

---

# EINFLÜSSE AUF DAS ZYKLISCHE WERKSTOFFVERHALTEN ADDITIV GEFERTIGTER METALLISCHER STRUKTUREN

## 16. Dynamik Symposium

Ermüdungsprüfung von additiv gefertigten Bauteilen und Strukturen  
am 9. April 2019 bei ZwickRoell in Ulm

---

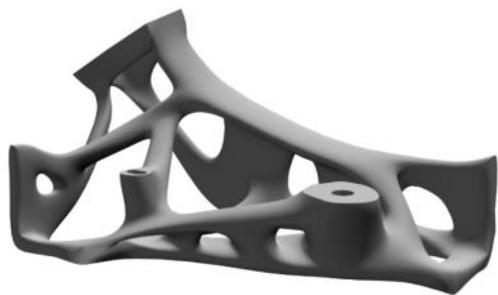
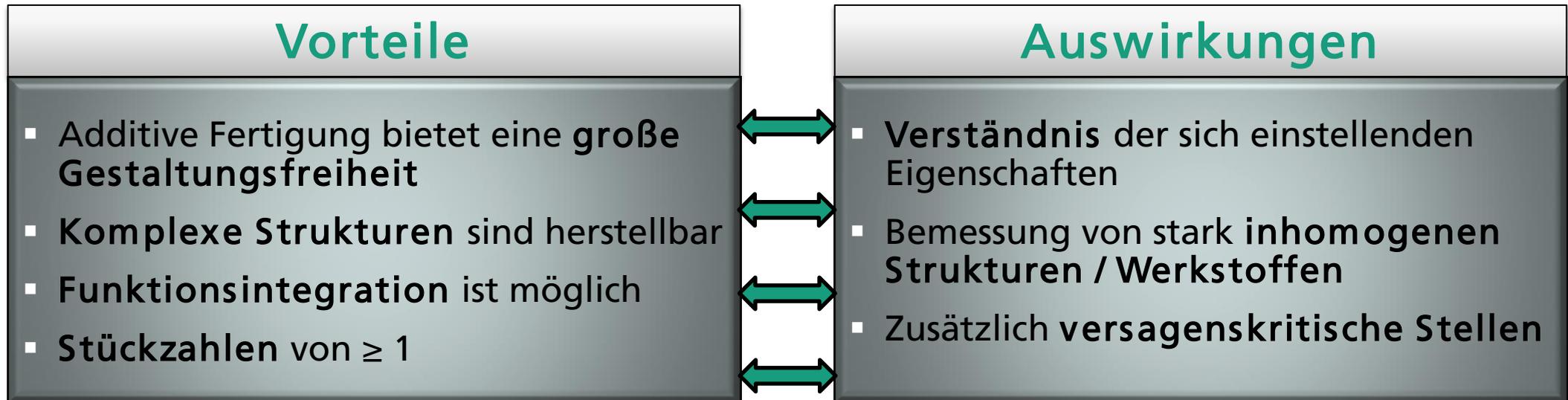


Benjamin Möller

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

[www.lbf.fraunhofer.de](http://www.lbf.fraunhofer.de)

# Motivation



**Additiv gefertigter  
Verbindungsknoten**  
Lastpfad optimiert

**Strangpress-  
profil**

**Funktionsintegrierte  
Fahrzeug Leichtbaustruktur**  
Demonstrator: Batterieträger

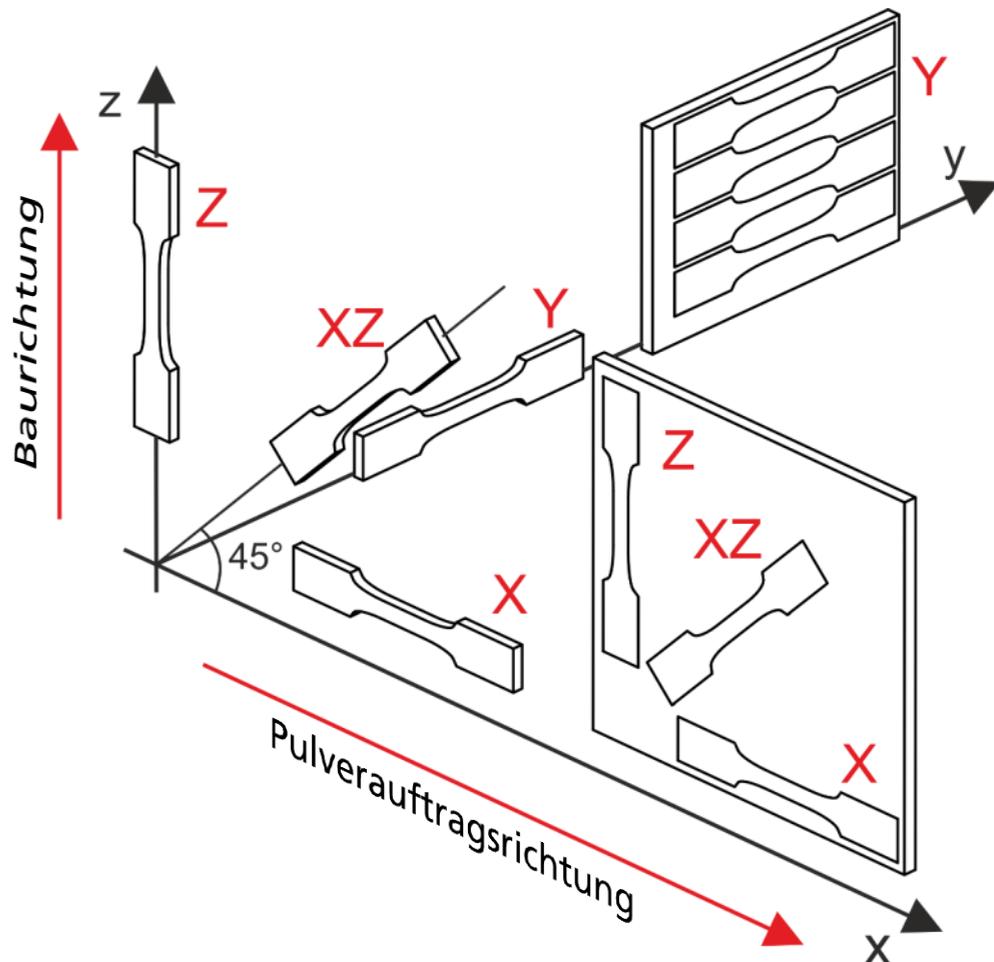
# Betriebsfestigkeit und ihre Einflussgrößen



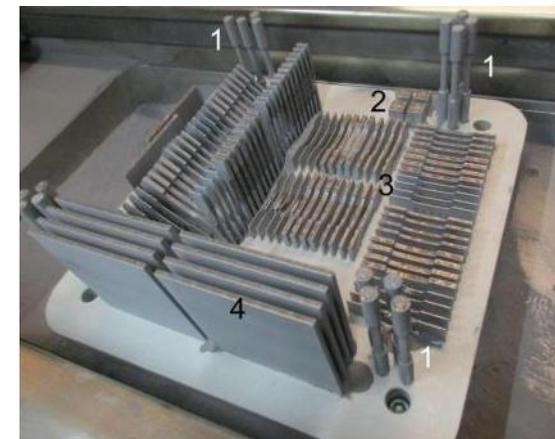
# Spezifische Kenngrößen der additiven Fertigung



# Selektives Laserschmelzen im Pulverbettverfahren

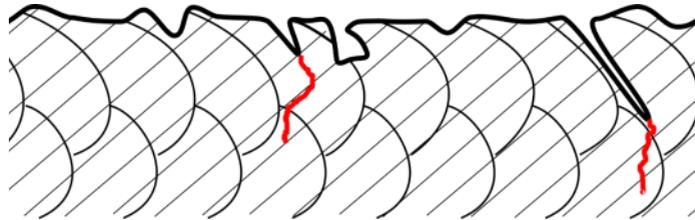


1. Metallpulver wird durch einen Laserstrahl schichtenweise geschmolzen und verbunden → Baurichtung ist orthogonal zu den Schichten
2. Auf jede aufgeschmolzene Schicht folgt eine neue Beschichtung in Pulverauftragsrichtung
3. Hauptrichtungen im Bauraum sind X, Y und Z

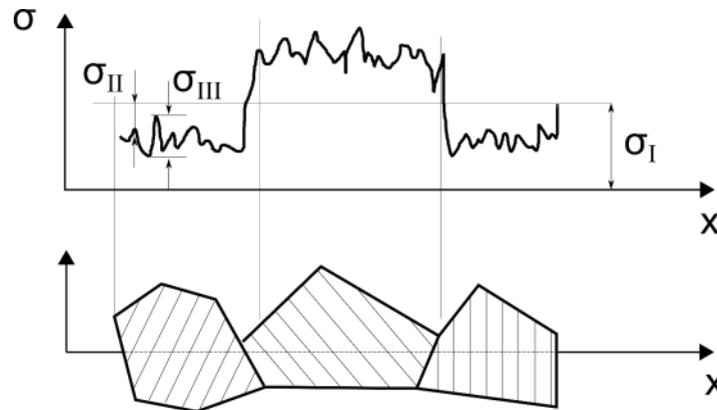


# Ausgewählte Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit

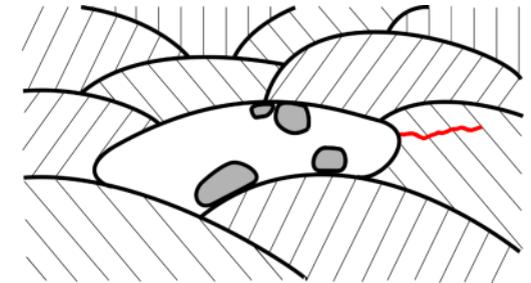
**Oberfläche:**  
Rauheit,  
Kerben,  
geschnittene  
Poren



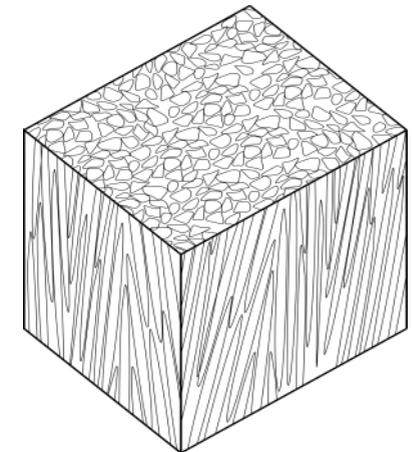
**Eigen-  
spannungen:**  
I. bis III. Art



**Innere  
Unregelmäßig-  
keiten:** Poren,  
nicht  
geschmolzene  
Partikel,  
unvollständige  
Verschmelzung



**Mikrostruktur:**  
Kornorientierung,  
Korngrenzen,  
Korngröße,  
Einschlüsse

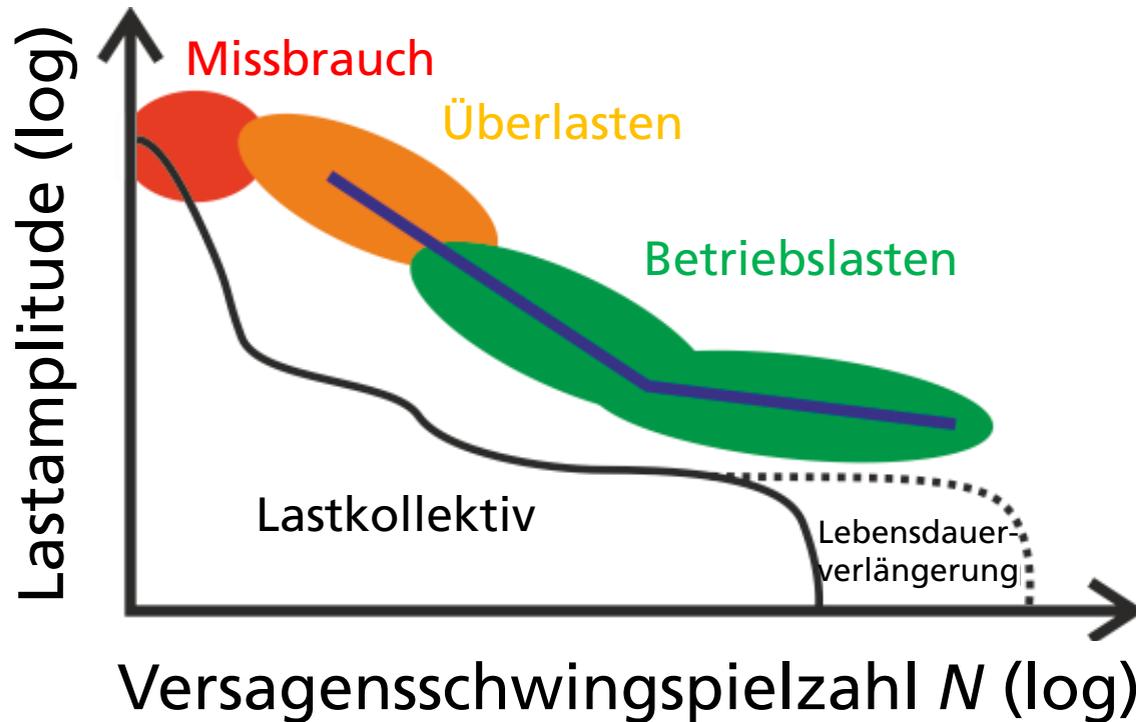


- Änderungen in den **Prozessparametern** führen auf vielfältige Struktureigenschaften
- Das Versagen wird maßgeblich durch die **Oberfläche** und **Unregelmäßigkeiten** bestimmt
- **Mikrostruktur** begründet Anisotropie und Strukturverhalten
- **Eigenspannungen** liegen vor, können hoch sein und die Schwingfestigkeit mindern

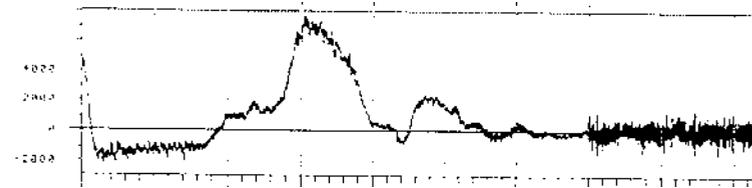
# Ermüdungsprüfung und Betriebsbelastungen



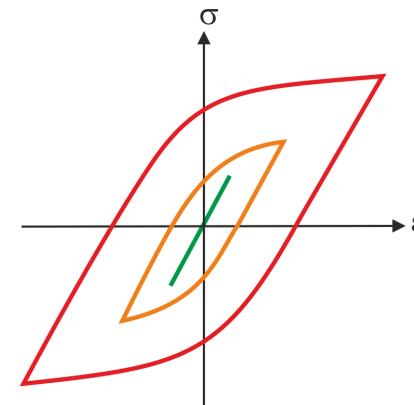
## Betriebsbelastungen



## Last-Zeit-Verlauf



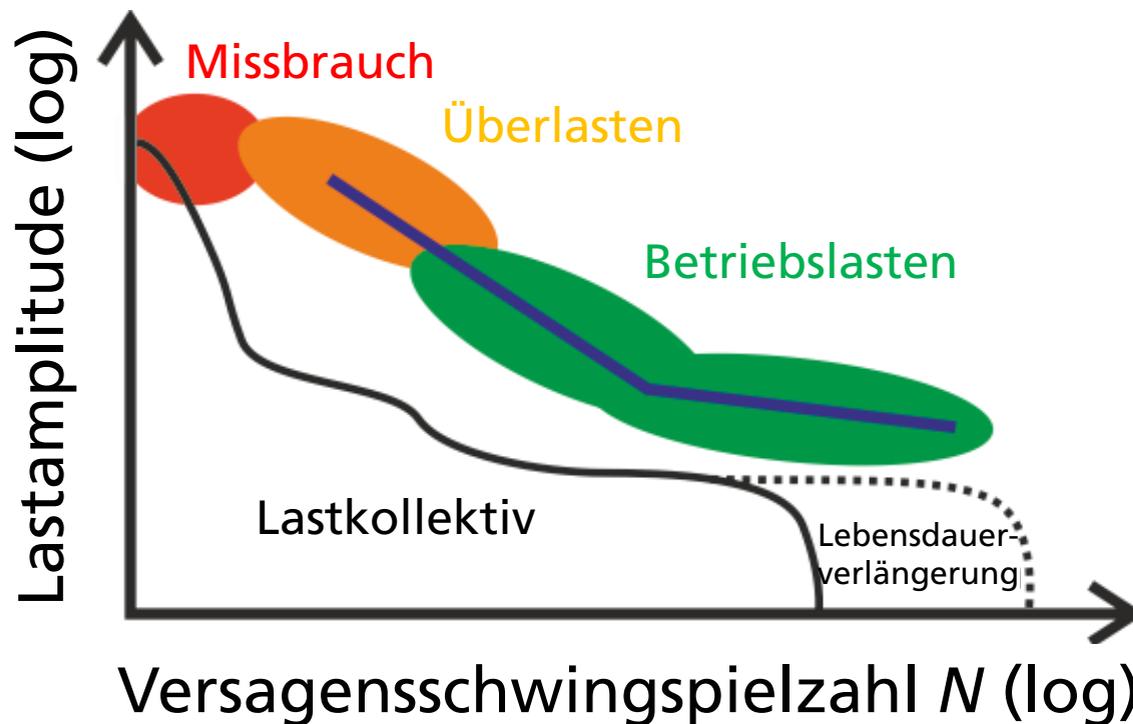
## Spannungs-Dehnungs-Verhalten



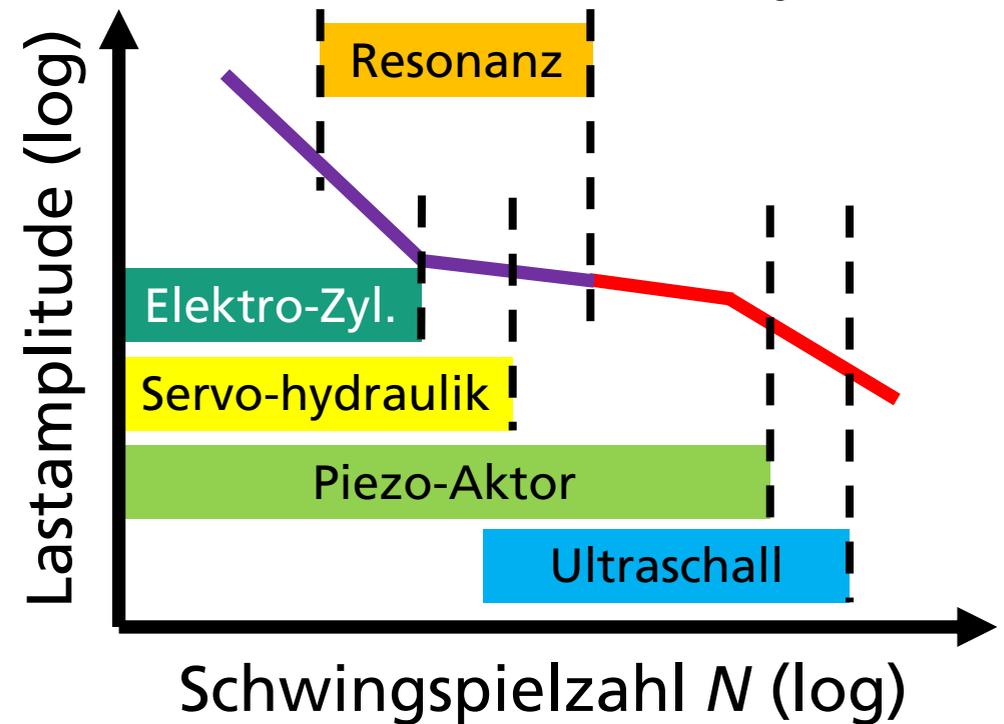
# Einsatz unterschiedlicher Aktorik zur Ermüdungsprüfung



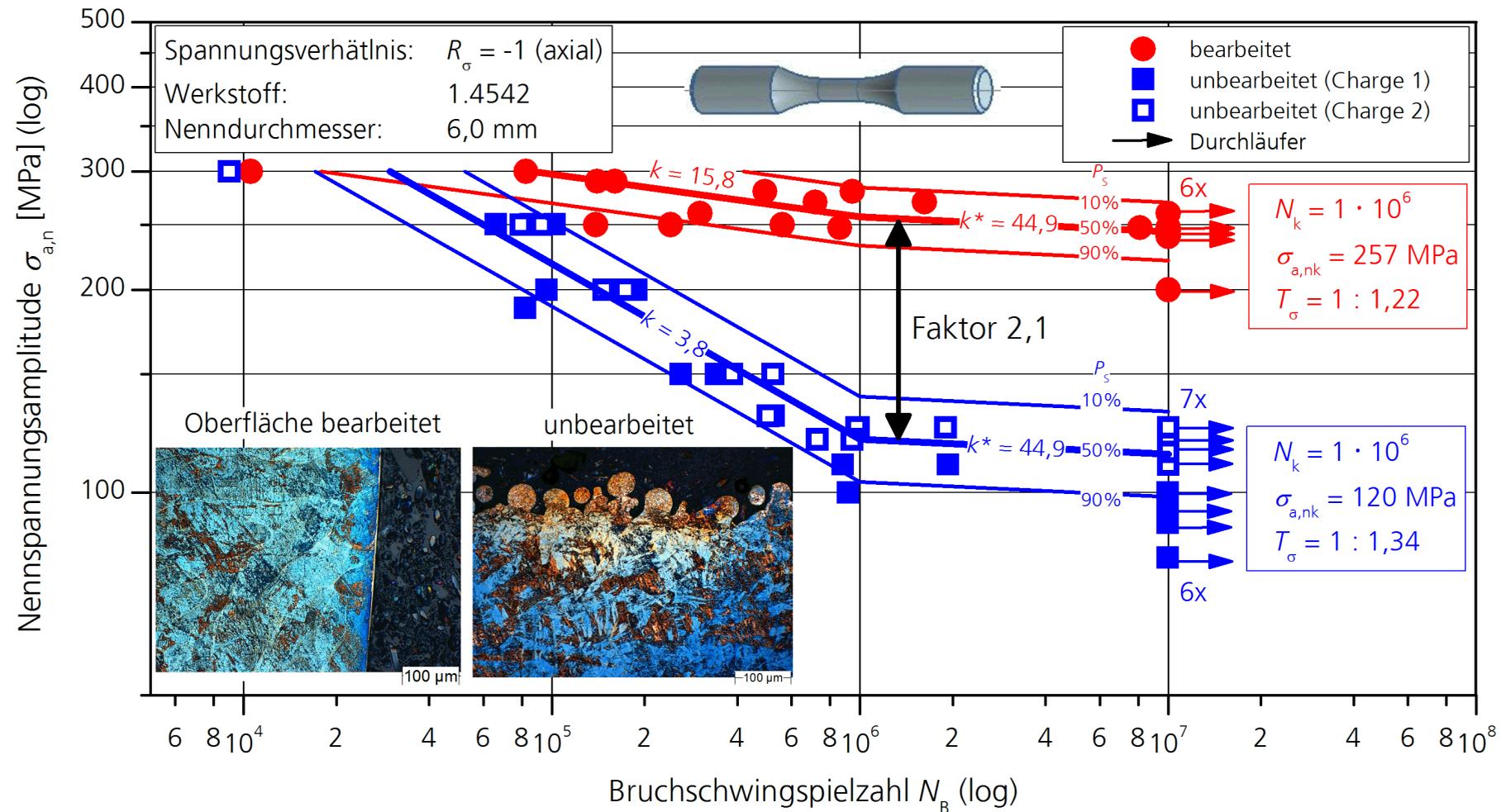
## Betriebsbelastungen



## Einsatzbereiche der Prüfsysteme

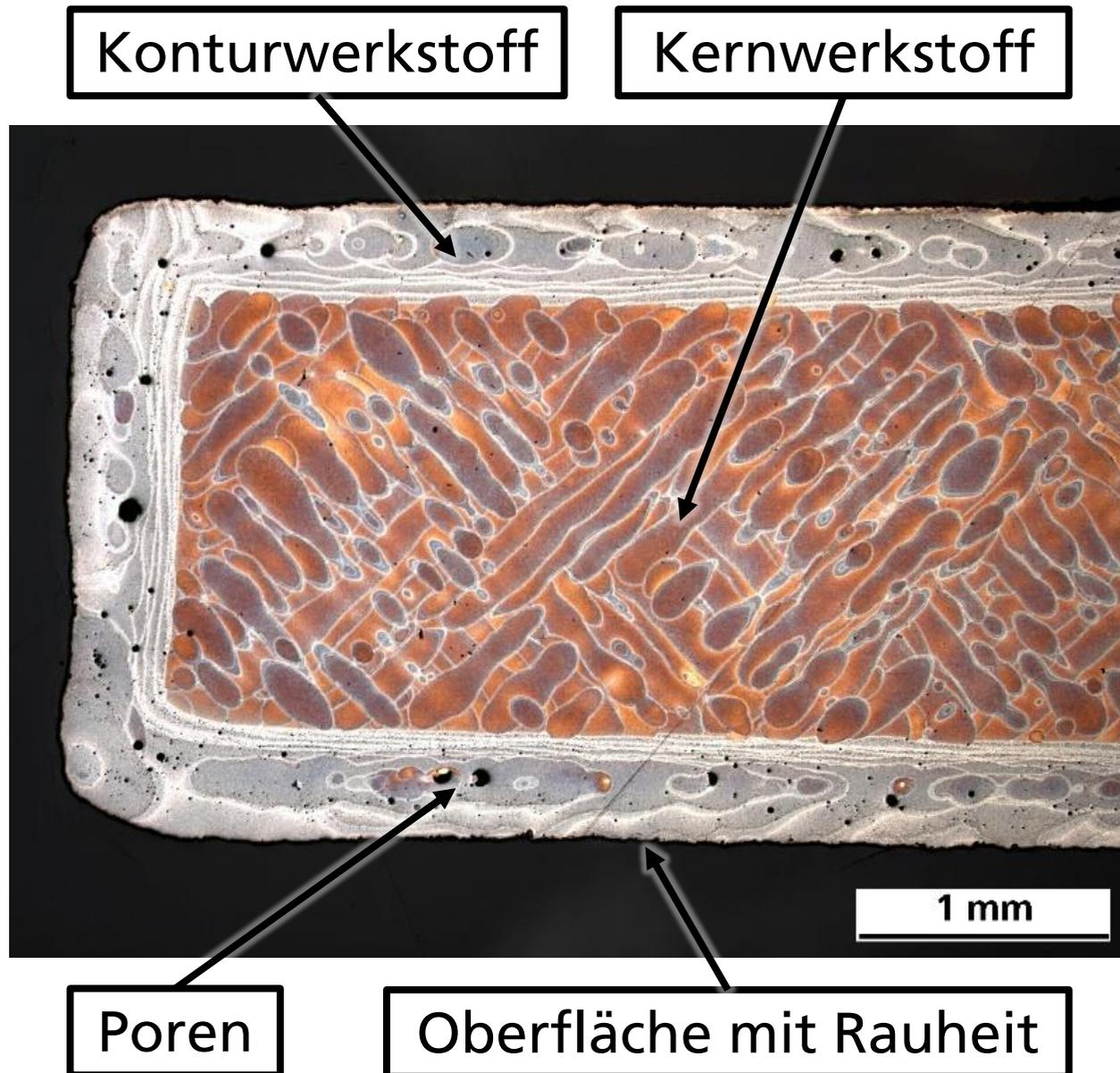


# Schwingfestigkeitsuntersuchung unter Lastregelung

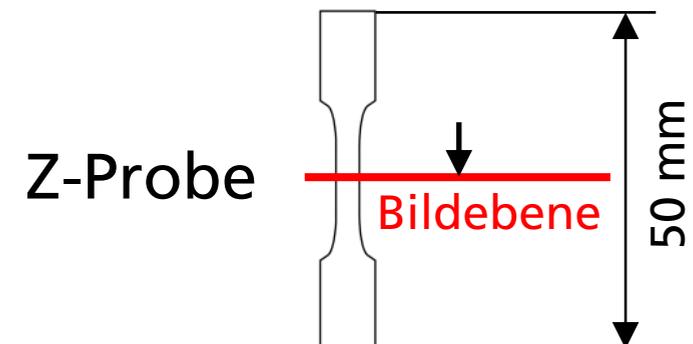


- Edelstahl 1.4542 (17-4 PH, X5CrNiCuNb16-4) in zwei „Chargen“
- Z-Rundproben mit unbearbeiteter und feingedrehter Oberfläche

# Metallographische Grundcharakterisierung



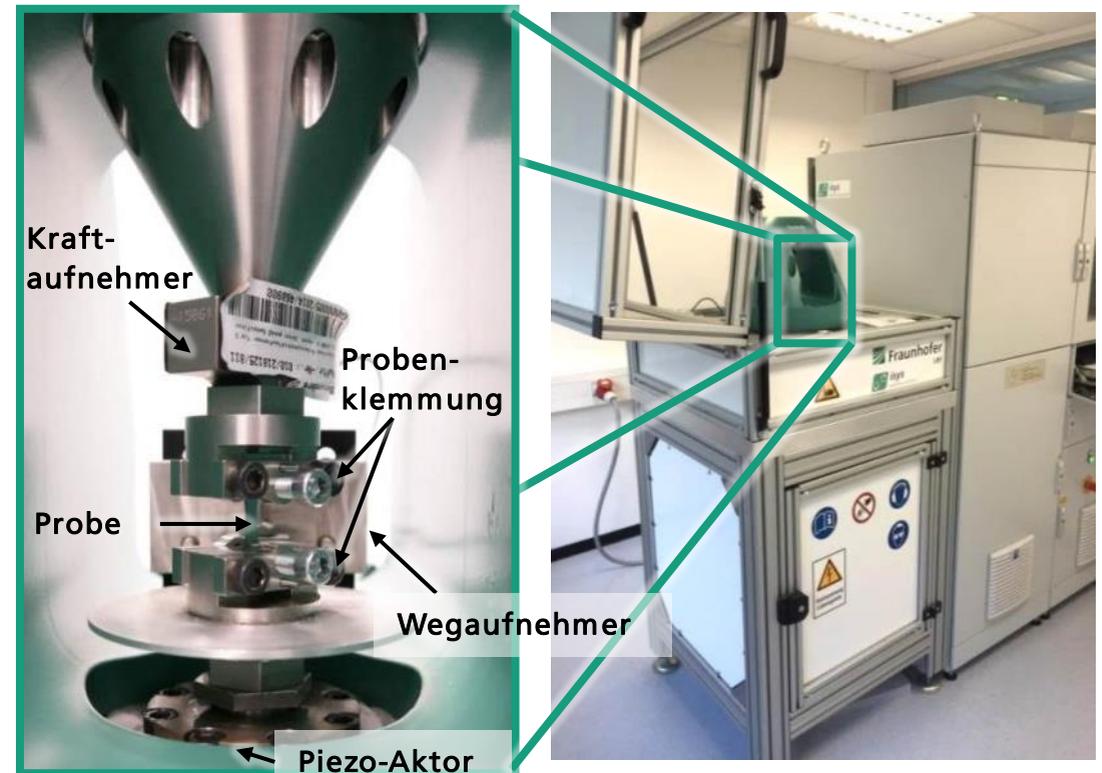
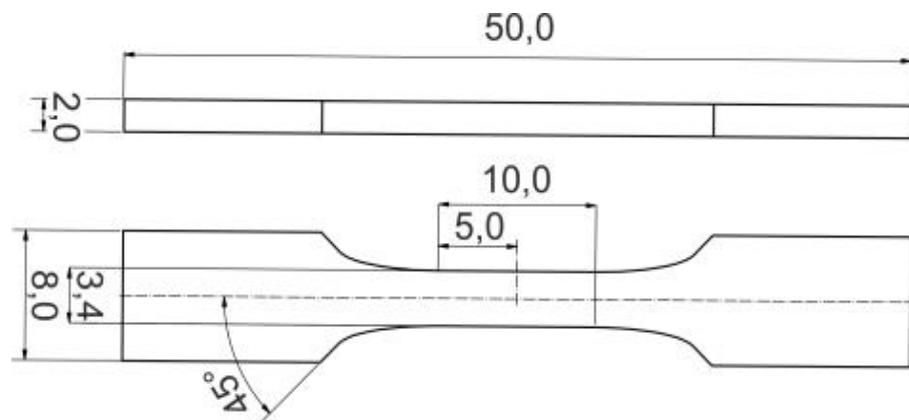
- AlSi10Mg (Schliffbild)
- Selektives Laserschmelzen im Pulverbettverfahren
- Baurichtung senkrecht zur Bildebene



- Unterschiedliche Prozessparameter für Kern- und Konturwerkstoff

# Schwingfestigkeit von AlSi10Mg

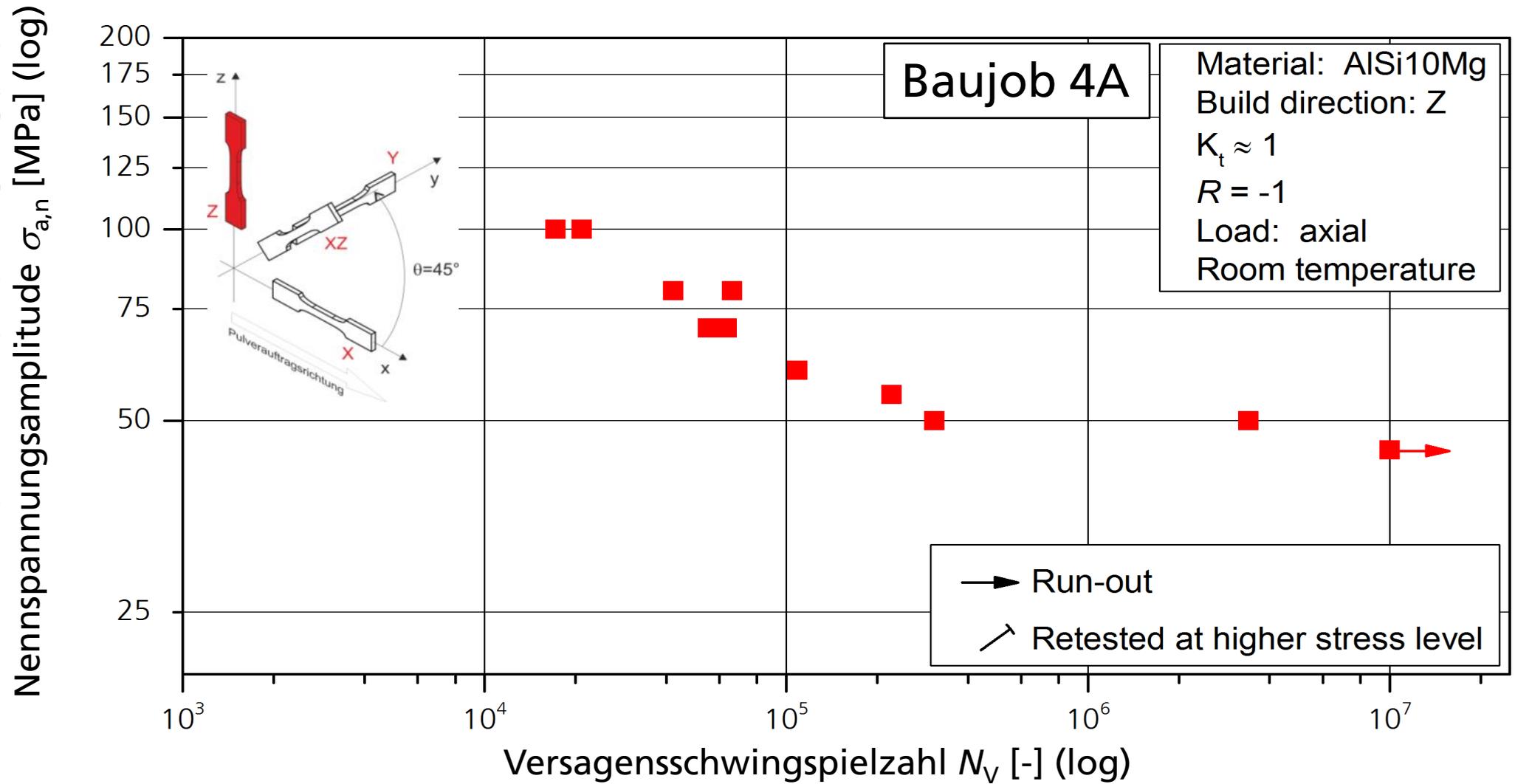
- Versuchsdurchführung mit der Piezo-basierten Prüftechnik (PZB500)
  - Kraftaufnehmer mit 2,2 kN
  - Detektion sehr kleiner Risse
  - Hohe Reproduzierbarkeit
  - Hohe Dynamik (Frequenz)



Versuchsparameter  $\longrightarrow$  
$$R = \frac{\sigma_m = 0}{\sigma_{max}}$$
  $\longrightarrow$   $R_\sigma = -1$   $f = 100 \text{ Hz}$

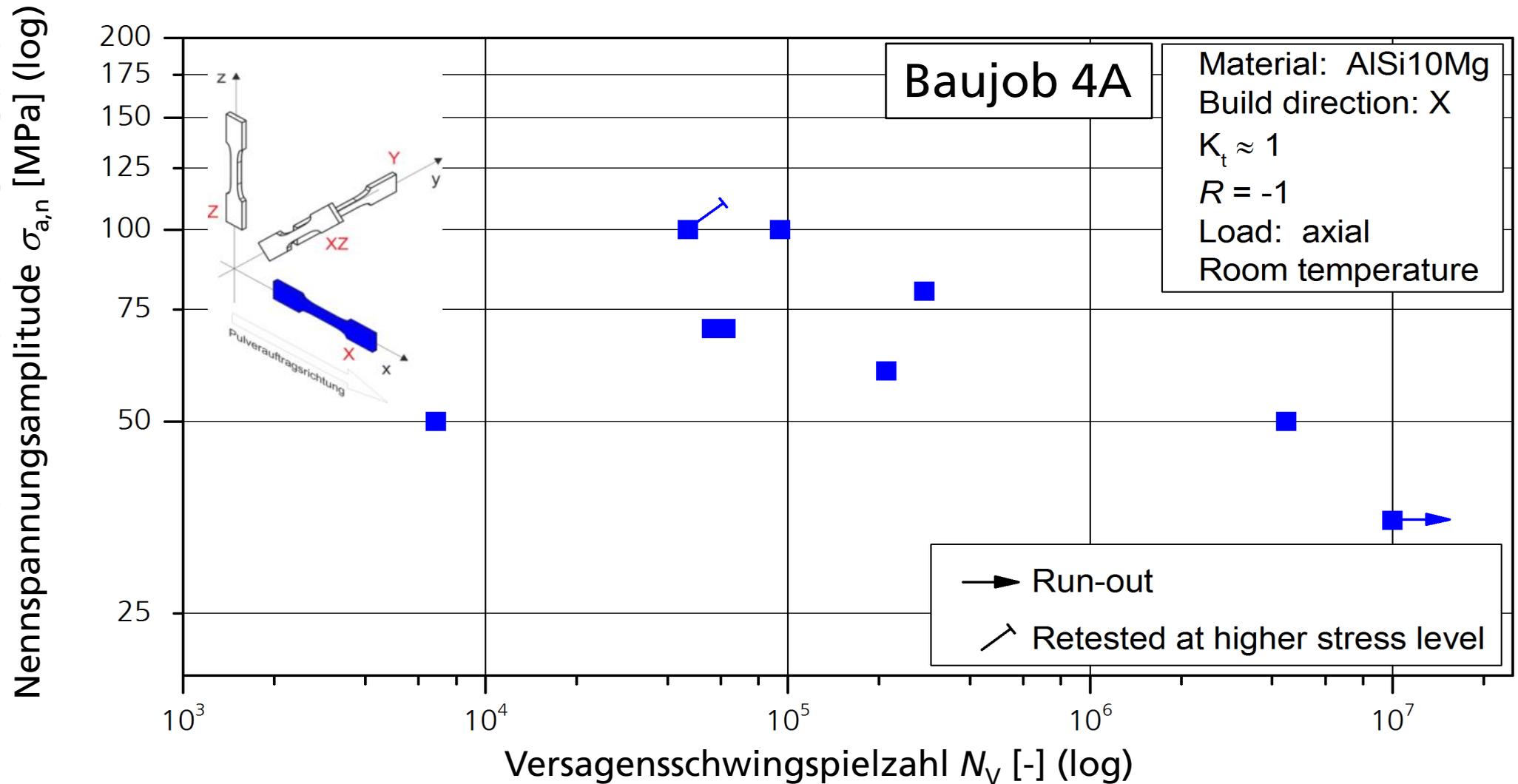
# Schwingfestigkeit von AlSi10Mg

## Wöhlerergebnisse für Z-Proben mit $K_t \approx 1$



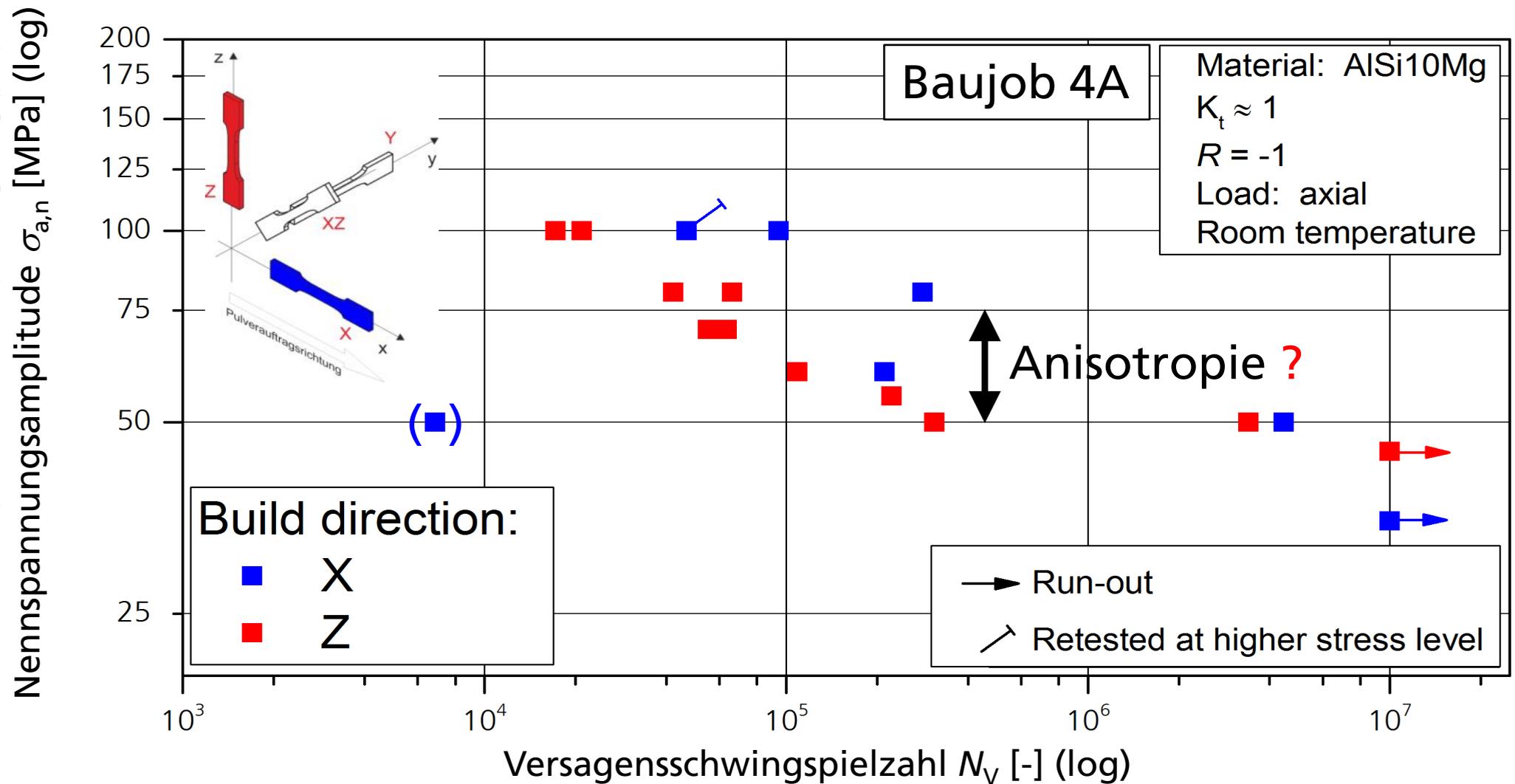
# Schwingfestigkeit von AlSi10Mg

## Wöhlerergebnisse für X-Proben mit $K_t \approx 1$

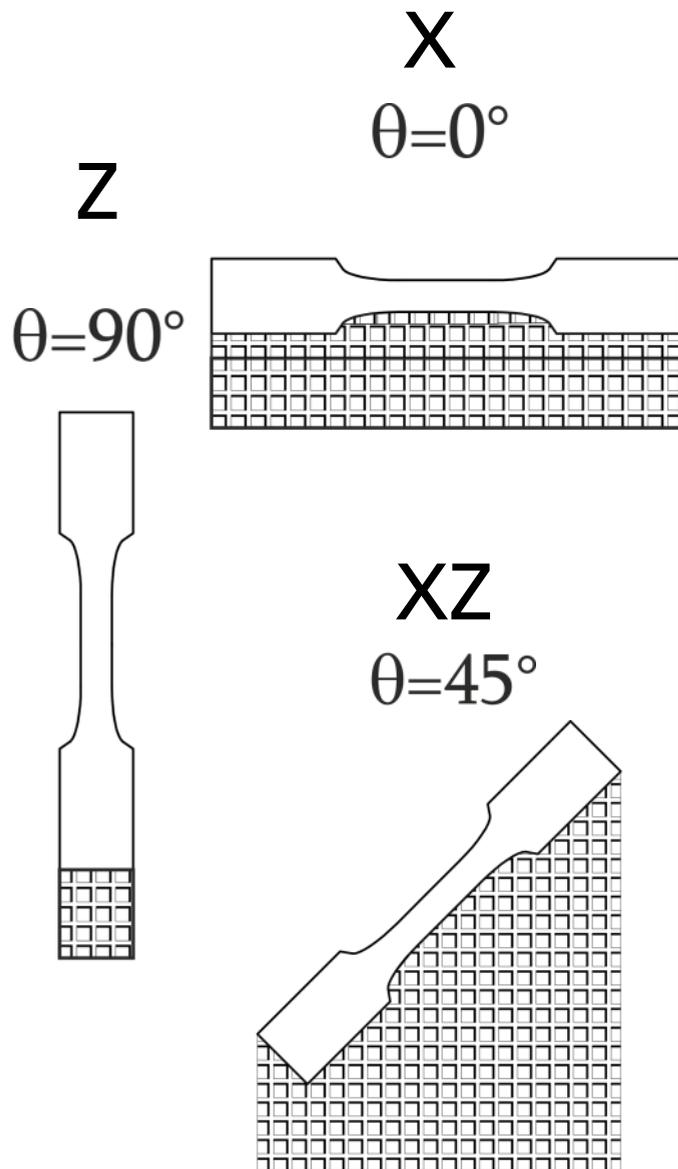


# Schwingfestigkeit von AlSi10Mg

## Wöhlerergebnisse für X- und Z-Proben mit $K_t \approx 1$



# Fertigungsprozess – Stützstrukturen und Poren



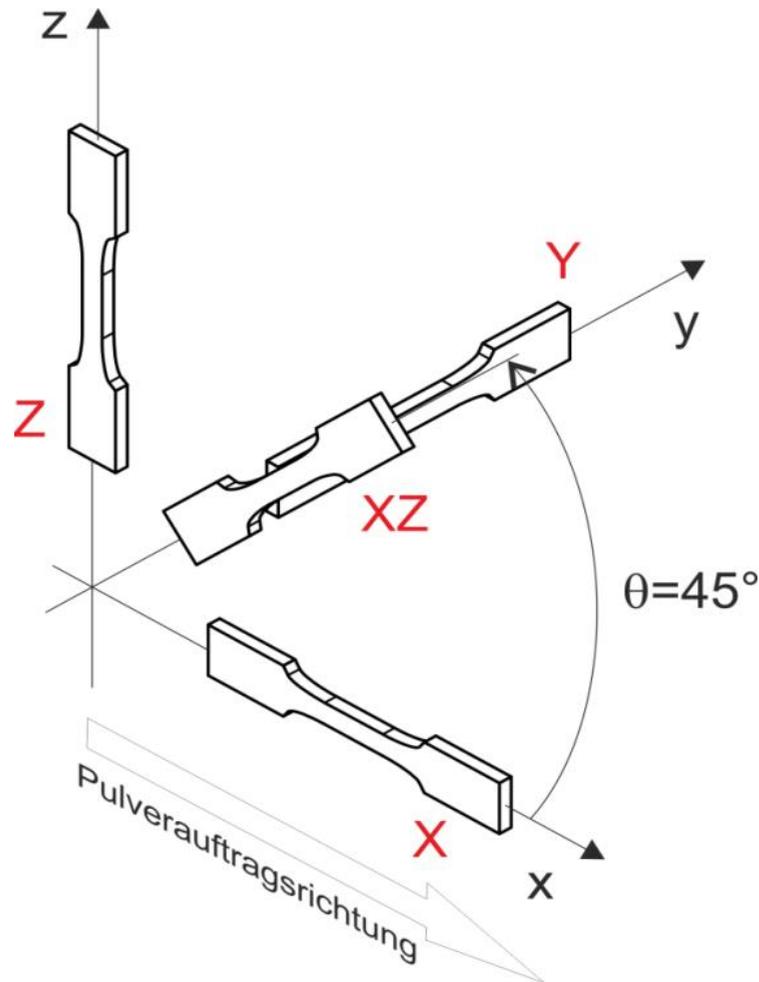
Stützstrukturen führen auf ungleichmäßige Oberflächen und enthalten Unregelmäßigkeiten

Beispiel einer Probe mit Kontur und Kernwerkstoff: Oberfläche und Porenverteilung abhängig von Upskin-/Downskin-Winkel

<sup>1</sup> Scurria, M.; Möller, B.; Wagener, R.; Melz, T.: Effect of the Surface Finish on the Cyclic Behavior of Additively Manufactured AlSi10Mg. TMS 2019 – 148<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition, 10.-14. März 2019, San Antonio, Texas, USA

# Fertigungsprozess – Stützstrukturen

## ■ Oberflächenbeschaffenheit und Rauheit von AlSi10Mg-Proben



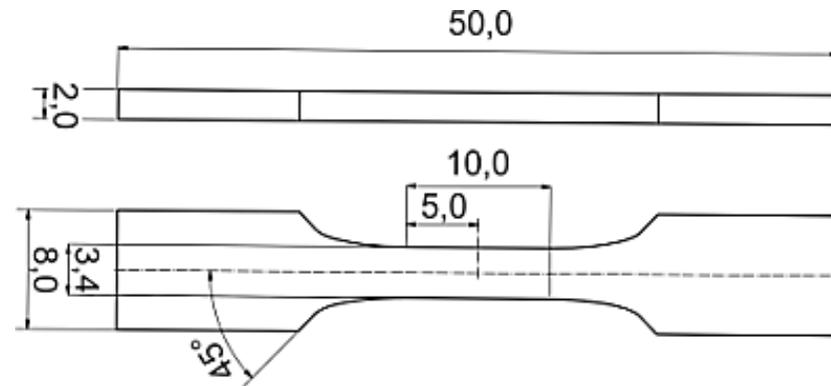
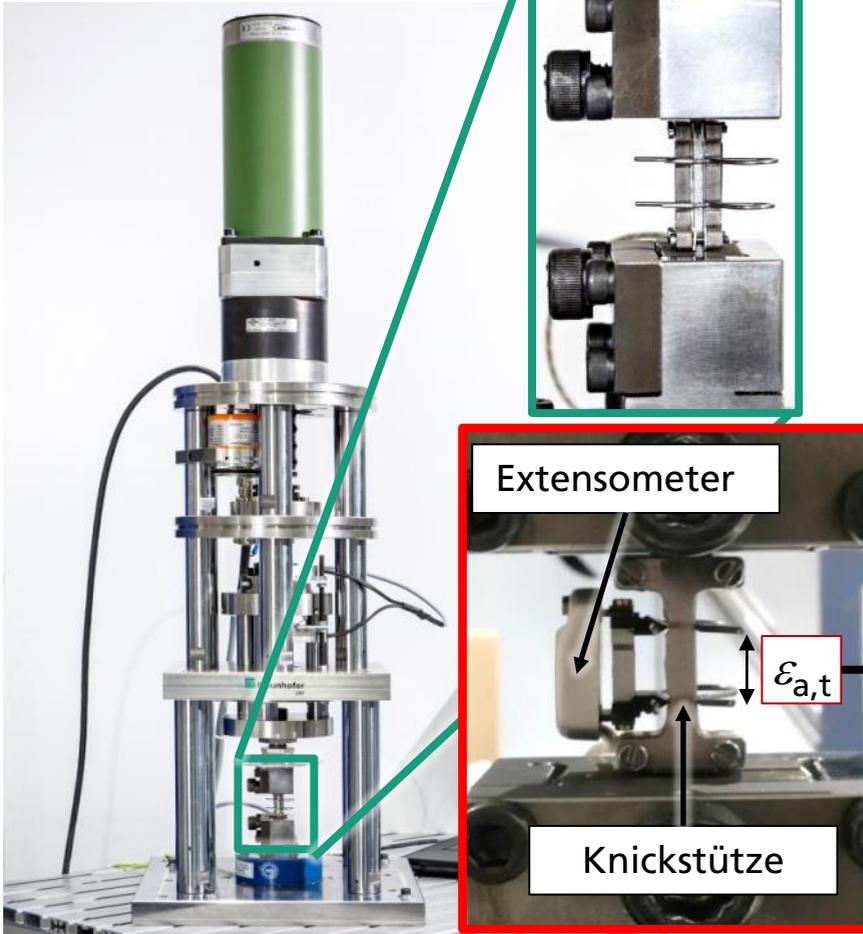
Z-Probe ohne Stützstrukturen (as-built)		$R_z \leq 26 \mu\text{m}$
X-Probe mit unten abgearbeiteten Stützstrukturen ohne (oben)		$R_z \leq 65 \mu\text{m}$
mit (unten)		$R_z \leq 110 \mu\text{m}$

nach mechanischem Polieren:  $R_z \leq 2 \mu\text{m}$

# Zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten von additiv gefertigten Werkstoffen und Strukturen

## ■ Versuchsaufbau und Prüfablauf

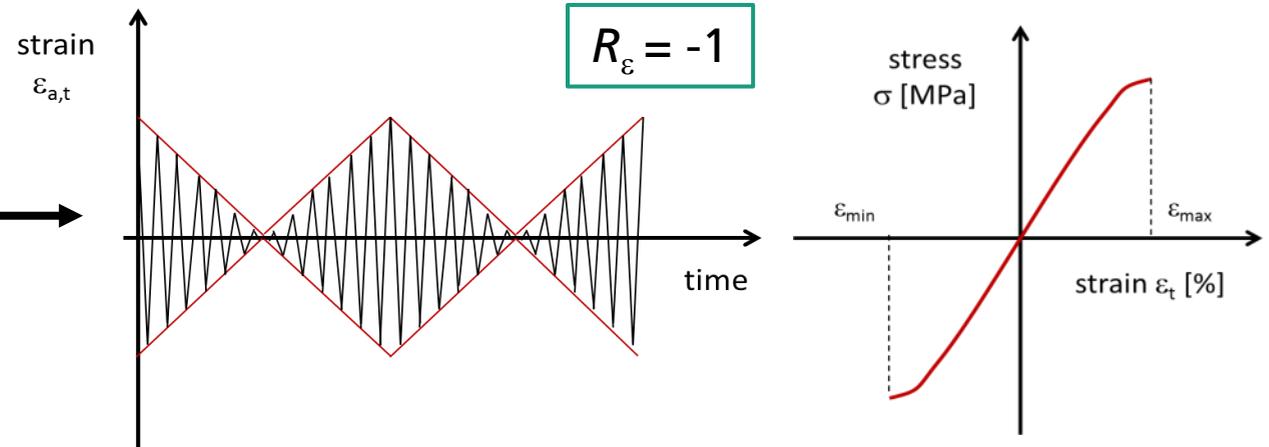
E-Zylinder



*Incremental Step Test IST*

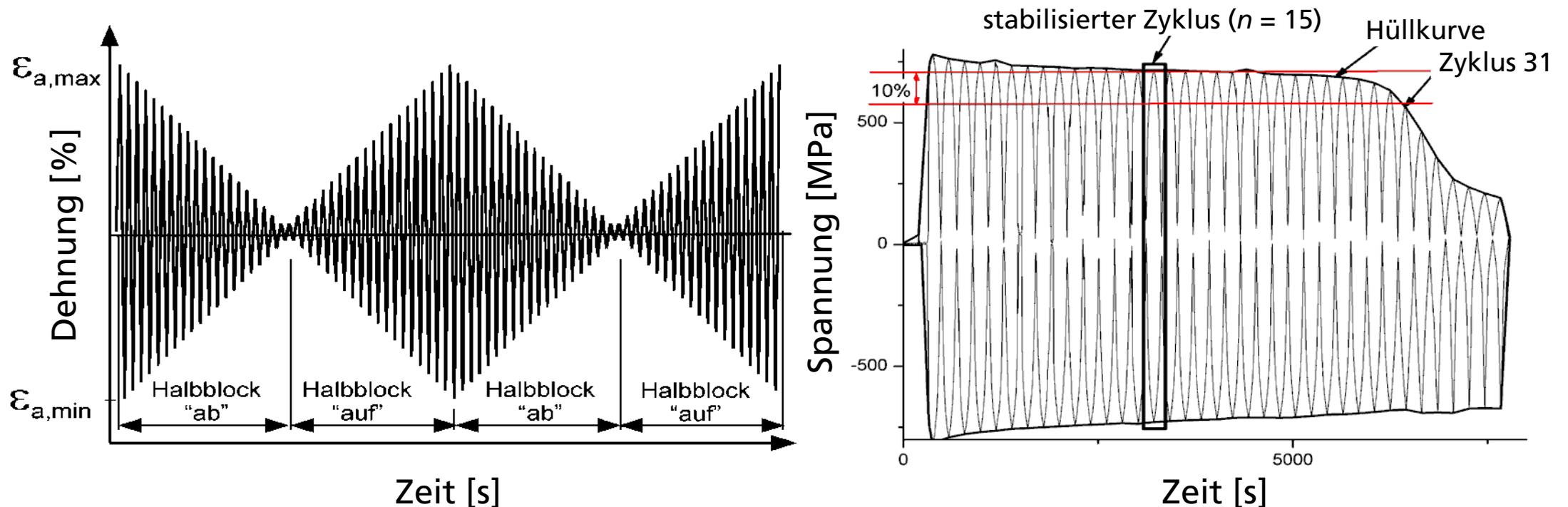
$\epsilon_{a,t,max} = 0,4 \%; 0,6 \%; 0,8 \%$

Stabilisierte zyklische Spannungs-Dehnungskurve



# Auswertung des Incremental Step Tests IST

- Charakterisierung mit Hilfe des Incremental Step Tests IST<sup>2,3</sup>
- Auswertung für den stabilisierten Zyklus (Block)



<sup>2</sup> Masendorf, R.; Wagener, R.: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feinblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung, Anhang Incremental Step Test

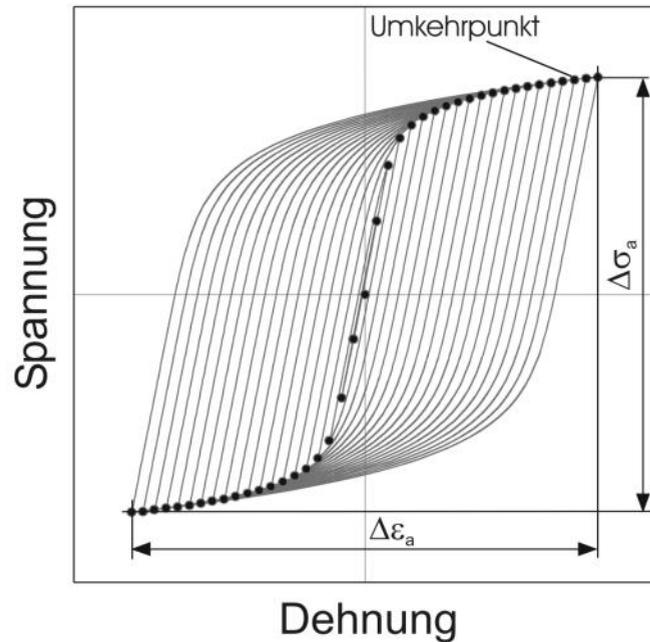
<sup>3</sup> Morrow, J.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. Internal friction, damping, and cyclic plasticity. ASTM International, 1965.

<sup>4</sup> Landgraf, R. W.; Morrow, J.: Determination of the cyclic stress-strain curve. Journal of Materials 4.1 (1969): 176-188.

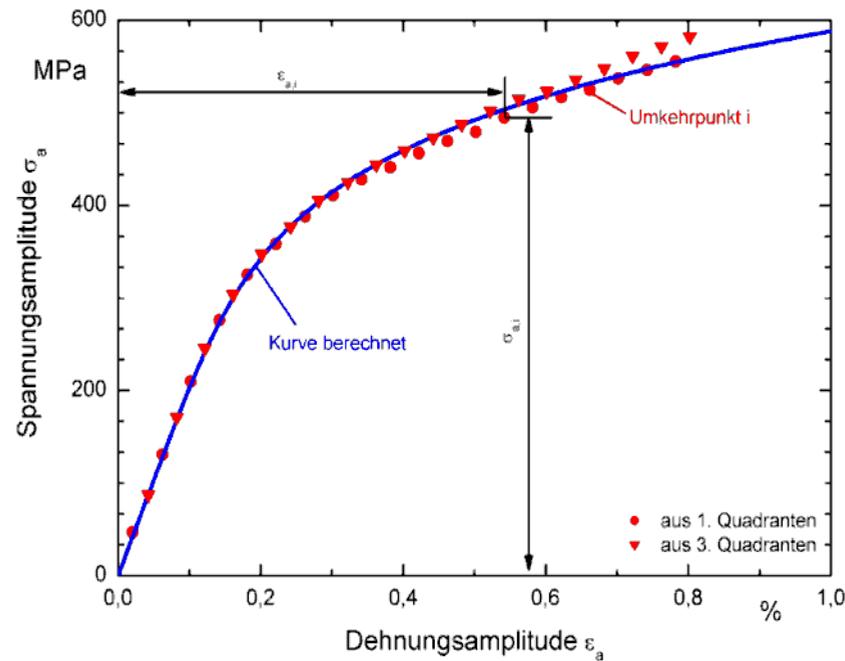
<sup>5</sup> Sonsino, C. M.: Bedeutung von Aufnahmeverfahren zur Ermittlung von zyklischen Spannungs-Dehnungskurven. Sonderdruck aus dem Berichtsband "Kurzzeit-Schwingfestigkeit und elasto-plastisches Werkstoffverhalten", 5. Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, 08./09. Oktober 1979, Berlin, S. 221-229

# Auswertung des Incremental Step Tests IST

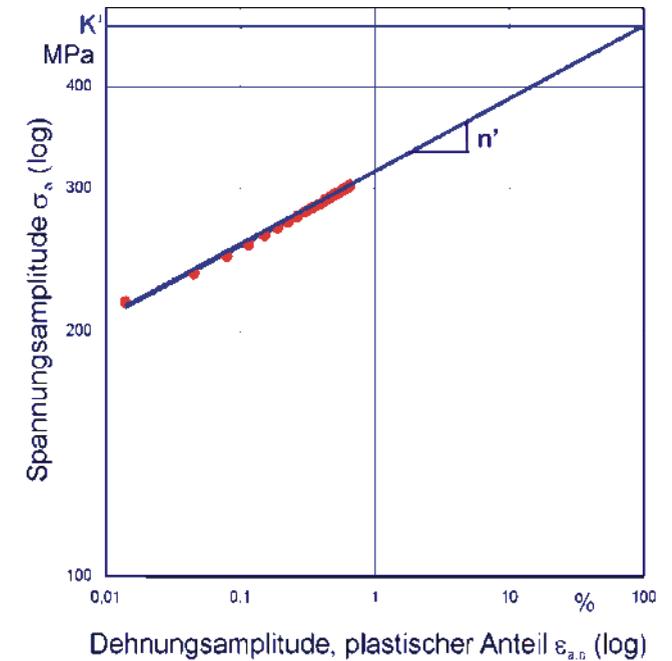
## ■ Ableitung des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens



Umkehrpunkte des zyklisch stabilisierten Zyklus



Zyklische Spannungs-Dehnungskurve ausgewertet nach der Ramberg-Osgood-Gleichung<sup>5</sup>



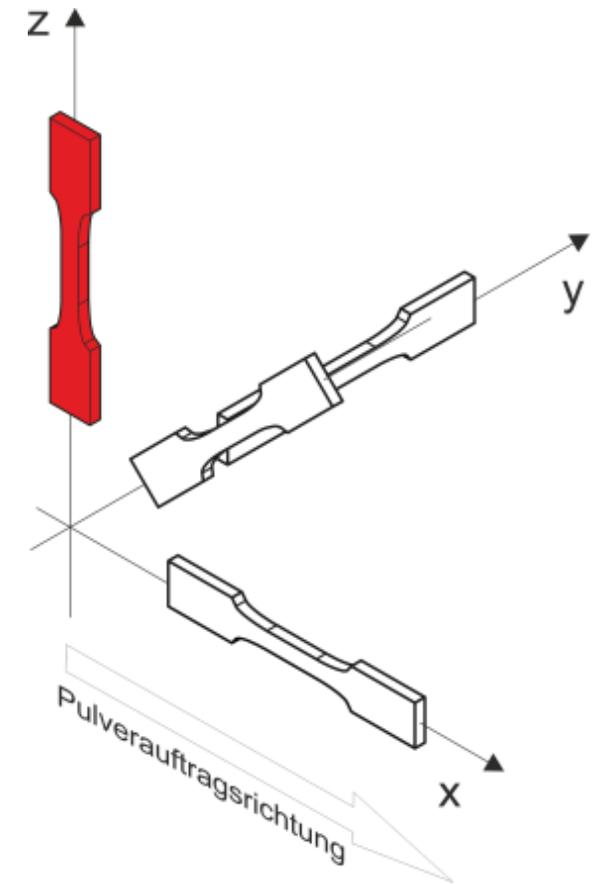
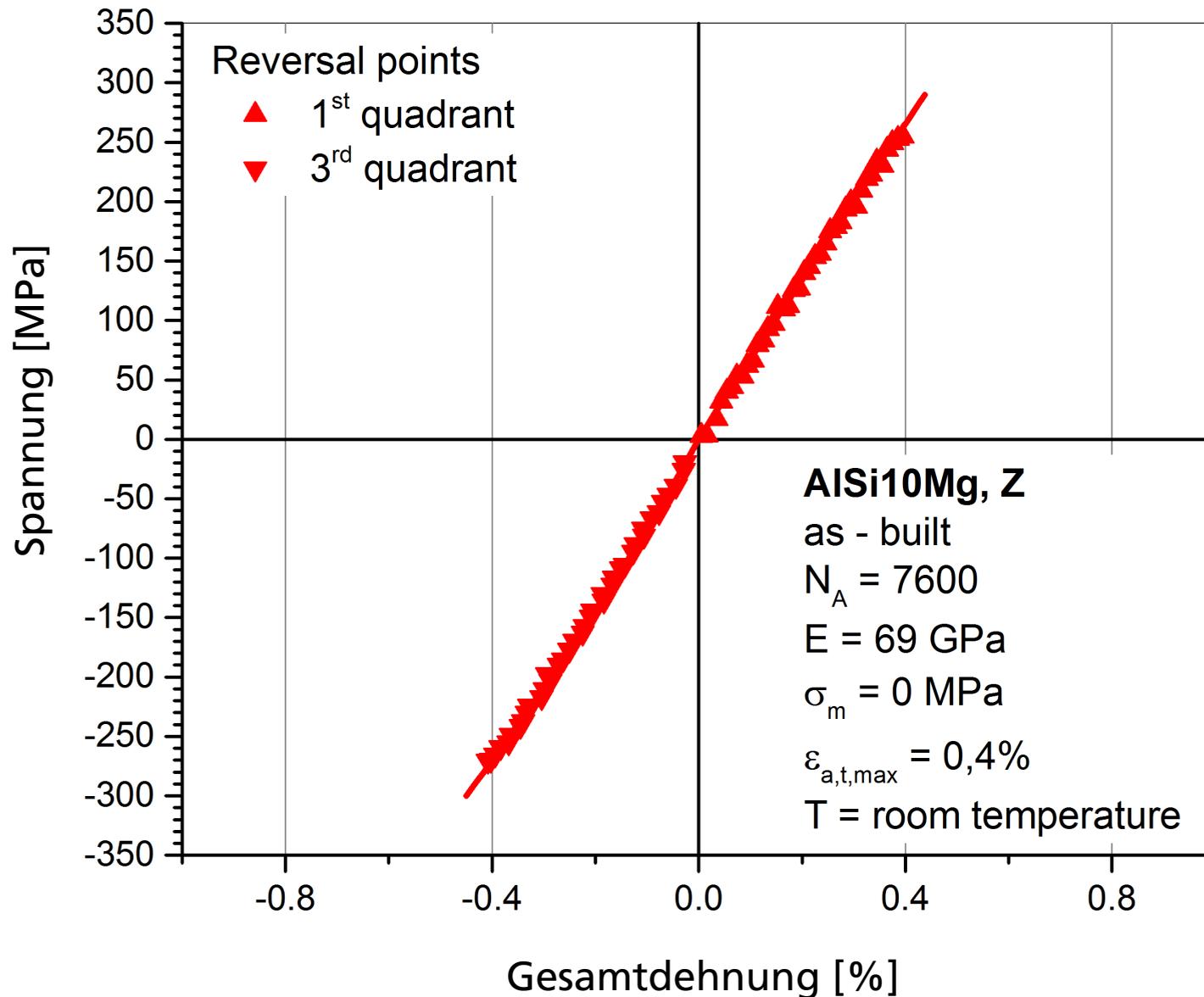
$K'$	Zyklischer Verfestigungskoeffizient
$n'$	Zyklischer Verfestigungsexponent

### Ramberg-Osgood

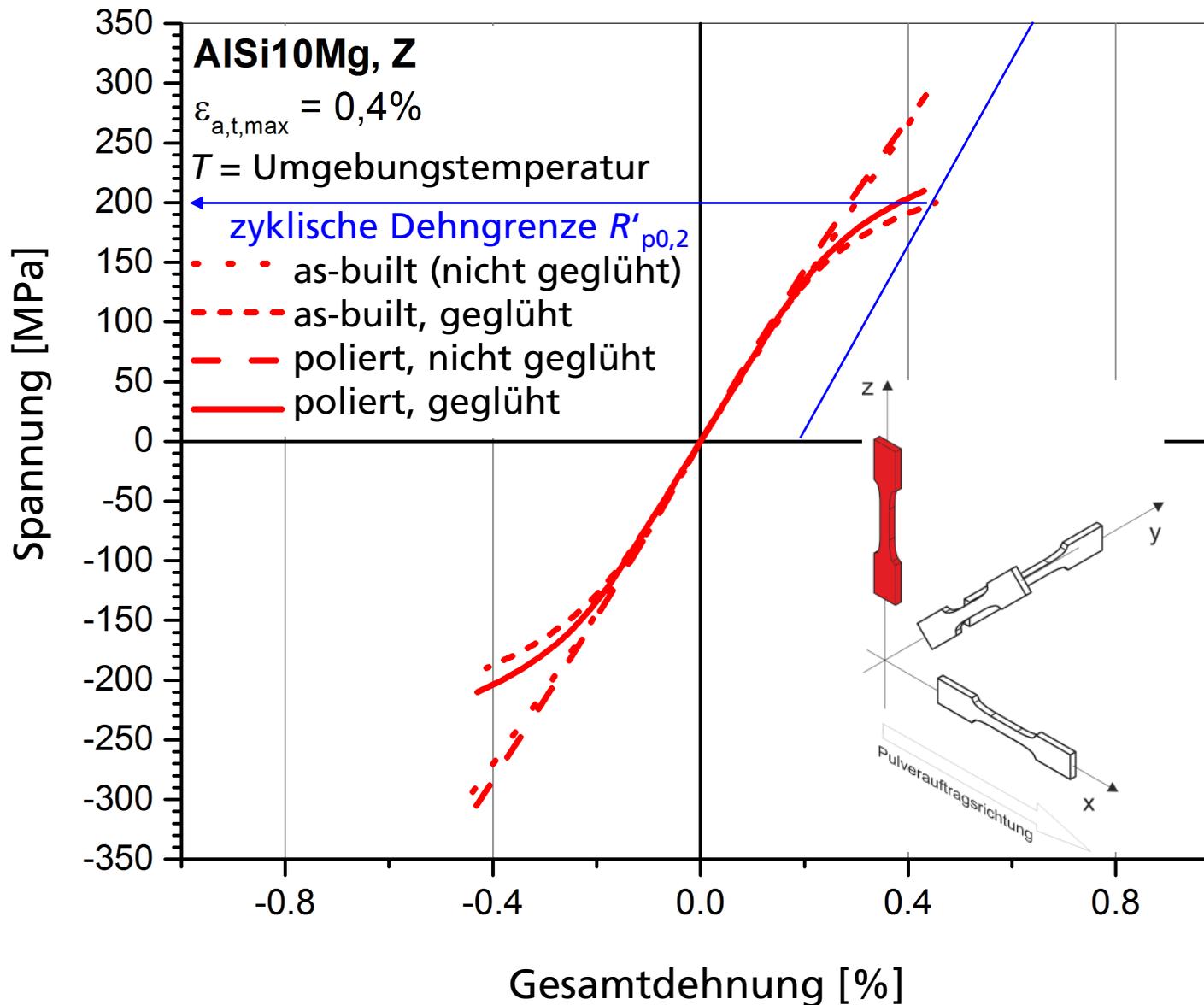
$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \left( \frac{\sigma_a}{E} \right) + \left( \frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$$

<sup>6</sup> Ramberg, W.; Osgood, W.R.: NACA Technical Note No. 902, 1943

# Spannungs-Dehnungsverhalten von AlSi10Mg Z-Proben



# Spannungs-Dehnungsverhalten von AlSi10Mg Z-Proben



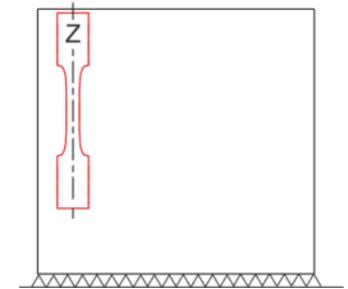
Baurichtung Z,  $\varepsilon_{a,t,max} = 0,4\%$

- as-built (nicht gegläht):  
 $N_A = 7.600$
- as-built, gegläht  
 $N_A = 3.760$
- poliert, nicht gegläht  
 $N_A = 14.880$
- poliert, gegläht  
 $N_A = 11.120$

Z, as-built

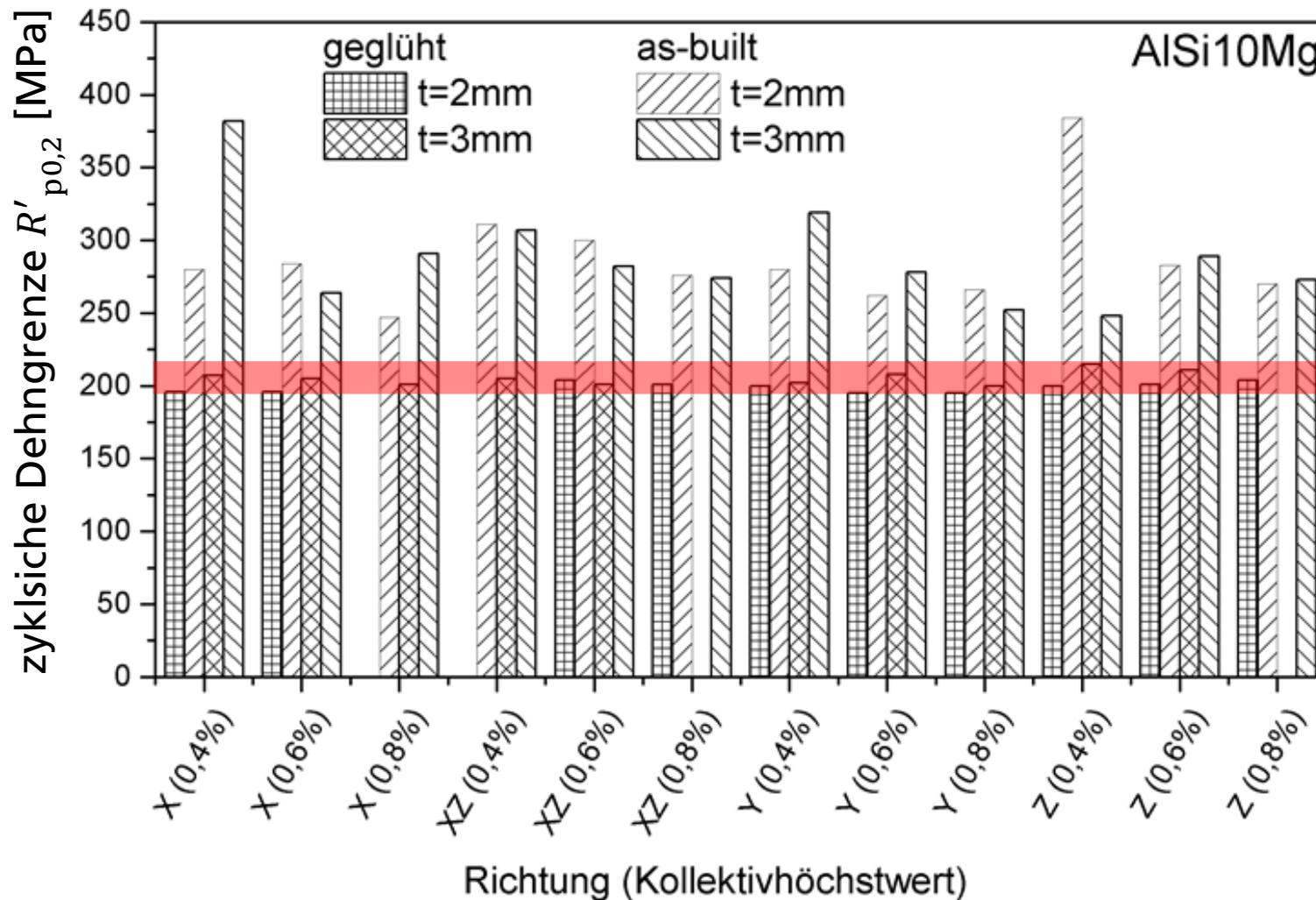


Z, poliert



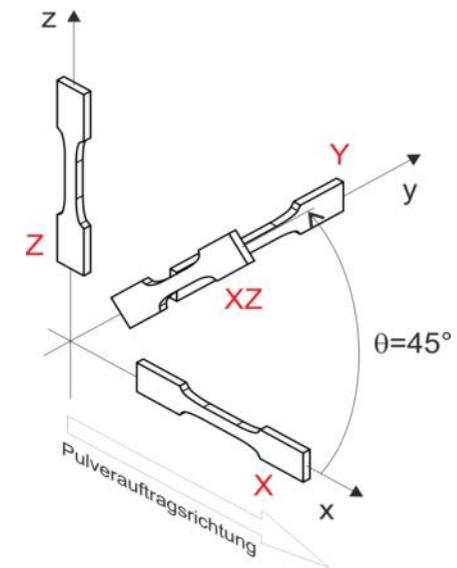
# Zyklische Dehngrenzen für AlSi10Mg

■ Spannungsarmglühen gleicht zyklische Dehngrenzen an



Reduktion der zyklischen Dehngrenze auf ein Niveau mittels Spannungsarmglühen

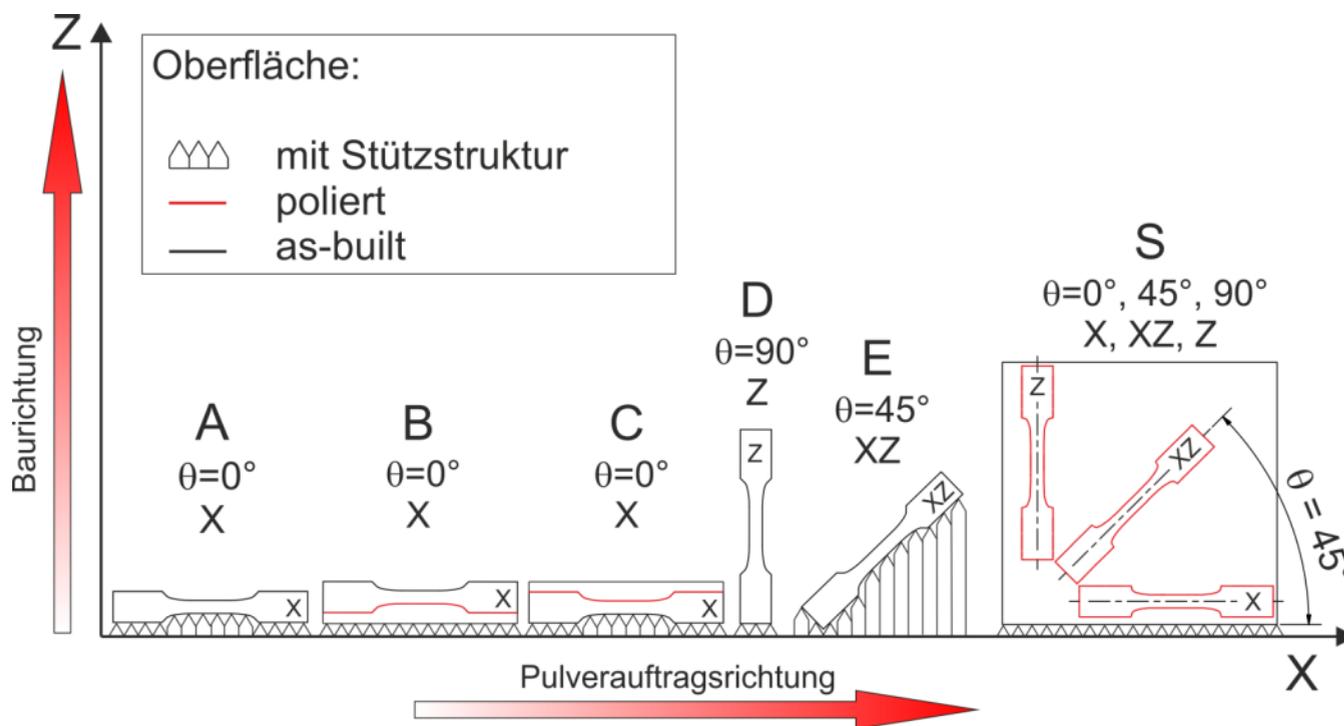
← geglühter Zustand



<sup>7</sup> Wagener, R., Scurria, M., Möller, B.: Einflüsse auf das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten von additiv gefertigten Strukturen aus AlSi10Mg, Berichtsband der 3. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen, 7.-8. November 2018, Berlin, Bericht 403, S. 57-66

# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel®718

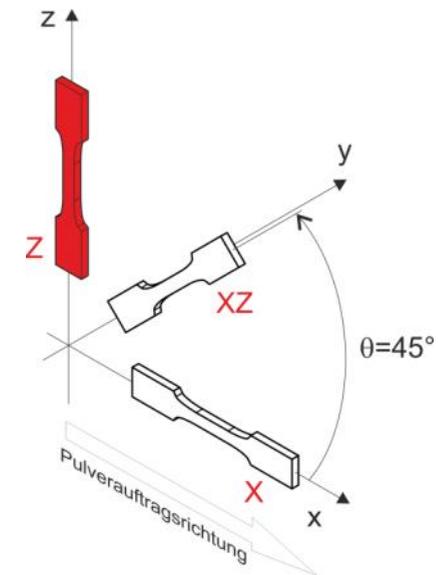
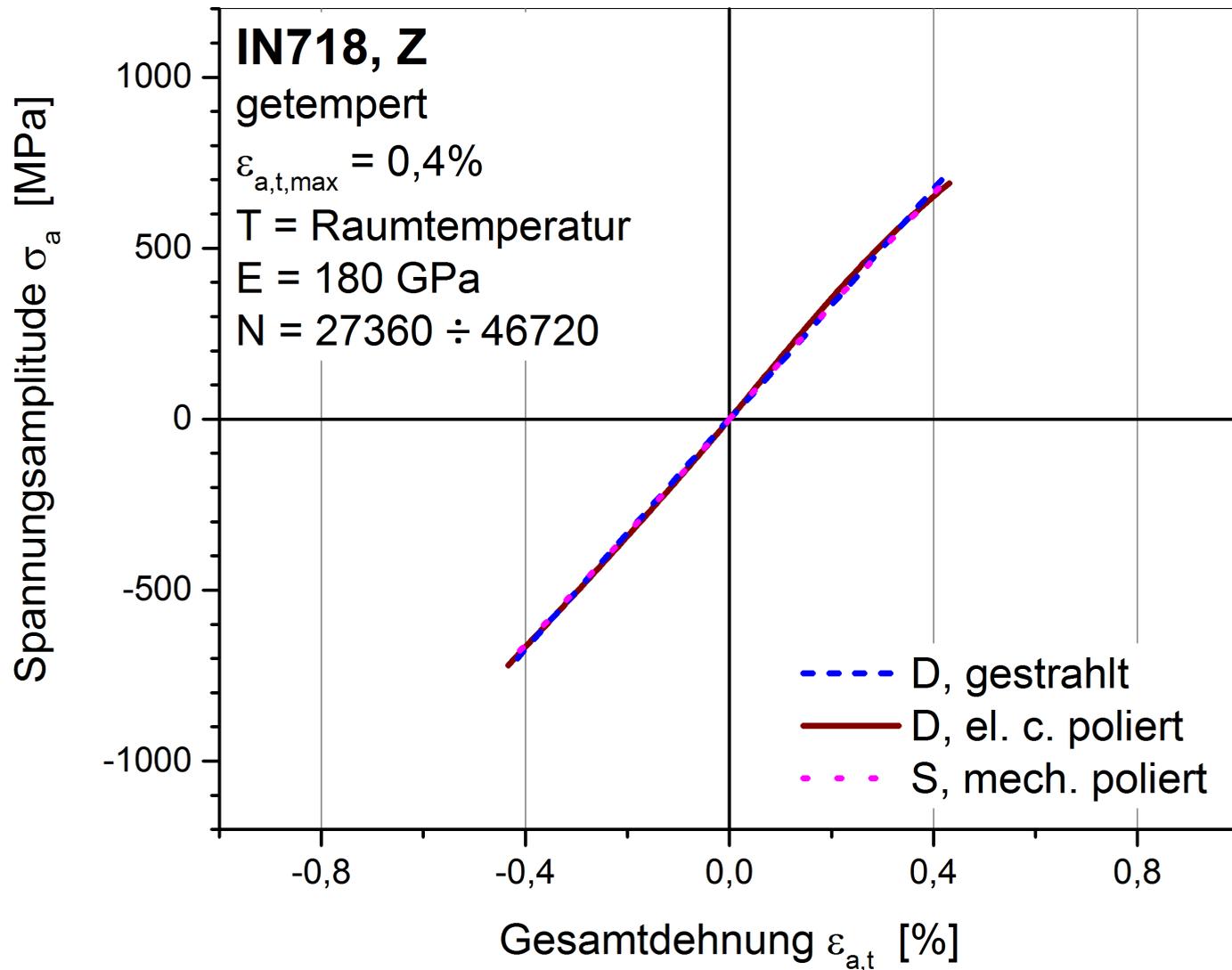
- Systematische Kombination der Baurichtung und des Oberflächenzustands
- Prüfung mit Hilfe von ISTs



Baurichtung	Konfiguration	gestrahlt	Oberflächen
X	A	nein	natur/Stützstr.
		ja	natur/Stützstr.
	B	nein	natur/ mech. poliert
		-	elektroch. poliert
	C	nein	mech. poliert/ Stützstr.
		ja	mech. poliert/ Stützstr.
S	-	mech. poliert	
XZ	E	nein	natur/Stützstr.
		ja	natur/Stützstr.
		-	elektroch. poliert
	S	-	mech. poliert
Z	D	ja	natur
	S	-	elektroch. poliert
	S	-	mech. poliert

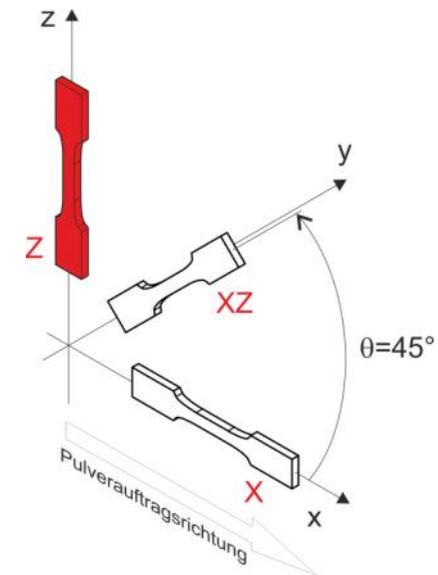
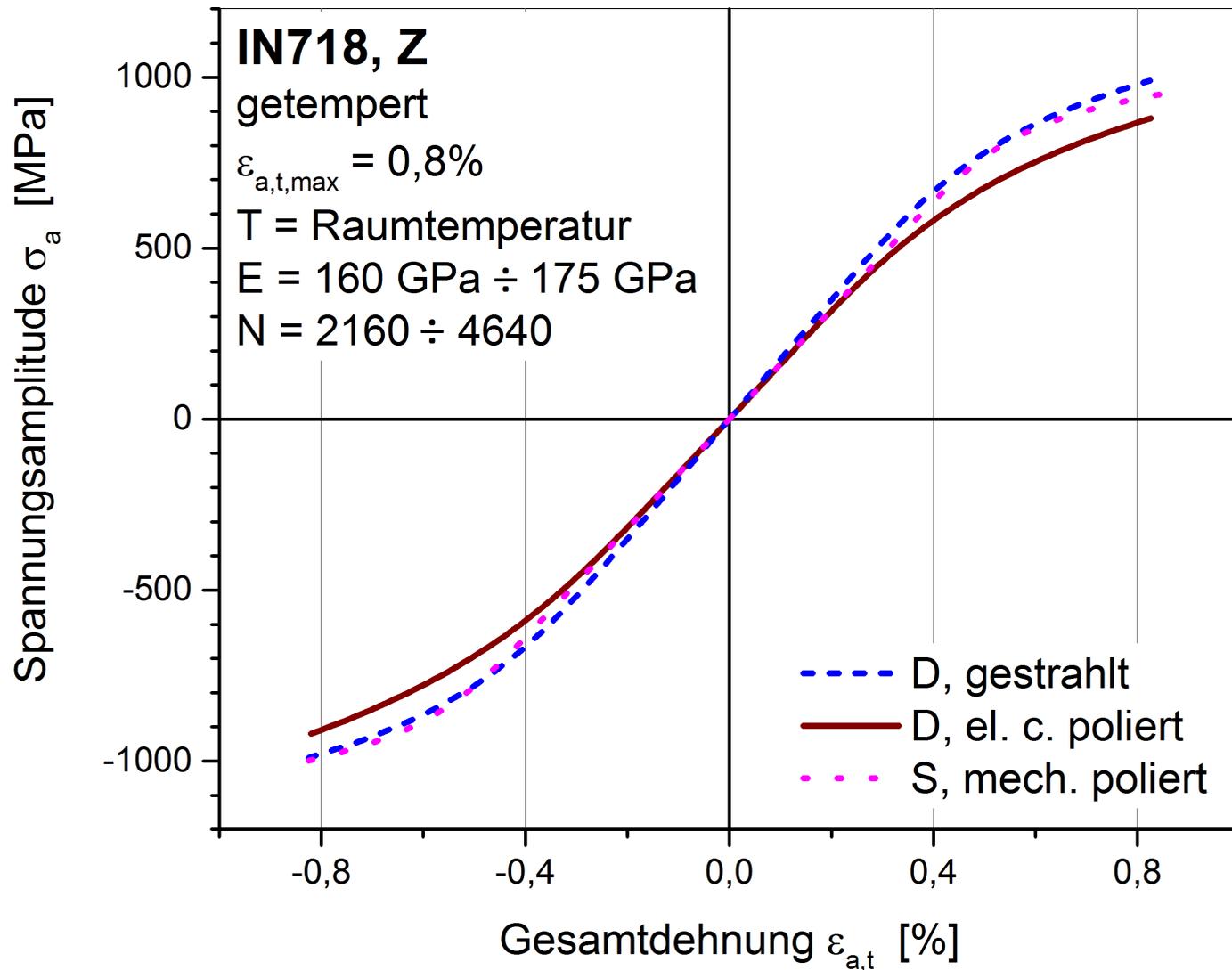
<sup>8</sup> Scurria, M., Möller, B., Wagener, R., Melz, T.: Einfluss der Oberflächenbehandlung und Aufbaubauart auf das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von additiv gefertigten Strukturen aus Inconel® 718. Berichtsband der 3. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen, 7.-8. November 2018, Berlin, Bericht 403, S. 67-76

# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel<sup>®</sup>718



		$\epsilon_{a,t} = 0,4\%$		
Konfiguration		$N_A$	E [GPa]	$\sigma_m$ [MPa]
Z	D, gestrahlt	46.720	180	28
	D, el. c. poliert	27.360	180	-25
	S, mech. pol.	46.240	180	10

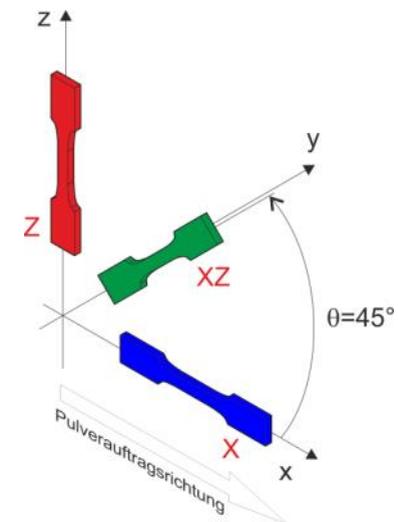
# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel<sup>®</sup>718



		$\varepsilon_{a,t} = 0,8\%$		
Konfiguration		$N_A$	$E$ [GPa]	$\sigma_m$ [MPa]
Z	D, gestrahlt	2.160	175	0
	D, el. c. poliert	4.640	160	140
	S, mech. pol.	4.400	160	40

# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel®718

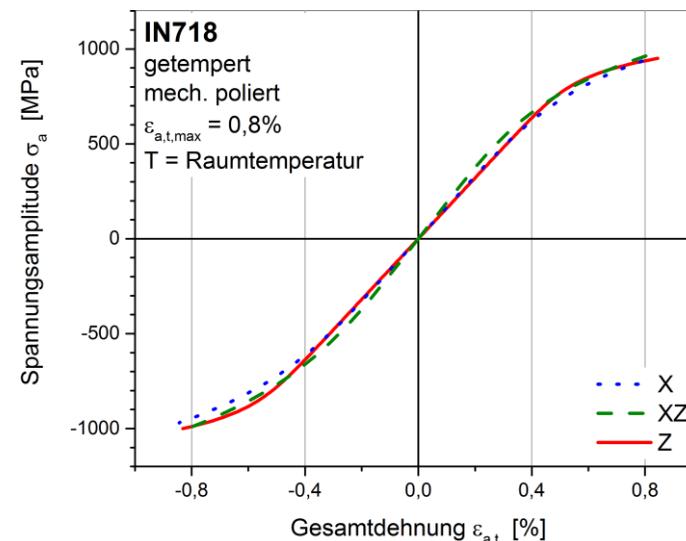
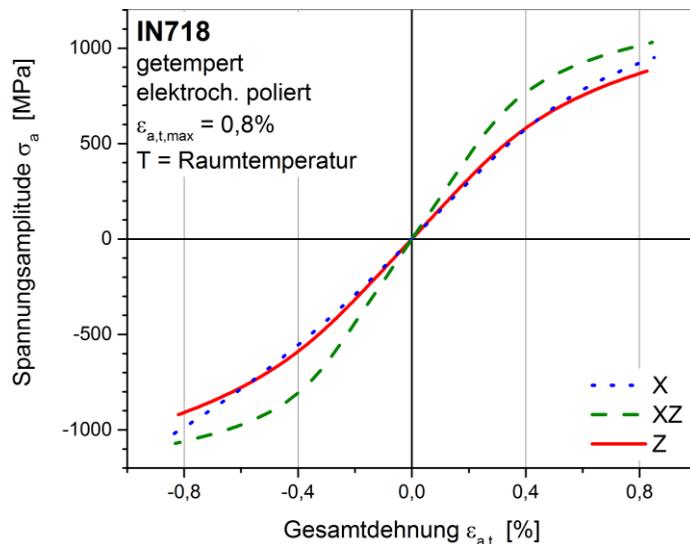
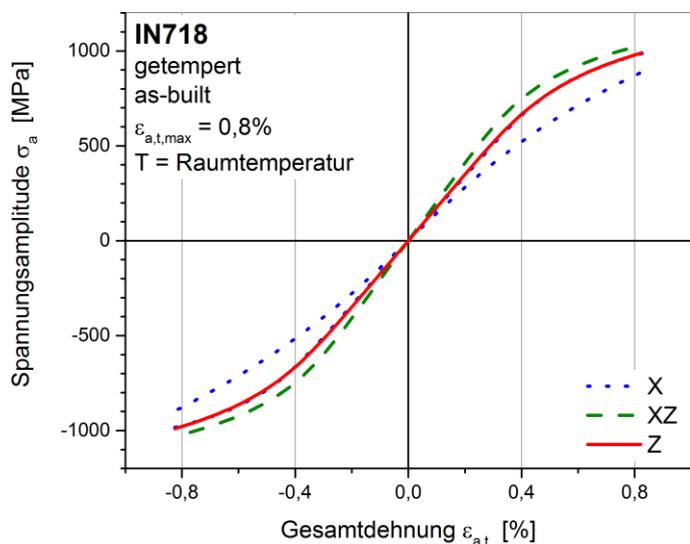
$N_A$	$\varepsilon_{a,t} = 0,8\%$		
	Orientierung	as-built	elektrochemisch poliert
X	800	320	5.760
XZ	1.120	2.640	4.720
Z	2.160	4.640	4.400



as-built

elektrochemisch poliert

mechanisch poliert



# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel<sup>®</sup>718

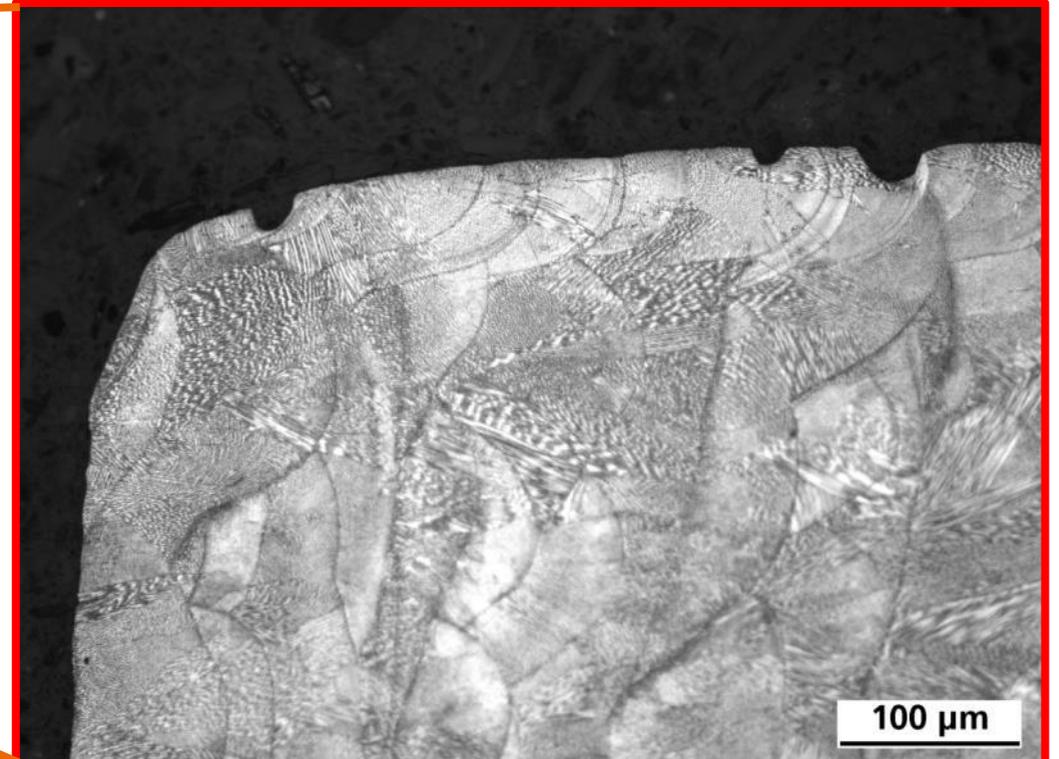
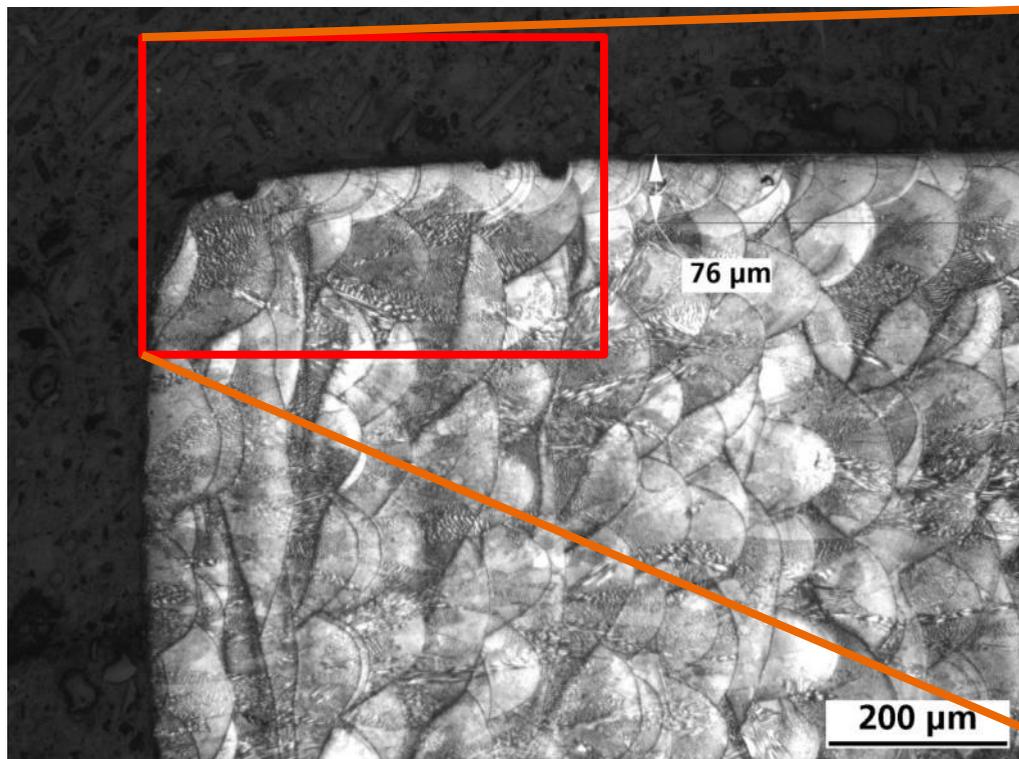
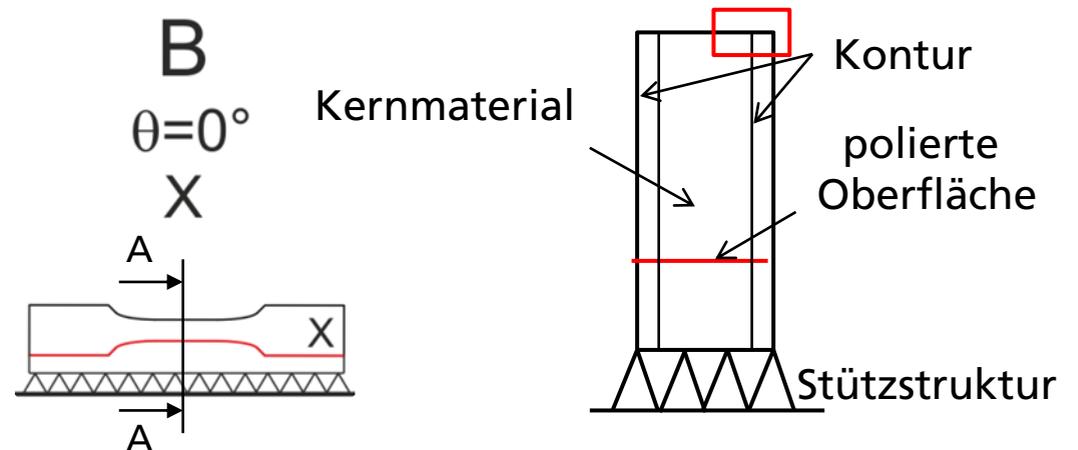
## Metallographische Analyse – Wanddicke

Probe: B (elektrochemisch poliert)

Konturdicke  $\approx 76 \mu\text{m}$

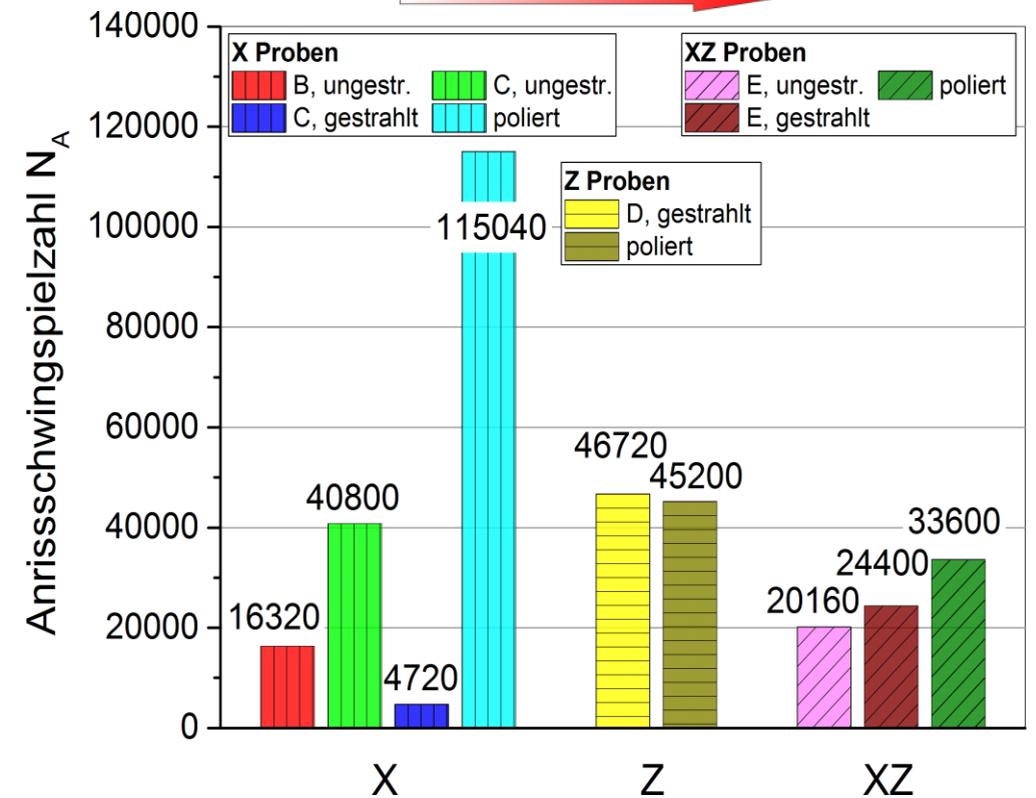
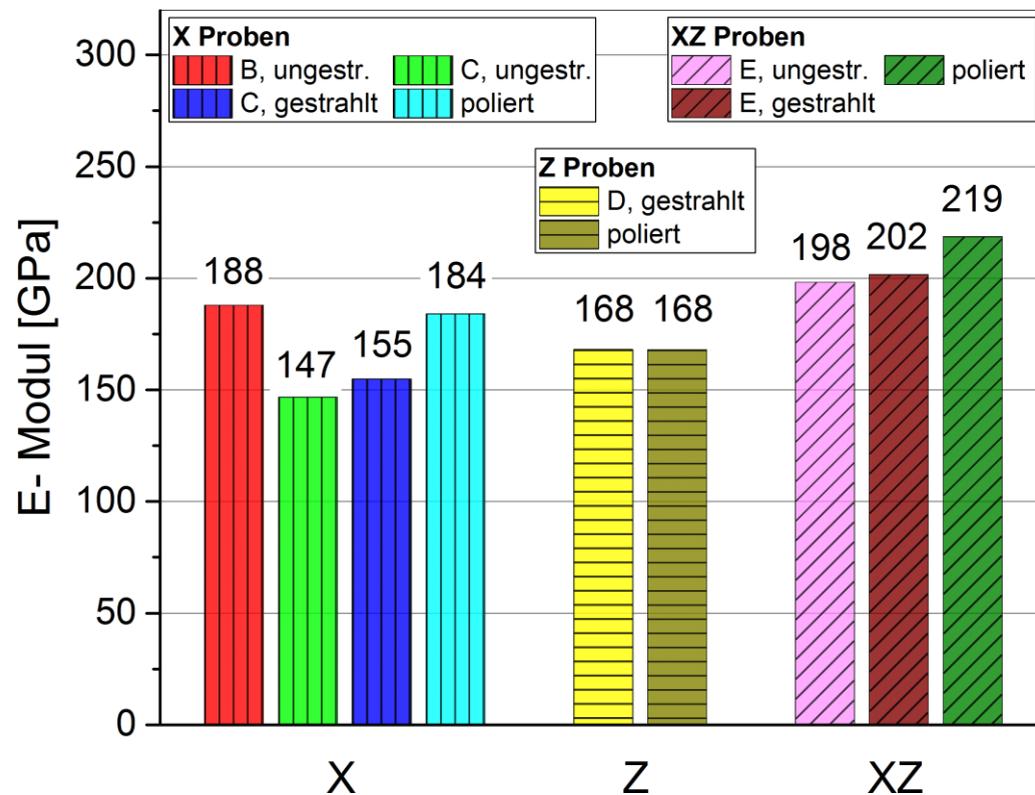
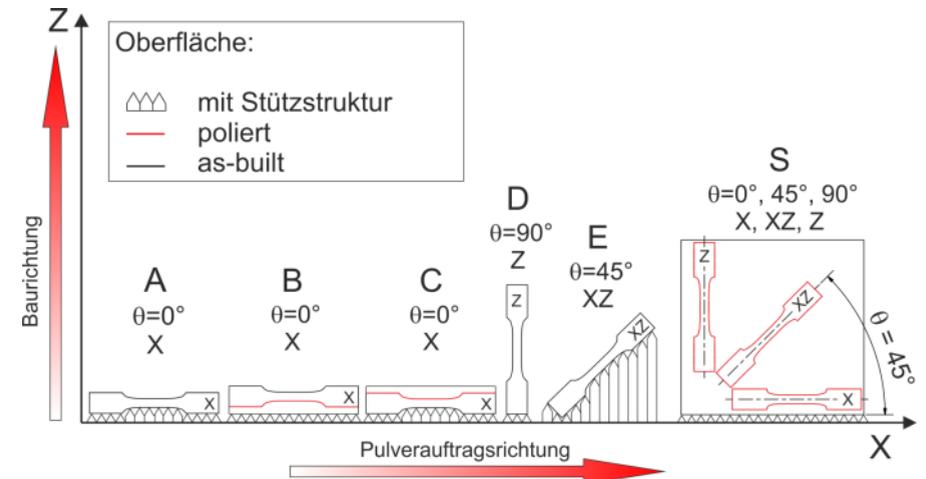
Porenradius  $\approx 25 \mu\text{m}$

→ geschnittene Poren an der Oberfläche



# Spannungs-Dehnungsverhalten von Inconel<sup>®</sup>718

- Gegenüberstellung von
  - (zyklischem) Elastizitätsmodul  $E$
  - Anrisschwingspielzahl  $N_A$

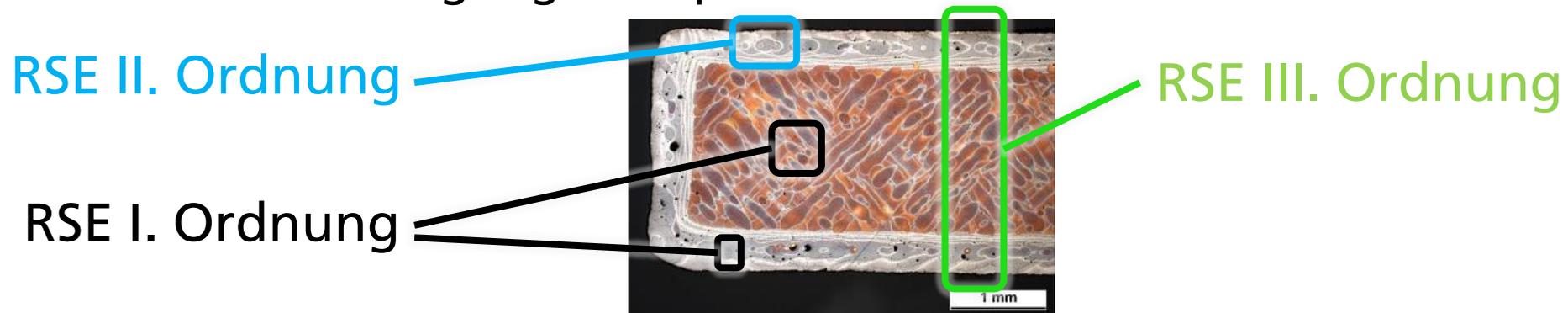


# Schlussfolgerungen

- Last- und dehnungsgeregelte Schwingfestigkeitsversuche bilden die Grundlage zur zyklischen Charakterisierung additiv gefertigter Strukturen
- Erkenntnisse zu den unterschiedlichen Einflüssen
  - **Oberflächenbearbeitung** (Polieren, Feinbearbeitung) wirkt sich grundsätzlich positiv auf die Schwingfestigkeit aus, sofern Kontur und Porensaum (keine Poren schneiden) abgearbeitet werden
  - **Orientierungsabhängig** (X, XZ, Z) stellen hängen Schwingfestigkeiten maßgeblich mit der Oberflächenbeschaffenheit (Stützstrukturen und Bearbeitung) und inneren Unregelmäßigkeiten (z.B. Poren) des AlSi10Mg zusammen
  - Das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten auf Basis von Incremental Step Tests für Inconel<sup>®</sup>718 zeigt ein **anisotropes Verhalten** im as-built und polierten Zustand
  - XZ-Proben (45°) zeigen den höchsten (zyklischen) **Elastizitätsmodul** (Inconel<sup>®</sup>718)
  - **Spannungsarmglühen** von AlSi10Mg gleicht das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten an

# Ausblick

- Erweiterung experimenteller Untersuchungen auf weitere Einflussgrößen, wie z.B. Reproduzierbarkeit und Schweißbarkeit
- Verfolgung des Ansatzes auf Basis Repräsentativer Strukturelemente (RSE), der die Berücksichtigung AM-spezifischer Einflüsse zulässt.



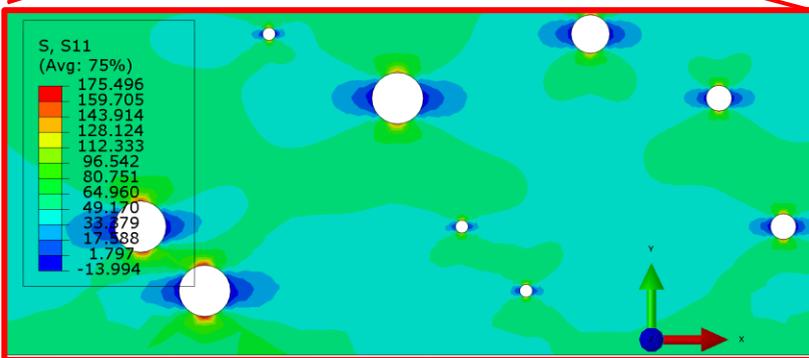
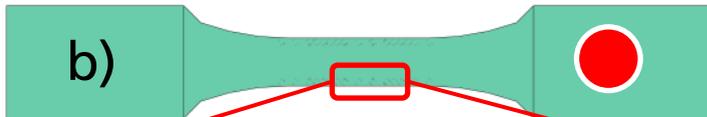
- Zur Sicherstellung der Bauteileigenschaften nicht nur Dichte und Zugfestigkeit heranziehen, sondern auch zyklische Kennwerte für entsprechende Anwendungsfälle → Methode zur Abschätzung der Schwingfestigkeit auf Basis weniger kleinskaliger Proben in Bearbeitung
- Schwingfestigkeitsbewertung mit Hilfe von Finite-Elemente Analysen

# Ausblick – Finite Elemente Analyse und Bewertung

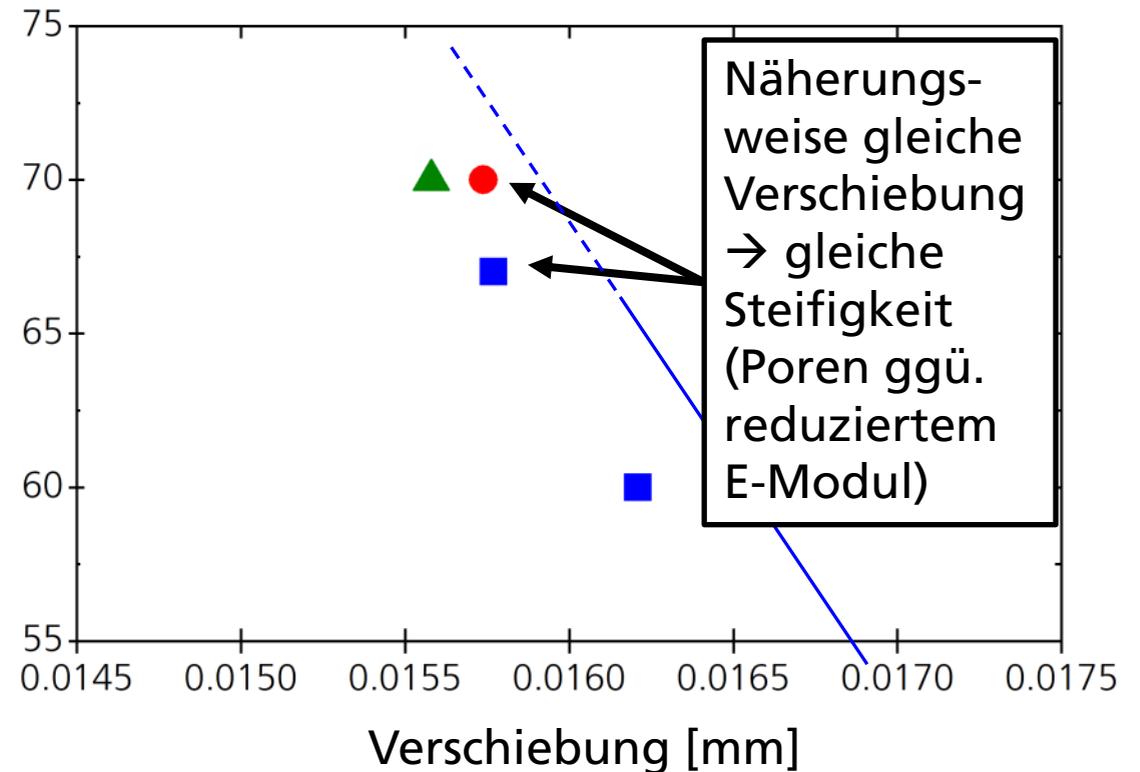
Ideale Probe ohne Unregelmäßigkeiten



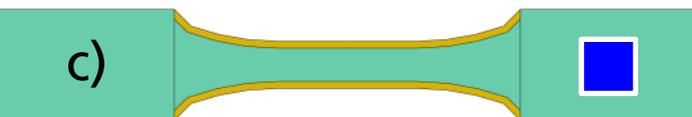
Probe mit modellierten Poren



Elastizitätsmodul der Oberflächenschicht [GPa]



Probe ohne Unregelmäßigkeiten, oberflächennahe Schicht mit reduziertem Elastizitätsmodul



Max. Spannung bei gleicher globaler Steifigkeit

- a):  $\sigma_{\max} = 50,2 \text{ MPa}$
- b):  $\sigma_{\max} = 175,5 \text{ MPa}$
- c):  $\sigma_{\max} = 51,1 \text{ MPa}$

- min. Querschnitt:  $3,4 \times 2 \text{ mm}$
- Porendurchmesser:  $0,02 - 0,1 \text{ mm}$
- Schichtdicke:  $0,5 \text{ mm}$
- Axialkraft:  $F = 340 \text{ N}$ ; linear-elastisch, isotrop

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Förderhinweis und Kontakt

**Varika**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



GEFÖRDERT VOM



Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb des Technologieprogramms "PAiCE Digitale Technologien für die Wirtschaft" gefördert und vom Projektträger „Gesellschaft, Innovation, Technologie – Informationstechnologien/Elektromobilität“ im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

[www.varika.de](http://www.varika.de)

An dieser Stelle sei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Verbundprojektes „Betriebsfestigkeit additiv gefertigter Bauteile – BadgeB“ gedankt, dem ein Teil der Ergebnisse entstammen.

[www.badgeb.de](http://www.badgeb.de)

**Dipl.-Ing. Benjamin Möller**

Gruppe Bauteilgebundenes  
Werkstoffverhalten  
Abteilung Werkstoffe und Bauteile  
Bereich Betriebsfestigkeit

Telefon: +49 6151 705-8443

Fax: +49 6151 705-214

[benjamin.moeller@lbf.fraunhofer.de](mailto:benjamin.moeller@lbf.fraunhofer.de)

**Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF**

**Insitutsleiter: Prof. Dr.-Ing. T. Melz**

Bartningstr. 47

64289 Darmstadt

[www.lbf.fraunhofer.de](http://www.lbf.fraunhofer.de)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Dipl.-Ing. Benjamin Möller  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF  
[benjamin.moeller@lbf.fraunhofer.de](mailto:benjamin.moeller@lbf.fraunhofer.de)  
[www.lbf.fraunhofer.de](http://www.lbf.fraunhofer.de)

Mitarbeit:  
Dr.-Ing. Rainer Wagener  
Matilde Scurria, M.Sc.  
Kai Schnabel, M.Sc.  
Angelika Till (Metallogr.)

Ein herzlichen Dank gilt den beteiligten Kollegen des Fraunhofer LBF, die wesentliche Inhalte zu diesem Vortrag beigetragen haben, sowie den Projektpartnern der zugrundeliegenden Forschungsprojekte.