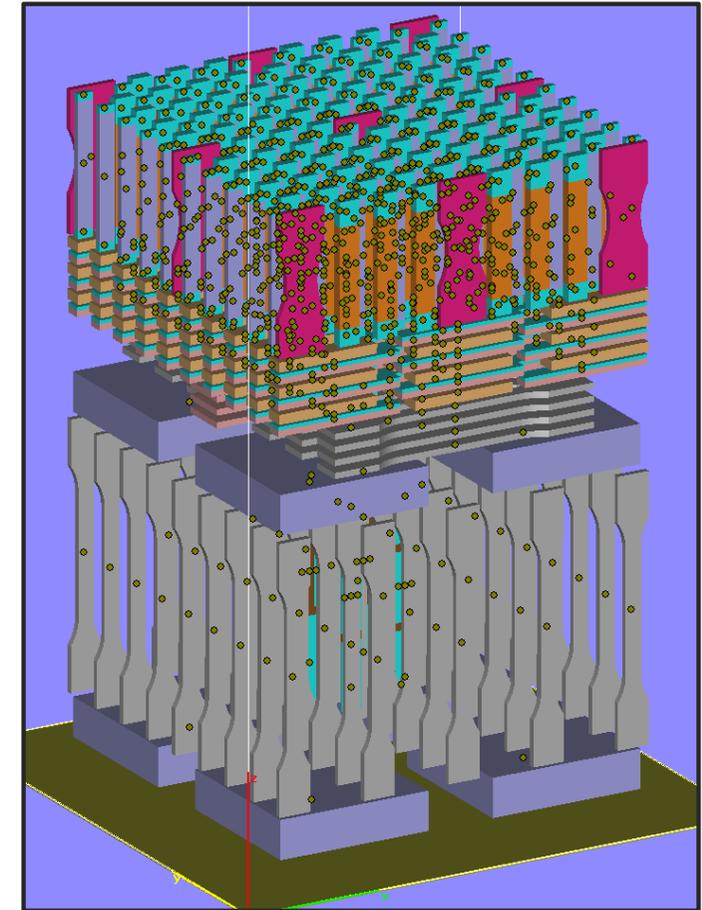
Materialdaten

- Die Prüftemperatur beeinflusst die mechanischen Bauteileigenschaften massiv.
- Die Schmelze-Flussrate (MVR) spiegelt die thermische Alterung / Historie wieder.

→ **Einzelne Parametervariationen können nun isoliert durchgeführt werden**

→ **Der Vergleich verschiedener Materialien bei gleicher Prozesskette ist möglich**

- Untersuchung weiterer Bauteileigenschaften → 2. Testjob
 - Kriechen
 - Porosität / Dichte
 - Dauerfestigkeit
 - Thermische Eigensch.
 - Schlagversuch
 - Elektrische Eigensch.
- Prüfen und Vergleichen weiterer Materialien
→ ggf. Optimierung von Prüfmethoden
- Prüfung verschiedener Chargen und Materialqualitäten
- Vergleich verschiedener LS Systeme
- Ausführliche Untersuchung des Abkühlprozesses und dessen Auswirkung auf die Bauteilqualität
- Ermittlung weiterer Pulvercharakterisierungsmethoden
→ Alternativen zum MVR-Wert



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



M. Sc. Stefan Josupeit

***Direct Manufacturing Research Center – DMRC
Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik – PVT
Universität Paderborn***

***Mersinweg 3
33100 Paderborn***

Fon: +49 (0) 5251 / 60 – 5410

Fax: +49 (0) 5251 / 60 – 5409

Mail: stefan.josupeit@dmrc.de