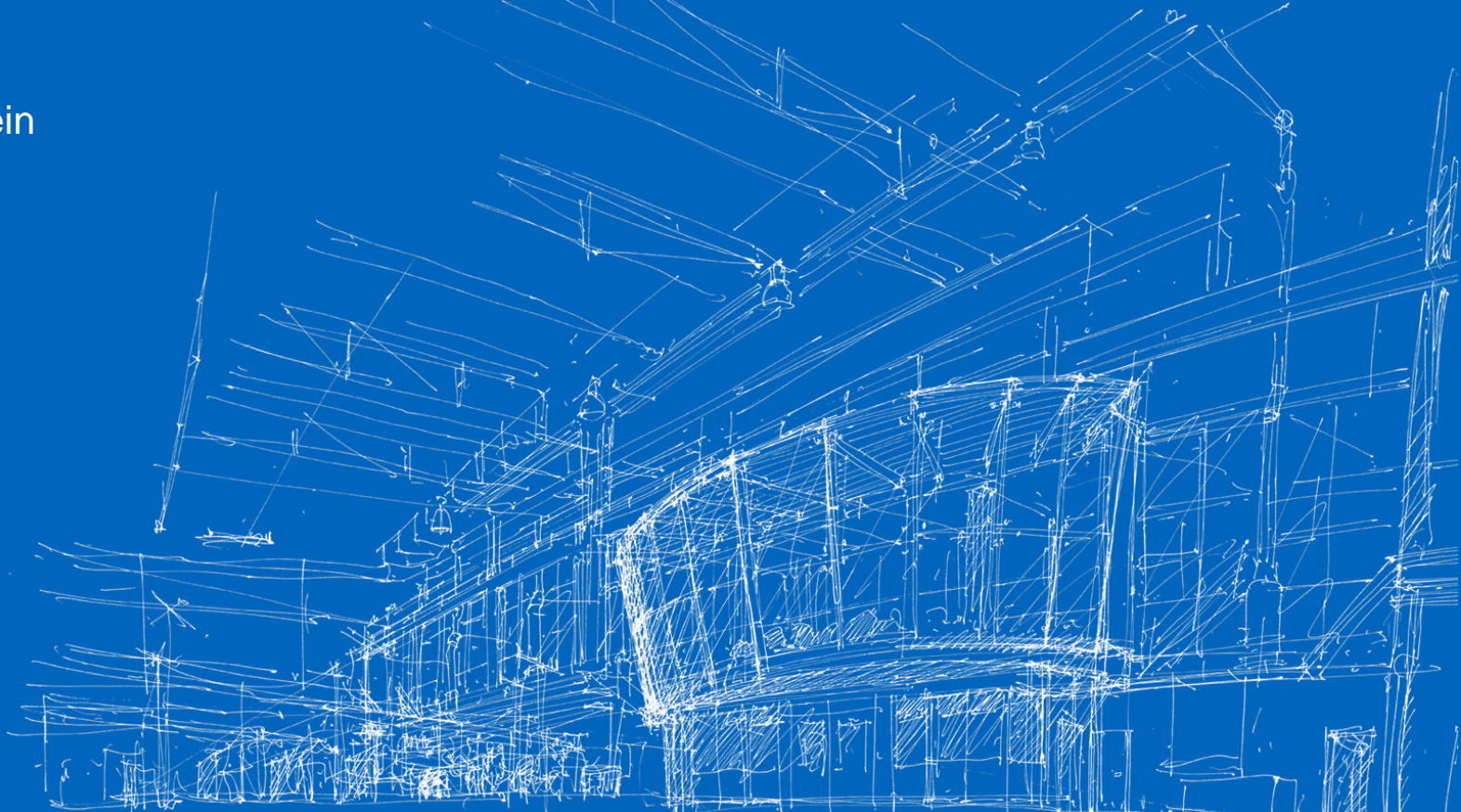


# Eigenstressungen additiv gefertigter IN718- Proben

Additive Fertigung – Neue Herausforderungen für die zerstörungsfreie Prüfung

Fabian Bayerlein

TU München




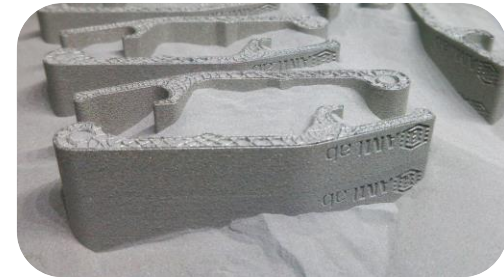
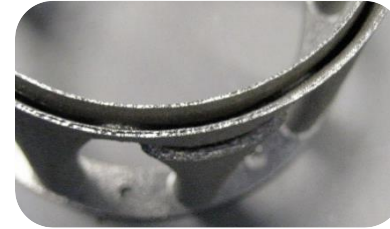
*Leitstand des iwib, TUM.*

- 1 Motivation**
- 2 Vorgehensweise**
- 3 Ergebnisse**
- 4 Zusammenfassung und Ausblick**

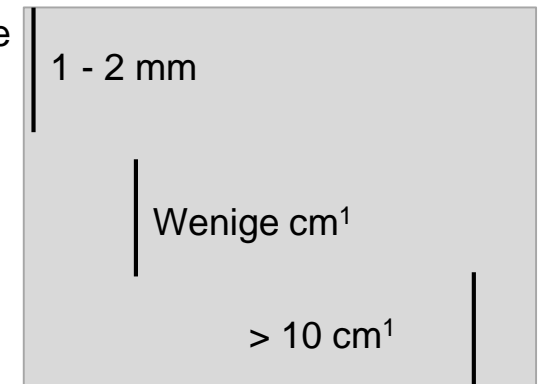
- 1 Motivation**
- 2 Vorgehensweise**
- 3 Ergebnisse**
- 4 Zusammenfassung und Ausblick**

## Additive Fertigung und Eigenspannungen

- Was sind Eigenspannungen?
  - Spannungen im Material ohne äußere Last
  - Entstehung durch Inhomogene Dehnungsfelder
- Warum sind Eigenspannungen ein Problem?
  - Verzug bei nachfolgenden Prozessen
  - Frühzeitiges Versagen im Lastfall
- Was kann man dagegen tun?
  - Kugelstrahlen, Walzen (Oberfläche)
  - Spannungsarmglühen (Volumen)
- Wie kann man Eigenspannungen messen?
  - Zerstörend 
  - Zerstörungsfrei
    - Herausforderung Eindringtiefe



Bohrloch-Methode



**1** Motivation

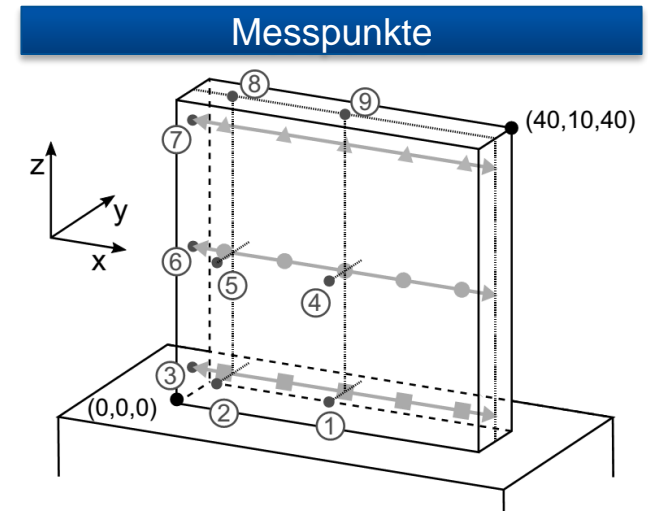
**2** Vorgehensweise

**3** Ergebnisse

**4** Zusammenfassung und Ausblick

## Studie

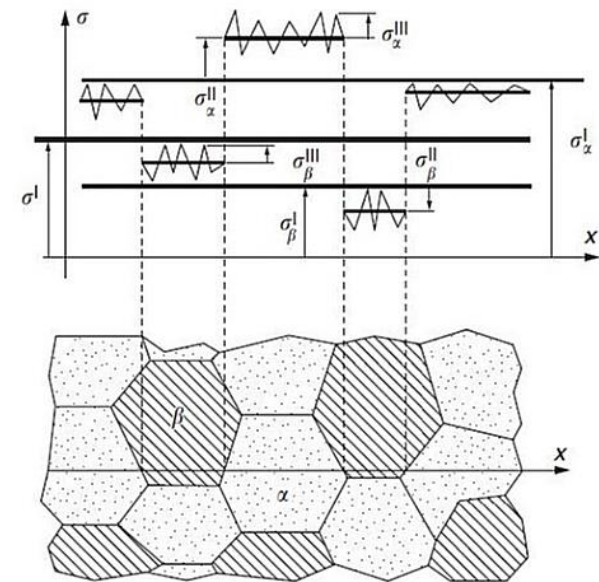
- Zweck
  - Eigenspannungsverteilung im Volumen bei LBM<sup>1</sup>-Bauteil
  - Validierungsdaten für Struktursimulation
- Probengeometrie
  - Quaderförmiger Testkörper (40x10x40 mm<sup>3</sup>)
    - Einfache Geometrie: Automatisierbarkeit der Messung ↑
    - Geringe Dicke: Neutronenabschwächung ↓
- Fertigung der Probe
  - Material: IN718 (Nickelbasislegierung), Einsatztemperatur bis 650 °C
  - Laserstrahlschmelzen mit 20 µm Schichthöhe und Standardparametern
- Untersuchung
  - Neutronendiffraktometrie (@STRESS-SPEC (MLZ<sup>2</sup>))
  - Röntgendiffraktometrie (@MTU Aero Engines AG)
  - Bohrlochuntersuchungen(@MTU Aero Engines AG)



## Grundlagen der Neutronendiffraktometrie

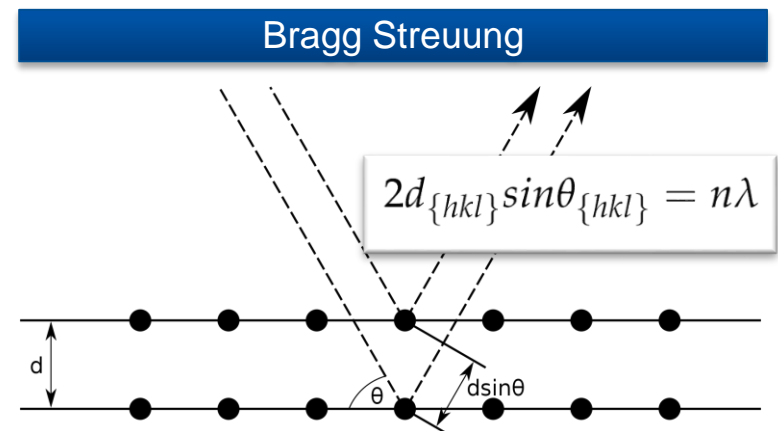
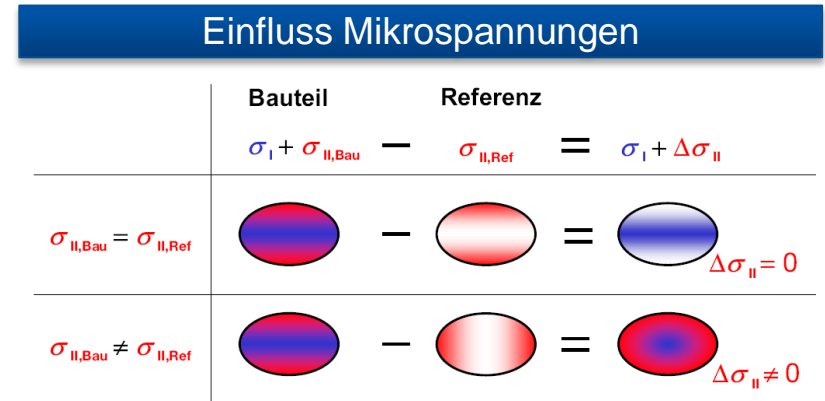
- Eigenspannungen: Spannungen im Material in der Abwesenheit von externen Kräften
- Unterschiedliche Skalen von Eigenspannungen
  - 1. Art: Ausgleich über die gesamte Struktur
  - 2. Art: Ausgleich innerhalb eines Korns
  - 3. Art: Spannungen innerhalb eines Korns

### Eigenspannungsskalen



## Grundlagen der Neutronendiffraktometrie

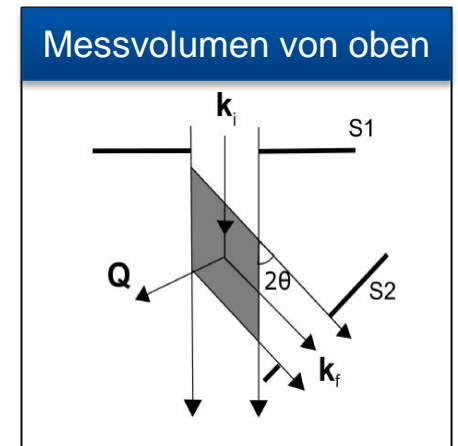
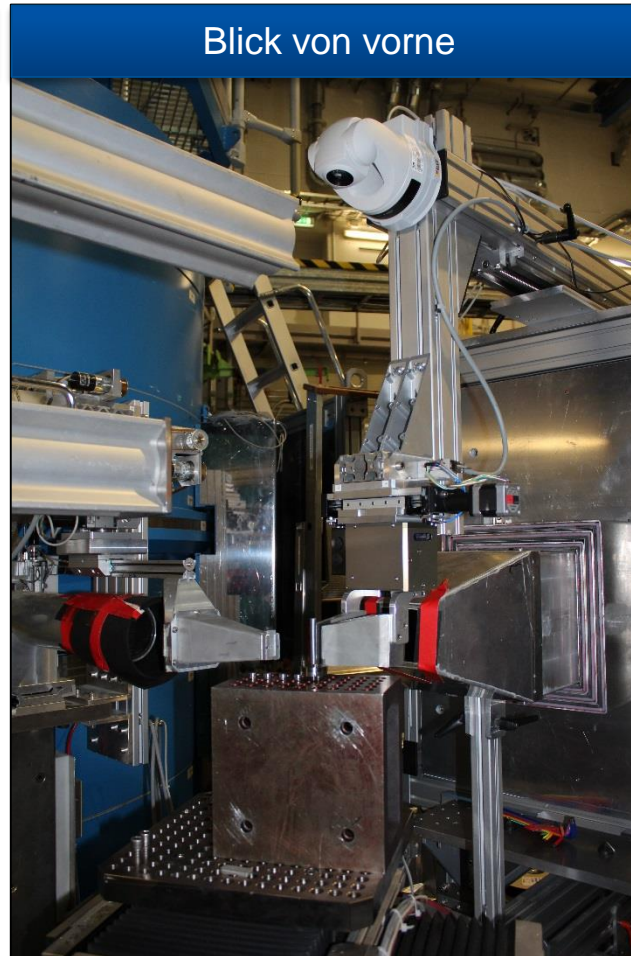
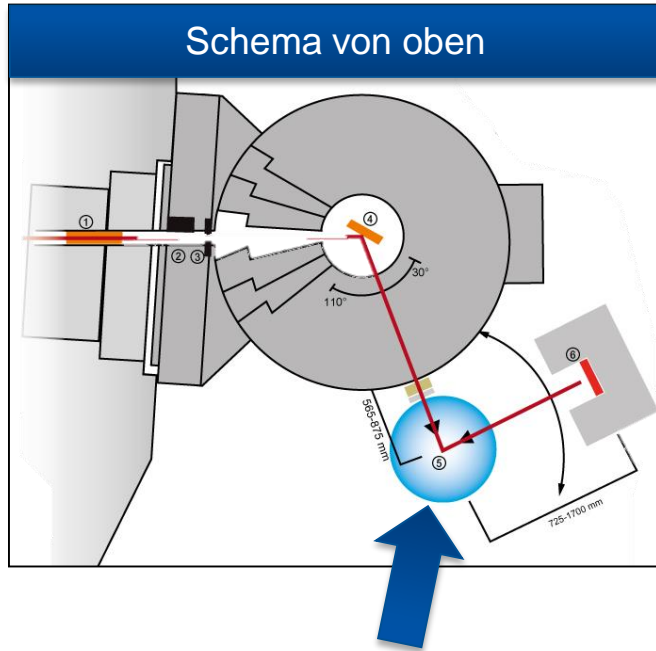
- Eigenspannungen: Spannungen im Material in der Abwesenheit von externen Kräften
- Unterschiedliche Skalen von Eigenspannungen
  - 1. Art: Ausgleich über die gesamte Struktur
  - 2. Art: Ausgleich innerhalb eines Korns
  - 3. Art: Spannungen innerhalb eines Korns
- Messung
  - Grundlage: Bragg-Streuung
  - Konstruktive Interferenz unter bestimmten Winkeln
  - Gitterdehnung → Verschiebung der Interferenzmaxima
- Probenorientierung
  - Einkristall – Abstrahlung in eine Richtung
  - Polykristall – Abstrahlung in alle Richtungen: -> Debye-Scherrer-Kegel





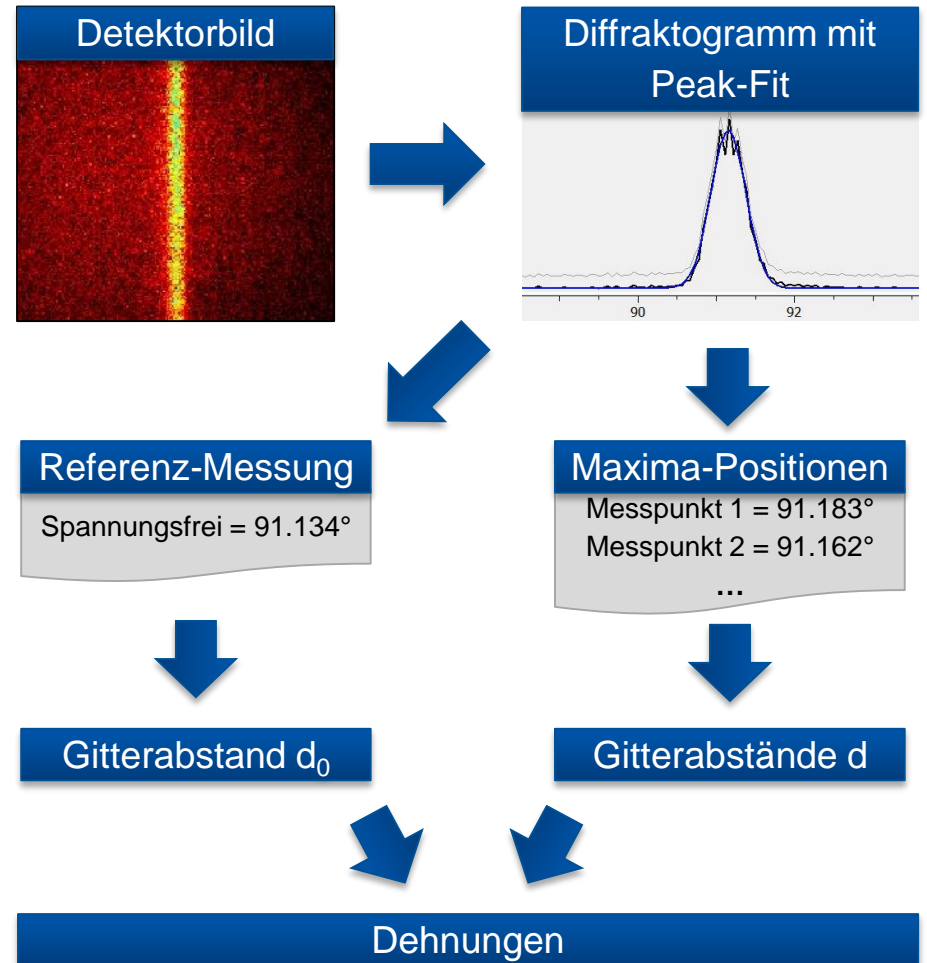
# Vorgehensweise

## Das Instrument STRESS-SPEC



## Auswertung

- Gitterabstand  $\rightarrow$  Dehnung
  - Hohe Bedeutung des  $d_0$ -Parameters
  - Test verschiedener Referenzproben (Zylinder, Pulver) in verschiedenen Zuständen (wie gebaut, spannungsarmgeglüht)
- Dehnung  $\rightarrow$  Spannung
  - Querdehnungseffekte: Dehnung in min. 3 Richtungen (jeweils senkrecht zueinander) notwendig
  - Berechnung mit Hookeschem Gesetz:
 
$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \cdot \left[ \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right]$$
  - Voller Spannungstensor: min. 6 Messungen in unabhängige Richtungen notwendig



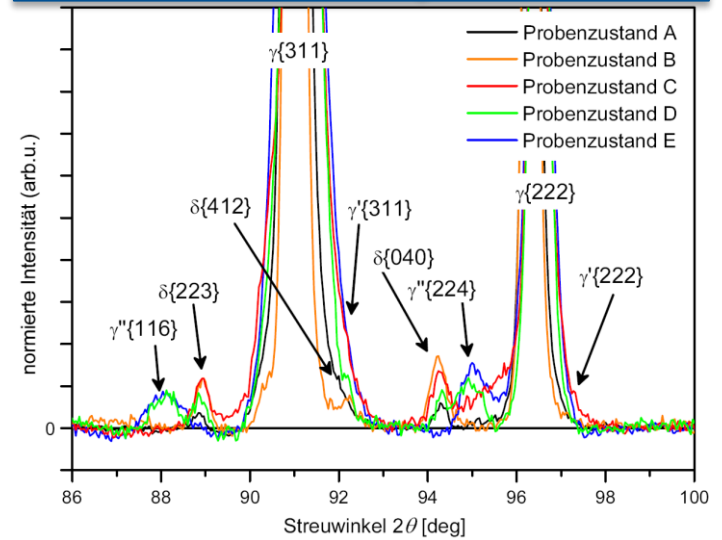
## Versuchsdurchführung

- Wahl des Gitterabstandes
  - IN 718:  $\gamma$ - Matrix und Ausscheidungshärtung durch  $\gamma'$ - und  $\gamma''$ - Phase
  - Auswahl für Messung:  $\gamma\{311\}$ 
    - Wenig texturanfällig
    - Wenig Einfluss anderer Reflexe
- Messung
  - Optische Positionierung + Eintauchscans  
→ Fehlerquelle unvollständige Immersion
  - Messzeit pro Messpunkt 1 – 30 Minuten  
→ Signal-Rausch-Verhältnis
  - Automatisierung der Probenpositionierung in 4 Achsen  
→ Betreuungsaufwand

### Zusammensetzung IN178

Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C	B
52	19	19	5.3	3.1	0.95	0.55	0.03	0.005

### Übersichts-Diffraktogramm IN718



**1** Motivation

**2** Vorgehensweise

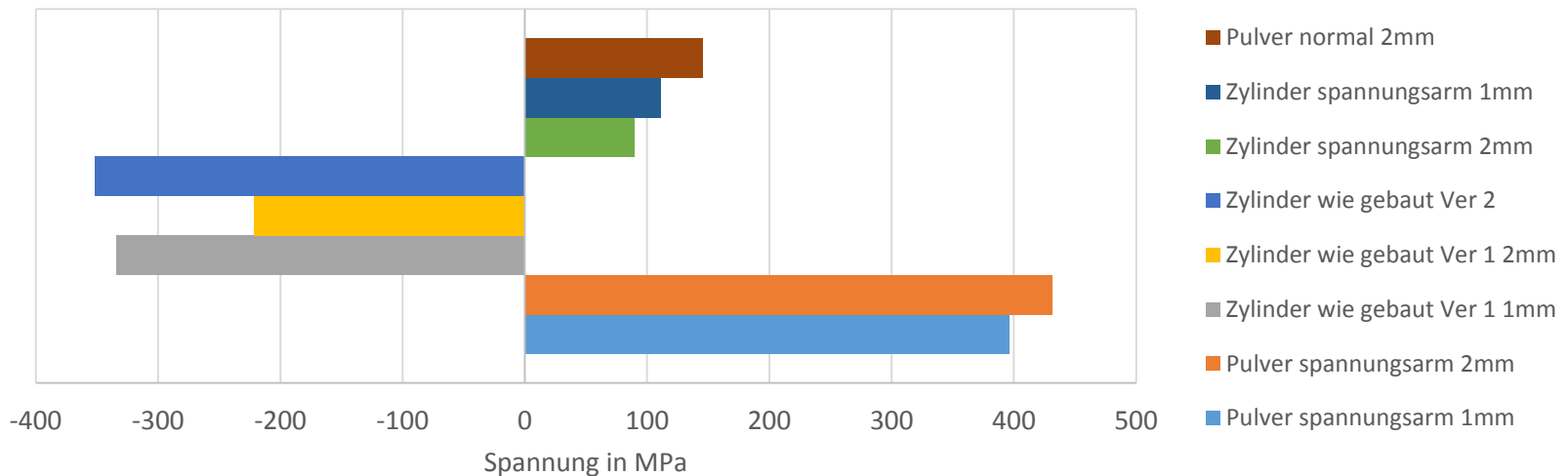
**3** Ergebnisse

**4** Zusammenfassung und Ausblick

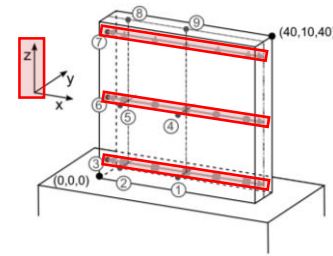
## Spannungsfreie Referenz

- Messvolumen
  - Einfluss geringer als Probenart
  - Ergebnisse mit verschiedenen Messvolumen nur begrenzt vergleichbar
- Art der Referenzprobe
  - Keine Probe eignet sich als universelle Referenz → fehlende Einhaltung mech. Randbedingungen
  - Verwendung kleiner Quader an Messstellen aus äquivalenter Probe<sup>1</sup>

### Einfluss der Wahl der Referenzprobe auf einen beispielhaften Spannungswert

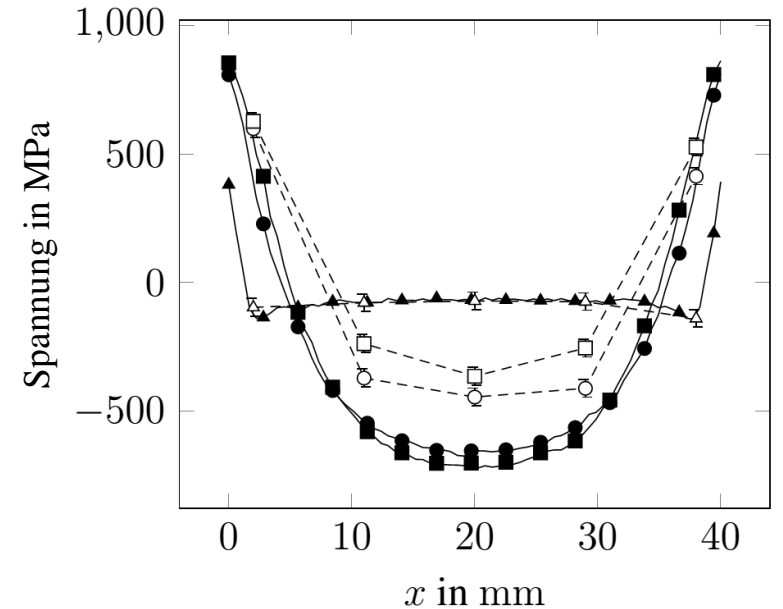


# Ergebnisse



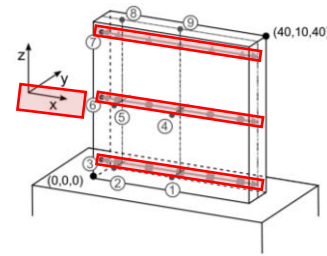
## Neutronendiffraktometrie - Normalspannungen

- Spannungsbild
  - Symmetrisch
  - Hohe Zugspannungen und Spannungsgradienten in Randbereichen
  - Geringe Spannung zur freien Oberfläche
  - Druckspannungen in den mittleren Bereichen des Bauteils
- Übereinstimmung Simulation <> Experiment
  - Gute qualitative Übereinstimmung
  - Druckspannungen werden überschätzt



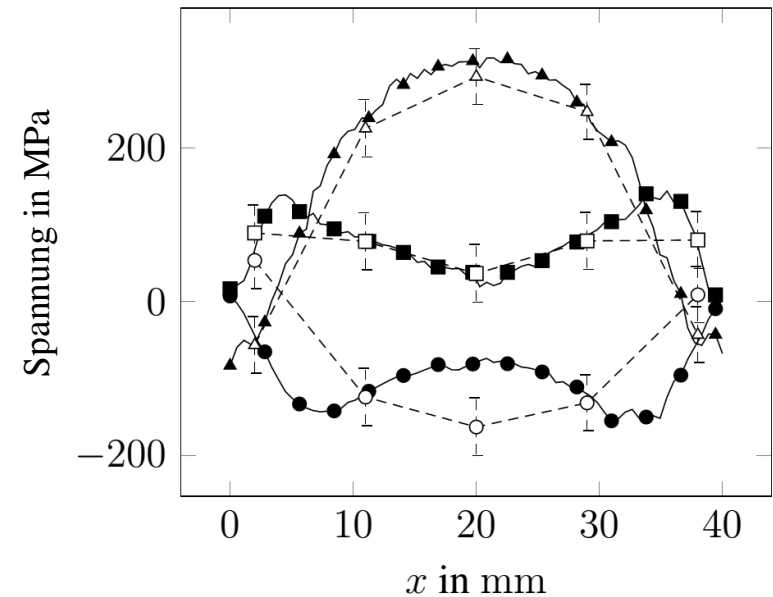
—▲— SIM  $z = 38$  mm —●— SIM  $z = 20$  mm —■— SIM  $z = 5$  mm  
-▲- ND  $z = 38$  mm -○- ND  $z = 20$  mm -□- ND  $z = 5$  mm

# Ergebnisse



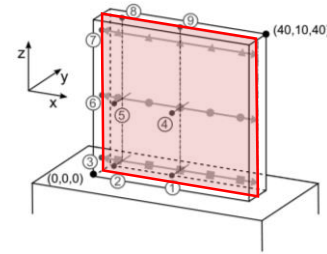
## Neutronendiffraktometrie - Longitudinalspannungen

- Spannungsbild
  - Symmetrisch
  - Moderates Spannungsniveau im gesamten Bauteil
  - Geringe Spannung zur freien Oberfläche
- Übereinstimmung Simulation <> Experiment
  - Gute qualitative Übereinstimmung



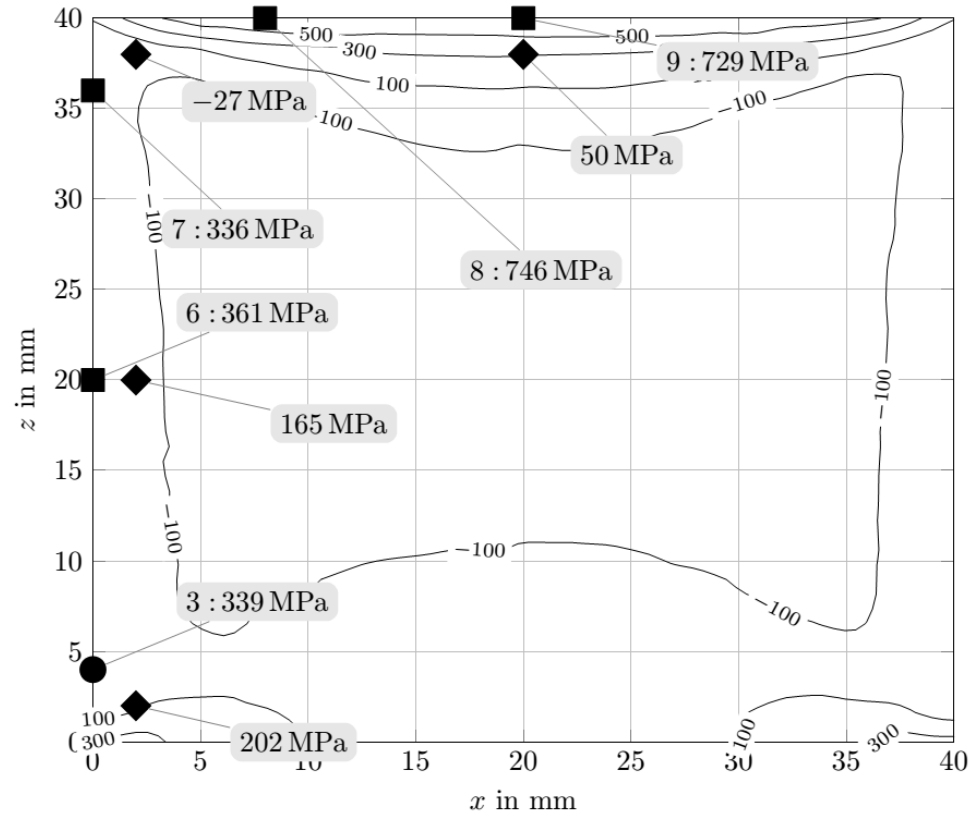
—▲— SIM  $z = 38$  mm —●— SIM  $z = 20$  mm —■— SIM  $z = 5$  mm  
- -▲- - ND  $z = 38$  mm - -○- - ND  $z = 20$  mm - -□- - ND  $z = 5$  mm

# Results



## Transversalspannungen in der Ebene

- Stresses
  - Symmetrisch
  - Hohe Zugspannungen an der Oberseite
  - Moderate Spannungen an den Seitenflächen
  - Hoher Spannungsgradient im oberen Bereich
  
- Übereinstimmung Simulation <> Experiment
  - Gute qualitative Übereinstimmung
  - Unterschätzung der Zugspannungen an der Oberseite
  - Unterschätzung der Zugspannungen an der Seitenfläche



Neutronendiffraktometrie- (Raute), Röntgendiffraktometrie- (Rechteck) und Bohrloch- (Kreis) Ergebnisse im Vergleich zur Simulation (Konturplot)



**1** Motivation

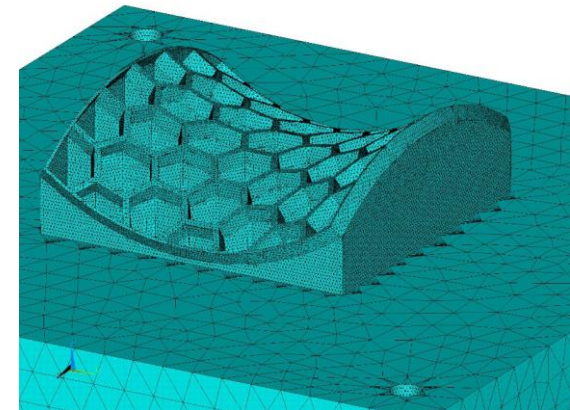
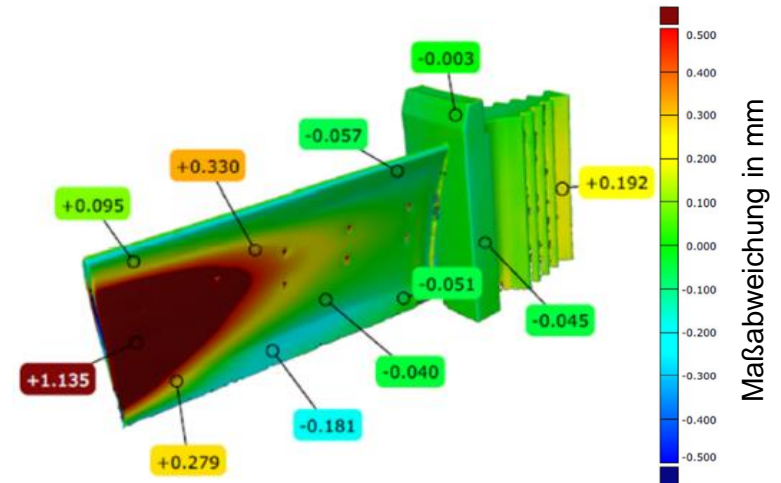
**2** Vorgehensweise

**3** Ergebnisse

**4** Zusammenfassung und Ausblick

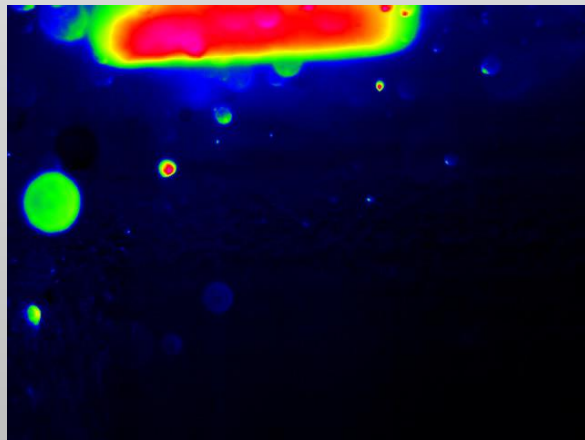
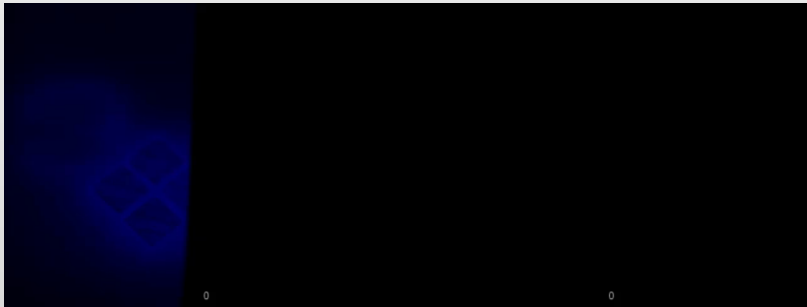
## Schlussfolgerungen

- Hohes Eigenspannungsniveau in additiv gefertigten Bauteilen  
→ Beherrschung notwendig
- Komplexe Geometrien & geringe Wandstärken  
→ Herausforderungen für die Eigenspannungsmessung
- Inhomogene Abkühlbedingungen im Bauteil  
→ Herausforderung für die spannungsfreie Referenzprobe
- Neuartige Werkstoffe  
→ Neue Herausforderungen bei der Identifikation geeigneter Streuebenen
- Vorhersage des Spannungszustandes für neuartige Geometrien benötigt simulative Vorhersage
- Ausführliche Ergebnisse in Veröffentlichung<sup>1</sup>

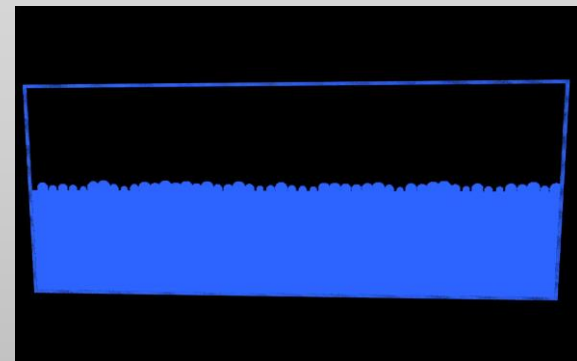
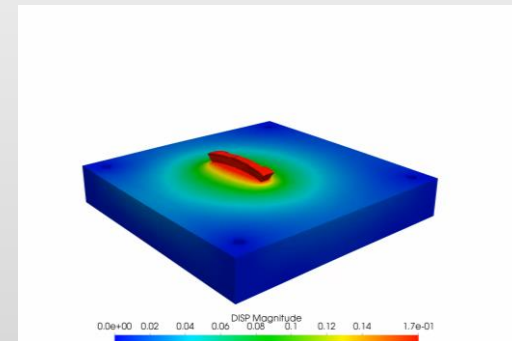


## Weitere Forschungsaktivitäten am iw b

### Prozessüberwachung



### Simulation





M. Sc.  
**Fabian Bayerlein**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften

Boltzmannstraße 15  
85748 Garching

Tel. +49.89.289.15532

Fax +49.89.289.15555

[fabian.bayerlein@iwb.mw.tum.de](mailto:fabian.bayerlein@iwb.mw.tum.de)

[www.iwb.tum.de](http://www.iwb.tum.de)

## Quellen

### BAYERLEIN 2016

BAYERLEIN, F., et al. Validation of modeling assumptions for the buildup simulation of laser beam melting on the basis of the residual stress distribution. In: *Proc. ECOMAS Congress*. Crete Island: Greece, 2016.

### BAYERLEIN 2018

BAYERLEIN, F., et al. Transient Development of Residual Stresses in Laser Beam Melting – A Neutron Diffraction Study. In: *Additive Manufacturing, unpublished*.

### HUTCHINGS 2005

Hutchings, M. T.: Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction. Boca Raton, FL [u.a.]: Taylor & Francis. 2005. ISBN: 978-0-415-31000-0.

### LODINI 2003

Lodini, A.: Calculation of residual stress from measured strain. In: *Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation*. CRC Press. 2003, S. 47–60. ISBN: 978-0-415-30397-2. DOI: 10.1201/9780203608999.pt2.

### REPPER 2010

Repper, J.: Einfluss mikroskopischer Eigenspannungen auf die makroskopische Eigenspannungsanalyse mittels Neutronenbeugung. Dissertation. M<sup>un</sup>chen: Technische Universit<sup>at</sup> M<sup>un</sup>chen. 2010.