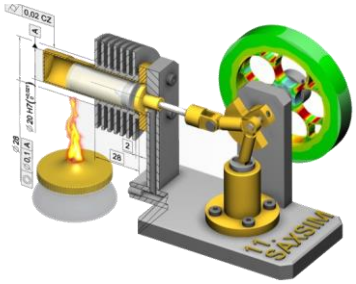
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

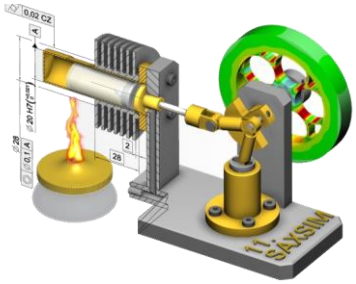
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP)
Professur Virtuelle Fertigungstechnik



11. Anwendertreffen SAXSIM

Methoden und Herausforderungen bei der numerischen Simulation des selektiven Laserschmelzens (SLM)

M.Sc. Stephan Lüder
Dr. Marcel Graf
Prof. Birgit Awiszus
Thoufeili Taufek
Prof. Yupiter HP Manurung



VIRTUELLE FERTIGUNGSTECHNIK

UNIVERSITI TEKNOLOGI MARA

DAAD

AGENDA

1. Einleitung
2. Experimentelle Untersuchungen
3. Numerische Simulation des selektiven Laserschmelzens
   - 3.1 Simufact Additive
   - 3.2 MSC Marc
4. Zusammenfassung/Ausblick

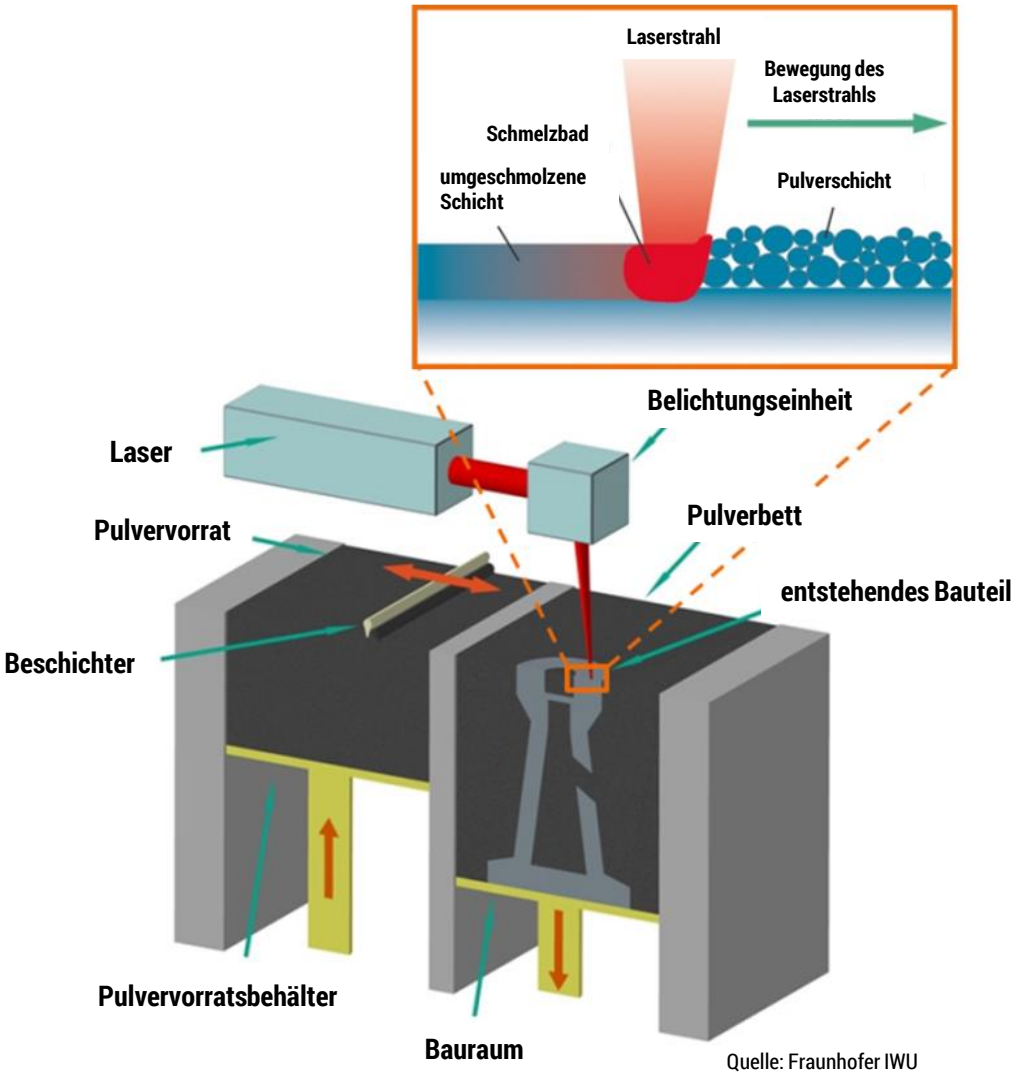
1. Einleitung

Selektives Laserschmelzen (SLM)

- Additives Fertigungsverfahren im Pulverbettverfahren
- Schichtweiser Auftrag von Metallpulver
- Aufschmelzen des Werkstoffes mittels Laserstrahl

<u>Vorteile:</u>

- Hoher Materialausnutzungsgrad
- Hohe Gestaltungsfreiheit und Bauteilkomplexität
- Hohe Flexibilität

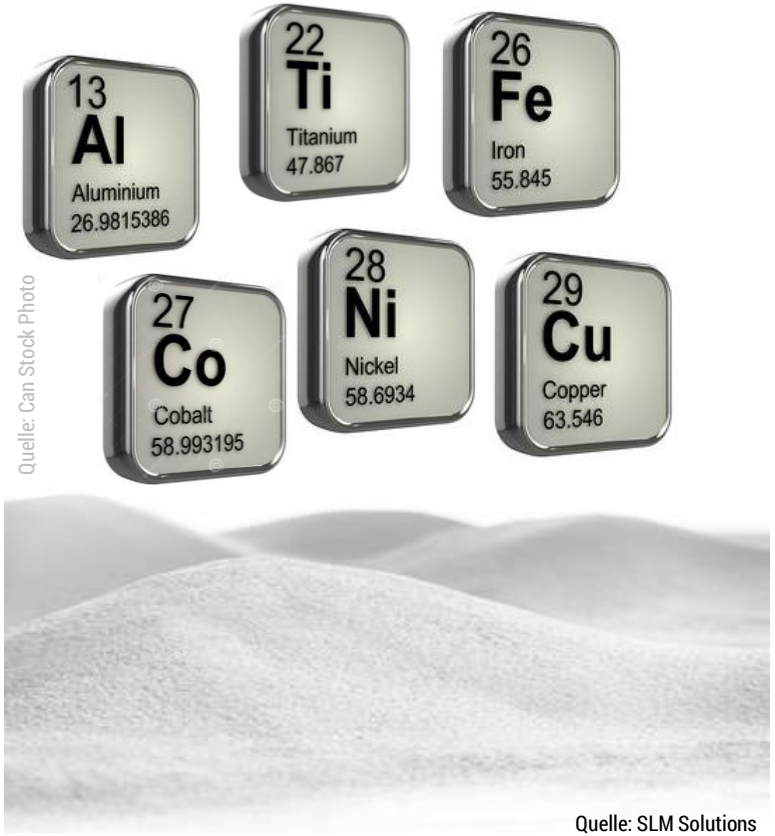


Quelle: Fraunhofer IWU

1. Einleitung

Selektives Laserschmelzen (SLM)

Basislegierungen:



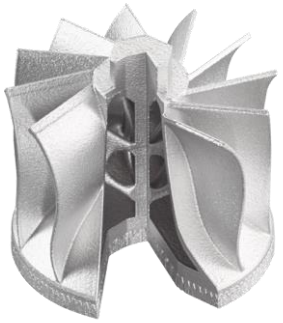
Quelle: Can Stock Photo

Quelle: SLM Solutions

Anwendungen:

- Luft- und Raumfahrt
- Automobilindustrie
- Medizintechnik
- Maschinenbau

Quelle: SLM Solutions



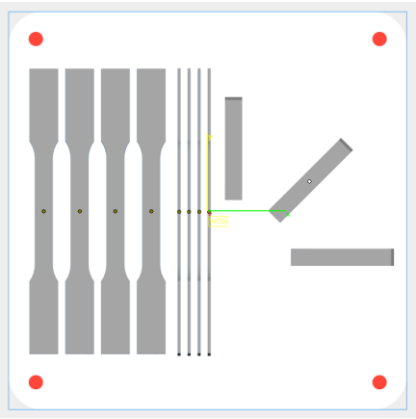
Quelle: Marhellabs

Quelle: SLM Solutions

2. Experimentelle Untersuchungen

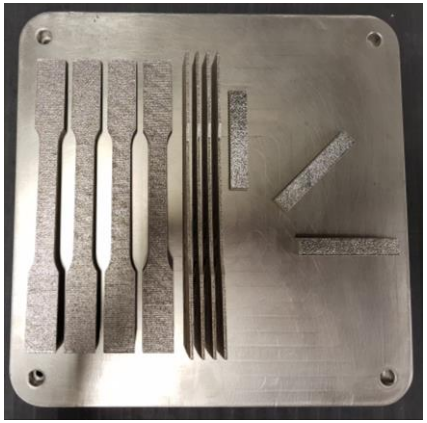
Herstellung von Flachzugstäben und Kalibrierungsproben mittels SLM

- Anlage: SLM 280 HL (Firma Contraves, Malaysia)
- Pulverwerkstoff: Edelstahl 316L/1.4404
- Wärmebehandlung: keine
- 8 Flachzugstäbe (4 liegend, 4 stehend) mit Stützstruktur (Winkel: 5°)
- 3 Kalibrierungsproben (Cantilever Beams) direkt auf der Grundplatte



Ziele:

- Untersuchung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch
- Einflussuntersuchung von Bauteilorientierung/Schichtaufbau auf Verzug und mechanische Eigenschaften
- Kalibrierung für die mechanische Simulation mittels Simufact Additive



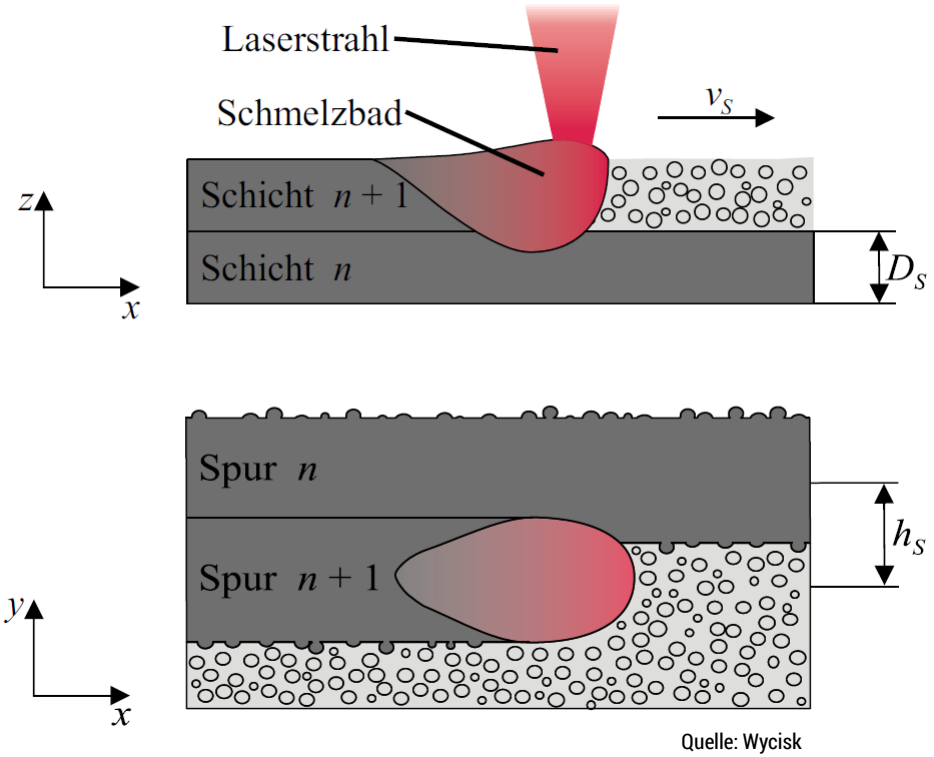
2. Experimentelle Untersuchungen

Herstellungsparameter

- Werkstoff: Edelstahl 316L/1.4404
- Schichtdicke: D_s = 50 µm
- Laserleistung: P_L = 275 W
- Scangeschwindigkeit: v_s = 700 mm/s
- Laserstrahldurchmesser: d_L = 80 µm
- Spurabstand: h_s = 0,12 mm
- Scanweite: s_w = 10 mm
- Scanstrategie: bidirektional

Volumenenergiedichte:

$$E_v = \frac{P_L}{D_s \cdot v_s \cdot h_s}$$



Quelle: Wycisk

2. Experimentelle Untersuchungen

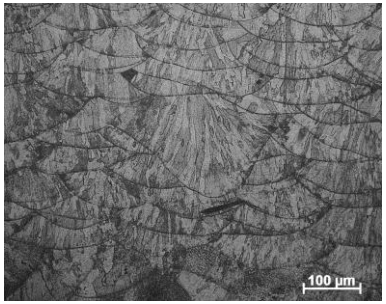
Untersuchung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch

Additiv gefertigte Flachzugstäbe (316L/1.4404):

- Herstellungsverfahren: SLM
- D: 3 x liegend
- T: 3 x stehend

Flachzugstab aus SLM-Prozess (Schichtaufbau über Dicke)

Flachzugstab aus SLM-Prozess (Schichtaufbau über Breite)



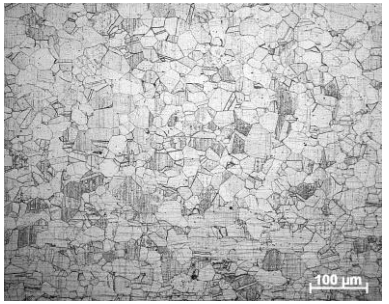
Mikrostruktur SLM (Probe D2)

Flachzugstäbe aus Blechwerkstoff (316L/1.4404):

- Herstellungsverfahren: Walzen + Scherschneiden
- P: 5 x parallel zur Walzrichtung
- S: 5 x senkrecht zur Walzrichtung

Flachzugstab aus Blech (parallel zur Walzrichtung)

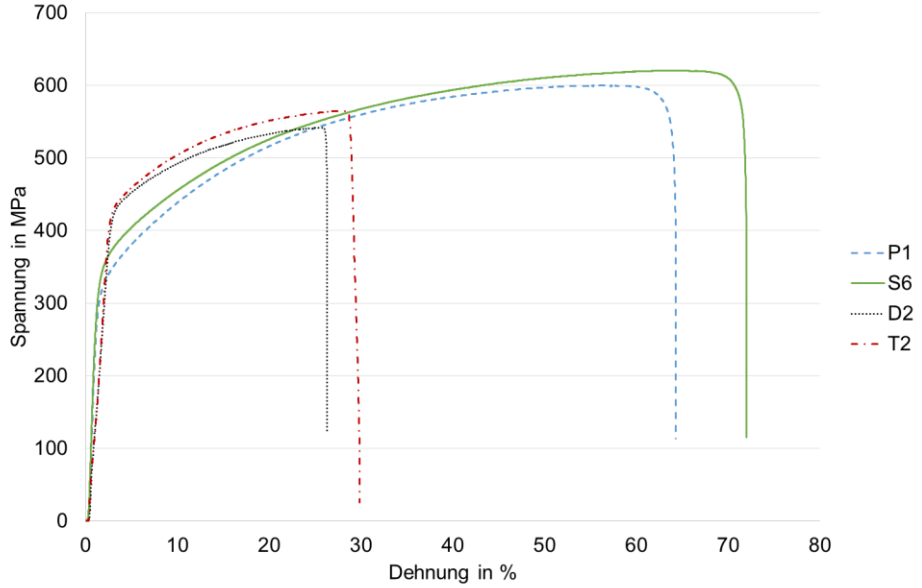
Flachzugstab aus Blech (senkrecht zur Walzrichtung)



Mikrostruktur Blech (Probe S6)

2. Experimentelle Untersuchungen

Untersuchung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch



Probenserie	gemittelte Zugfestigkeit in MPa	gemittelte Dehnung in %
P: Blech parallel zur Walzrichtung	601,1	64,9
S: Blech senkrecht zur Walzrichtung	618,8	72,8
D: SLM Schichtaufbau in Dickenrichtung	545,5	26,7
T: SLM Schichtaufbau in Breitenrichtung	559,6	28,1

3. Numerische Simulation des selektiven Laserschmelzens

Berechnungen/Anwendungen

- Berechnung der Verformung des Bauteils und der Grundplatte
- Verzugskompensation durch Anpassung der Bauteilgeometrie
- Berechnung und Minimierung von Eigenspannungen
- Identifikation von Fertigungsproblemen (z. B. Beschichter-Kontakt, Teilefehler und Schichtversätze)
- Optimierung von Bauteilpositionierung und Bauorientierung
- Generierung und Optimierung der Stützstrukturen
- Spannungsabbau durch Wärmebehandlung
- Verzug nach Entfernung der Grundplatte und Stützstruktur
- HIP-Prozess: Untersuchung stark erhöhter Temperaturen und Drücke

Simulation der AM-Prozesskette mit MSC-Produkten

Quelle: Simufact

3. Numerische Simulation des selektiven Laserschmelzens

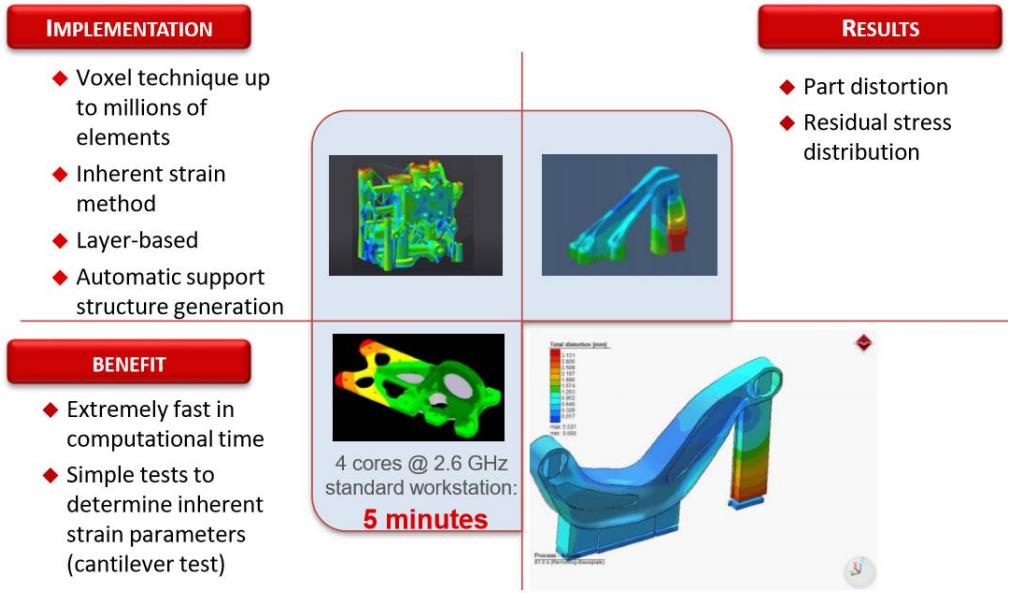
Methodische Ansätze

Makro-Skala: Mechanischer Ansatz

- Berechnung mehrerer Pulverschichten in einem Schritt
- Rein mechanische Inherent Strains Methode
- Ergebnis: Spannungen und Verzug
- Berechnungsdauer: sehr schnell

Voraussetzungen/Herausforderungen:

- Kalibrierung mittels Cantilever Beams zur Berechnung der Inherent Strains (ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{zz})
- Inherent Strains bilden alle Werkstoff- und Prozessparameter ab
- Kalibrierung ist nur für diesen Parametersatz gültig



Quelle: Simufact

3. Numerische Simulation des selektiven Laserschmelzens

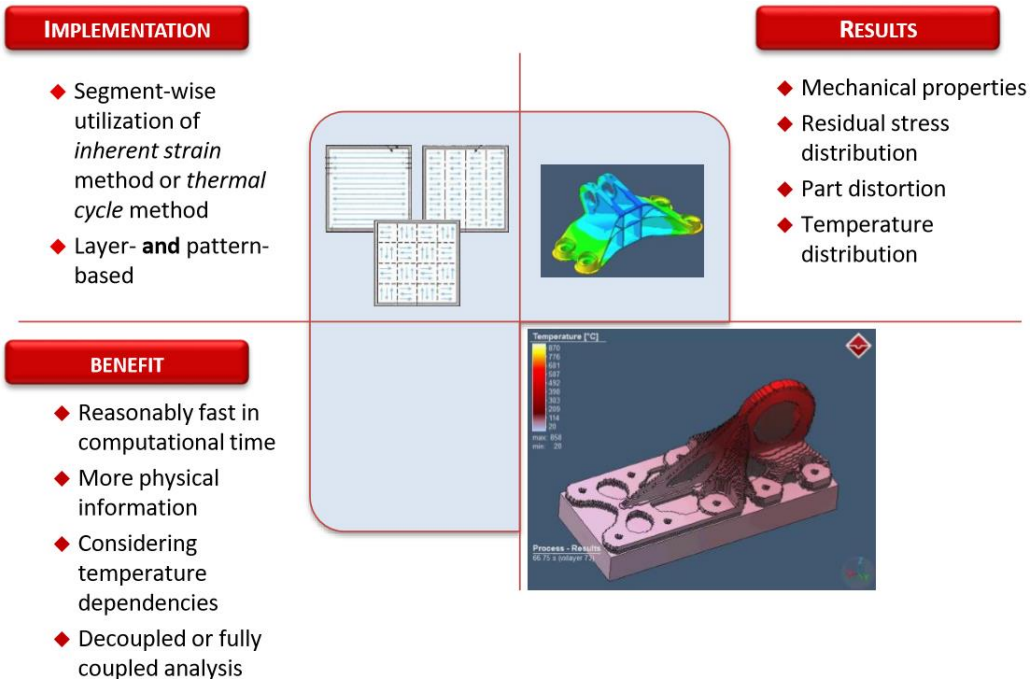
Methodische Ansätze

Meso-Skala: Thermo-mechanischer Ansatz

- Berechnung mehrerer Pulverschichten in einem Schritt oder in Segmenten
- Thermische, mechanische und thermo-mechanische Kopplung
- Ergebnis: Verzug, Spannungen und Temperatur
- Berechnungsdauer: schnell

Voraussetzungen/Herausforderungen:

- Exakte Definition der physikalischen und thermischen Parameter zur korrekten Berechnung des Wärmeeintrags erforderlich (z. B. Laserparameter, Scanstrategie, Wärmestrom und Wärmeübergang)
- Aufwändige Kennwertbestimmung für Pulvermaterialien erforderlich



Quelle: Simufact

3. Numerische Simulation des selektiven Laserschmelzens

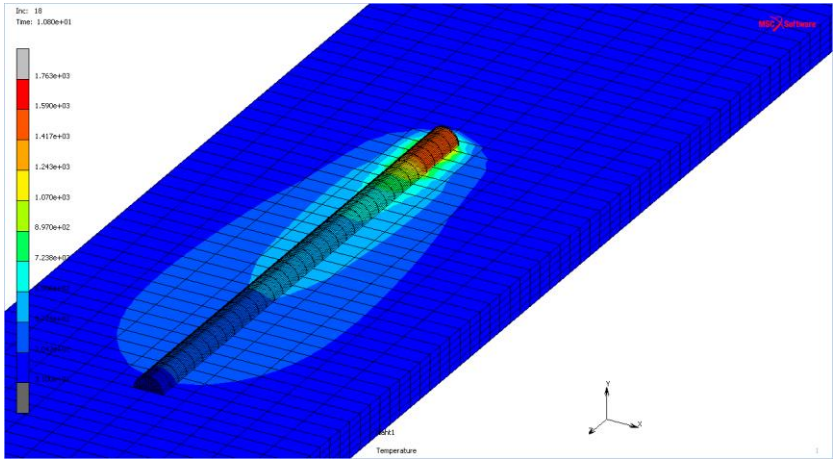
Methodische Ansätze

Mikro-Skala: Voll transienter thermo-mechanischer Ansatz

- Hoher Detailierungsgrad
- Modellierung mittels Moving Heat Source Model
- Voll transiente thermo-mechanische Kopplung
- Ergebnis: exakte thermische Historie
- Berechnungsdauer: sehr hoch

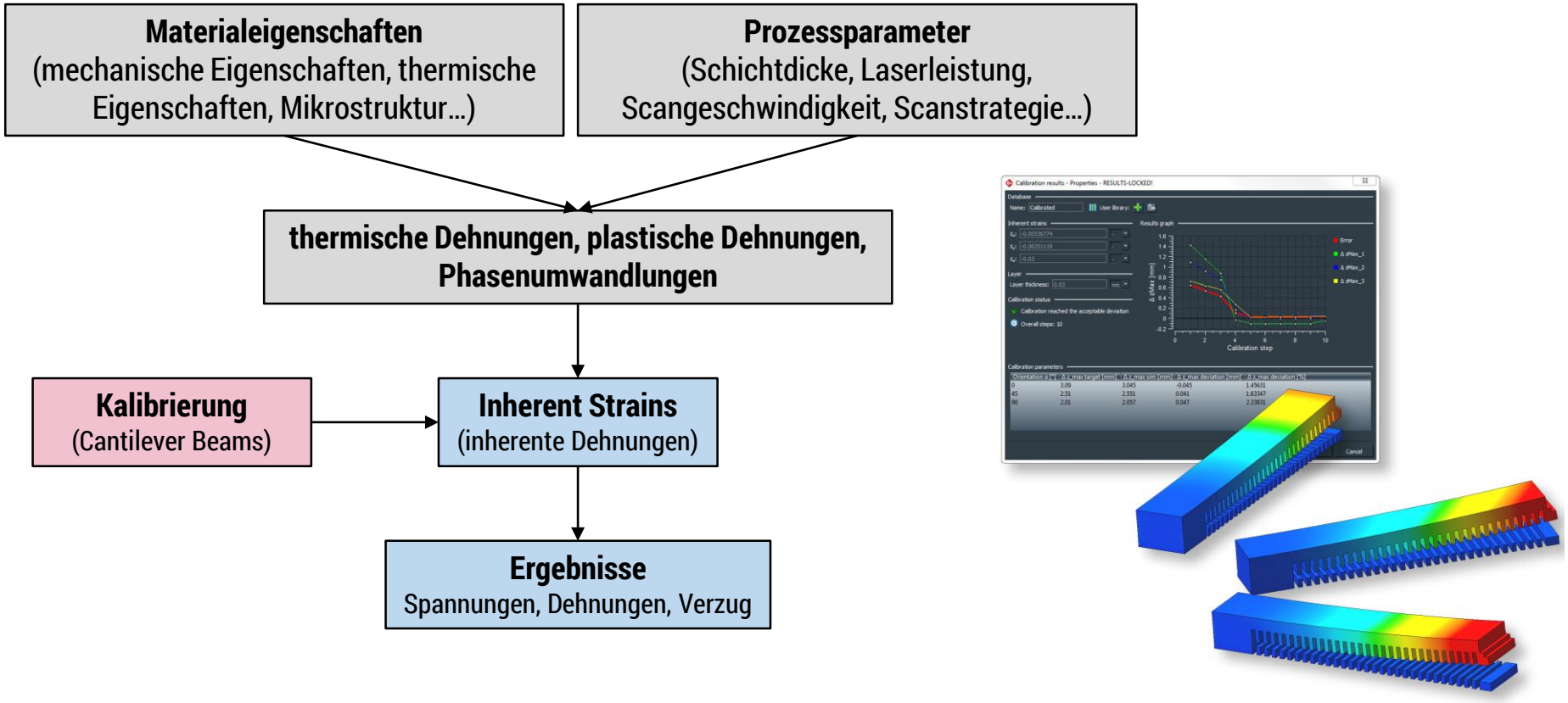
Voraussetzungen/Herausforderungen:

- Sehr hohes Prozessverständnis und materialwissenschaftliche Kenntnisse erforderlich
- Aktuell nicht in Simufact Additive implementiert
  → numerische Simulation mittels MSC Marc



3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

Makro-Skala: Mechanischer Ansatz - Kalibrierung



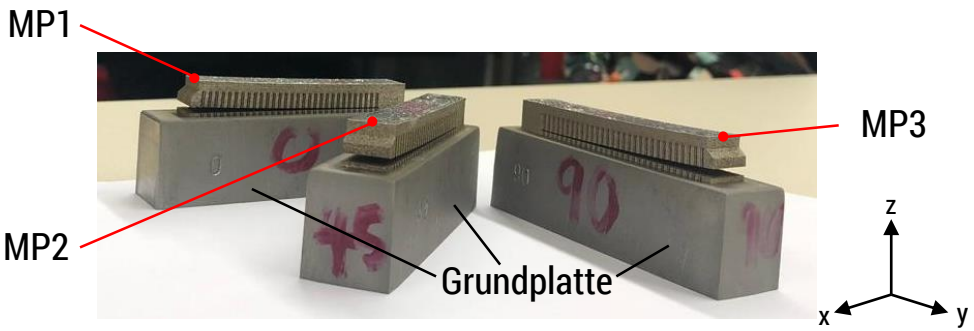
Quelle: Simufact

3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

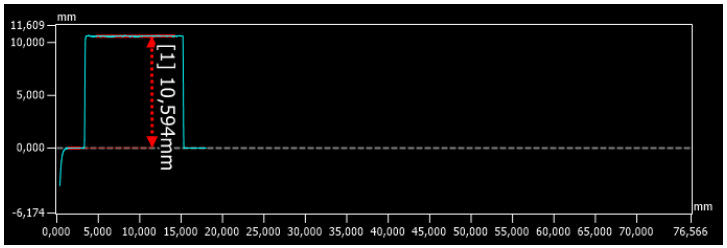
Makro-Skala: Mechanischer Ansatz - Kalibrierung

Vermessung (Experiment):

- Verzug in z-Richtung nach Trennschnitt
- Referenzhöhe: h_R = 9 mm
- MP1 Kalibrierungsprobe 0°: Δz_{max} = 1,594 mm
- MP2 Kalibrierungsprobe 45°: Δz_{max} = 1,445 mm
- MP3 Kalibrierungsprobe 90°: Δz_{max} = 1,766 mm



Drahterodierte Kalibrierungsproben



Vermessung MP1 Kalibrierungsprobe 0°

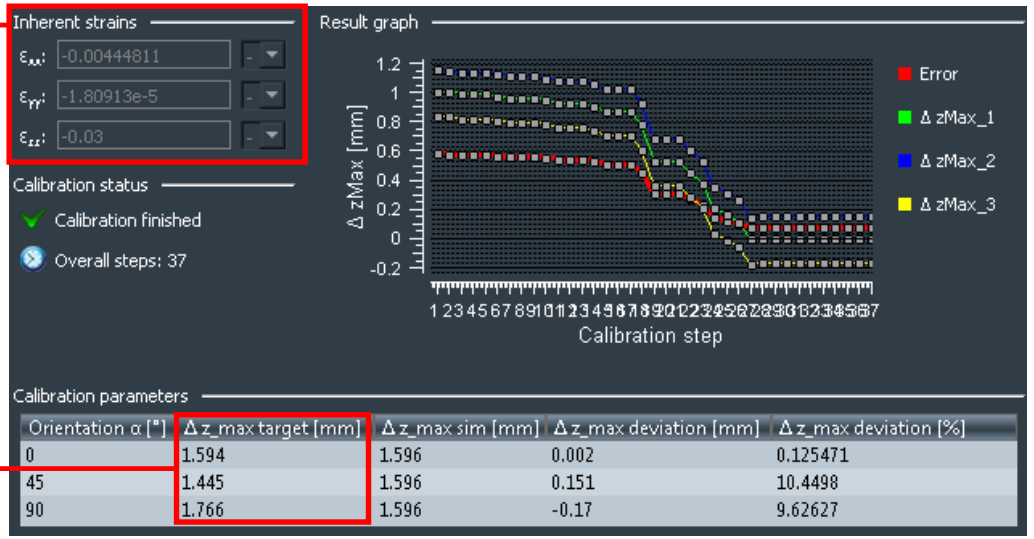
3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

Makro-Skala: Mechanischer Ansatz - Kalibrierung

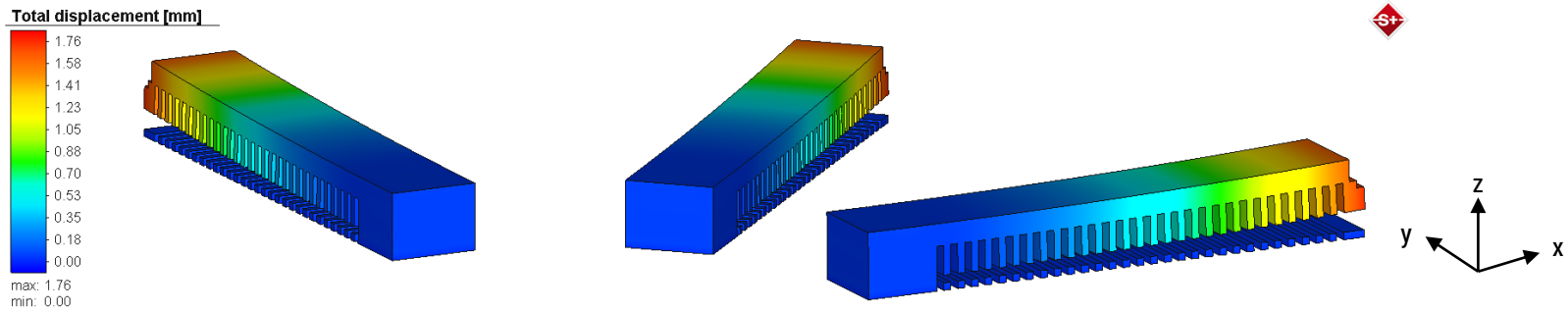
Inherent Strains:

- ε_{xx} = - 4,48110e^{-3}
- ε_{yy} = - 1,80913e^{-5}
- ε_{zz} = - 3,00000e^{-2}

Vermessung



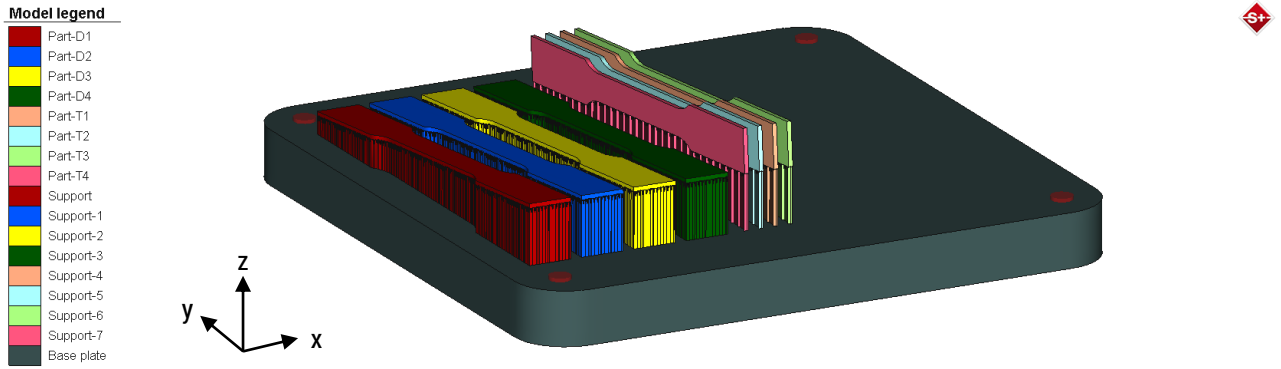
Orientation α [°]	Δ z_max target [mm]	Δ z_max sim [mm]	Δ z_max deviation [mm]	Δ z_max deviation [%]
0	1.594	1.596	0.002	0.125471
45	1.445	1.596	0.151	10.4498
90	1.766	1.596	-0.17	9.62627



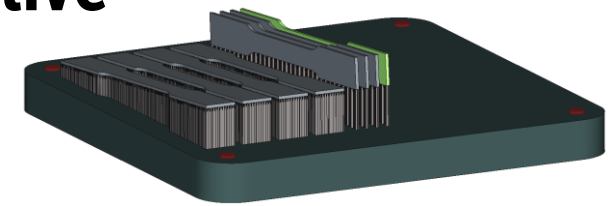
3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

Modellaufbau

- Definition des Bauraums und der Grundplatte
- Import der Bauteilgeometrien (STL) und Positionierung analog zum Experiment
- Materialdaten für Pulverwerkstoff aus Simufact Material 2018
- Generierung der Stützstrukturen (Methode: Materialise)
- Vernetzung: Voxel-Kantenlänge 2,4 mm (ca. 45.000 Elemente)
- **Mechanischer Ansatz:** Definition der Werte der Inherent Strains
- **Thermo-mechanischer Ansatz:** Definition der physikalischen und thermischen Prozessparameter

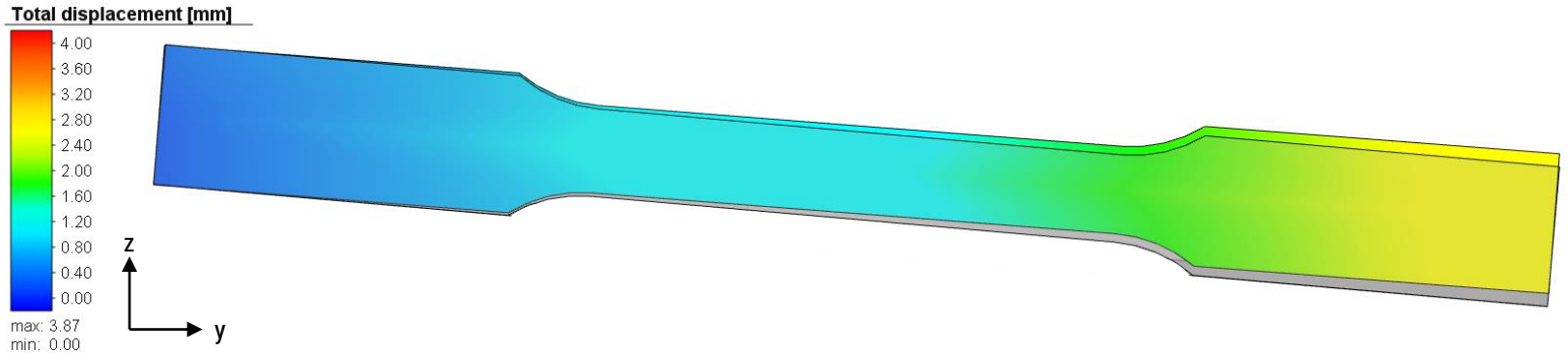


3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

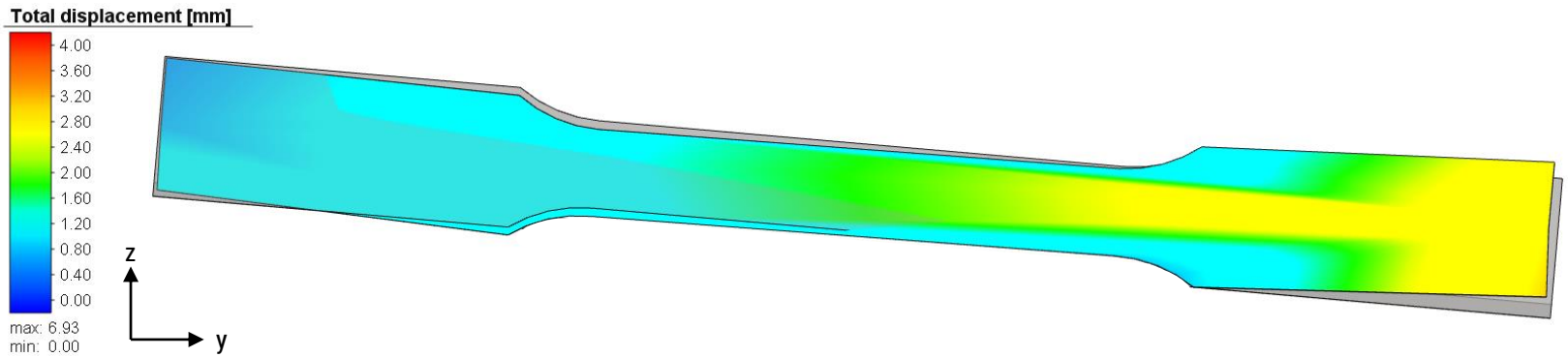


Numerische Ergebnisse: Verzug nach Trennprozess (Probe T3)

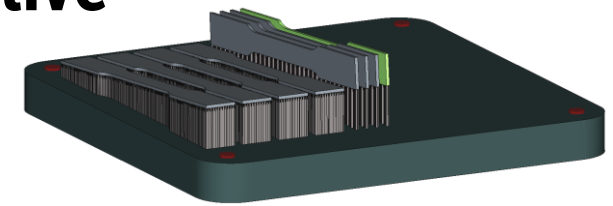
Mechanischer Ansatz (Inherent Strains Methode):



Thermo-mechanischer Ansatz:

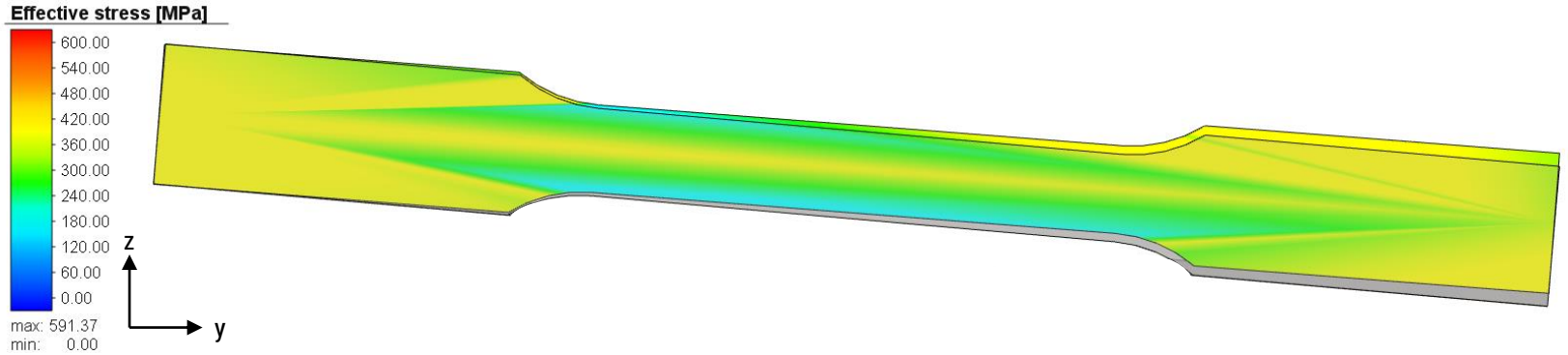


3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

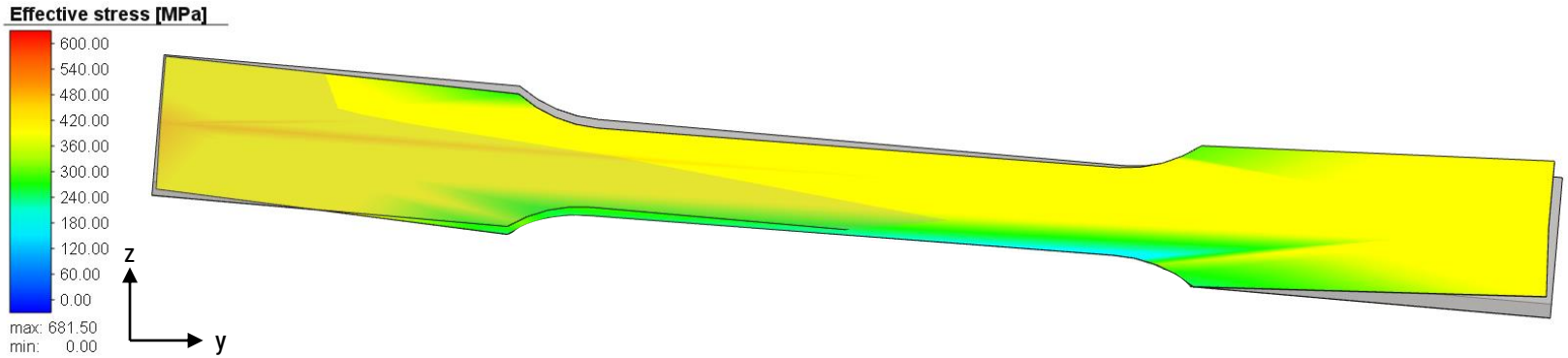


Numerische Ergebnisse: Spannung nach Trennprozess (Probe T3)

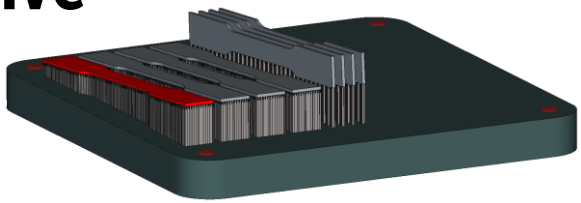
Mechanischer Ansatz (Inherent Strains Methode):



Thermo-mechanischer Ansatz:

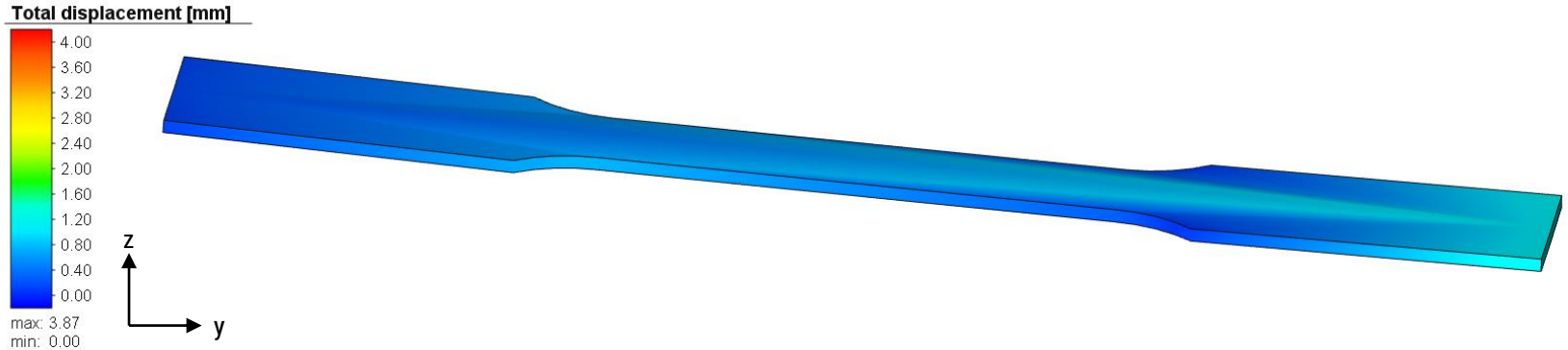


3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

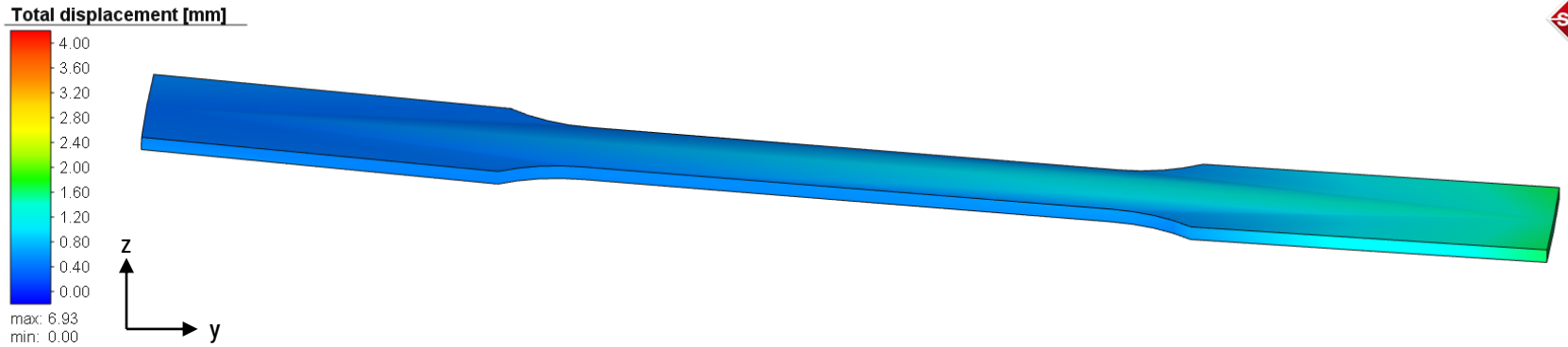


Numerische Ergebnisse: Verzug nach Trennprozess (Probe D1)

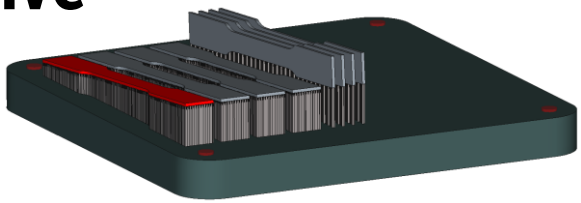
Mechanischer Ansatz (Inherent Strains Methode):



Thermo-mechanischer Ansatz:

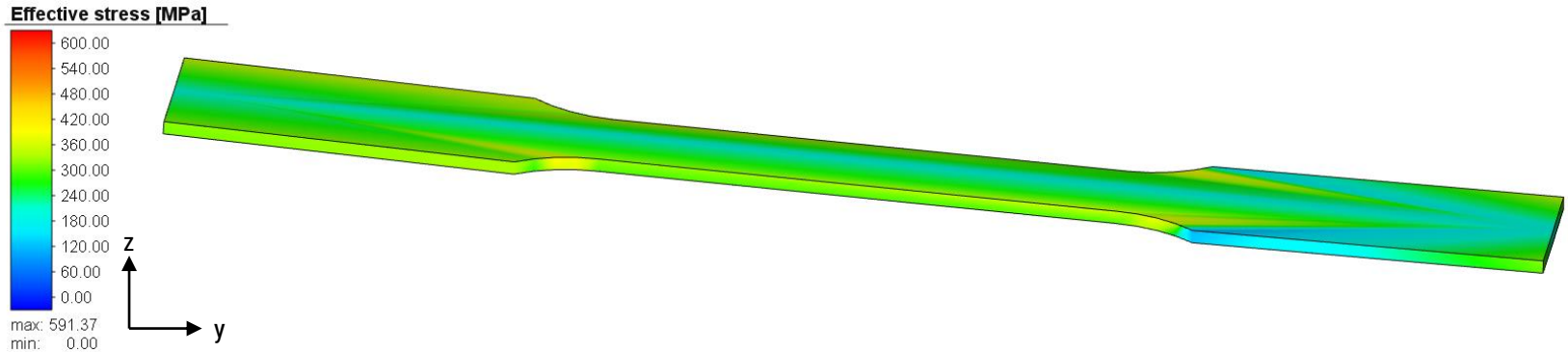


3.1 Numerische Simulation mit Simufact Additive

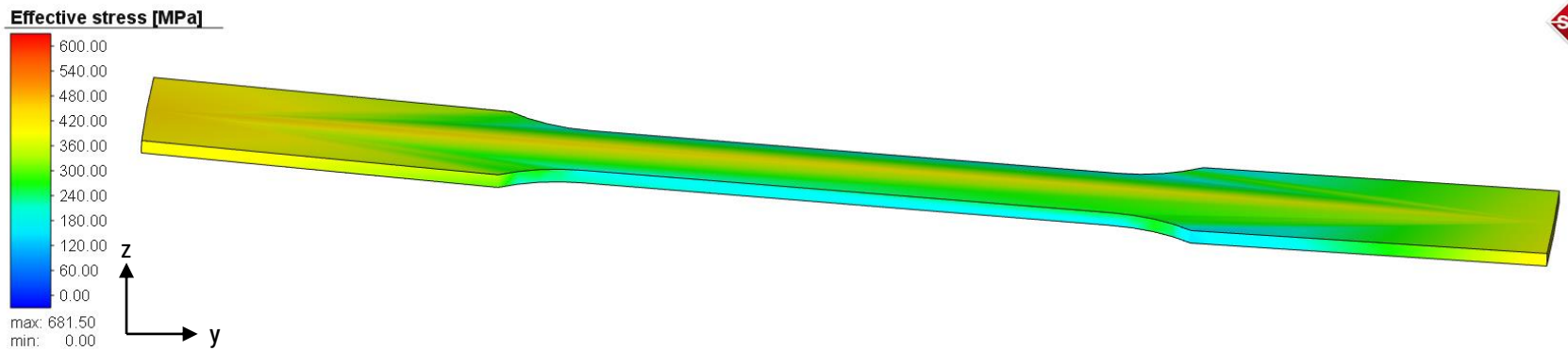


Numerische Ergebnisse: Spannung nach Trennprozess (Probe D1)

Mechanischer Ansatz (Inherent Strains Methode):



Thermo-mechanischer Ansatz:



3.2 Numerische Simulation mit MSC Marc

Mikro-Skala: Voll transienter thermo-mechanischer Ansatz

Werkstückgeometrie:

- Flachzugstab in Anlehnung an DIN 50125 – H 12.5 × 50

Materialdaten:

- Materialdaten für 316L aus MSC-Datenbank
- Schmelztemperatur: ϑ_{liquid} = 1503 °C (Laserleistung unberücksichtigt)
- Wärmeübergangskoeffizient Metall-Metall: $\alpha_{Met\text{-}Met}$ = 2000 W/(m²K)
- Wärmeübergangskoeffizient zum Umgebungsmedium: $\alpha_{Met\text{-}Luft}$ = 25 W/(m²K)
- Emissionskoeffizient: ε = 0,5

Modellierung:

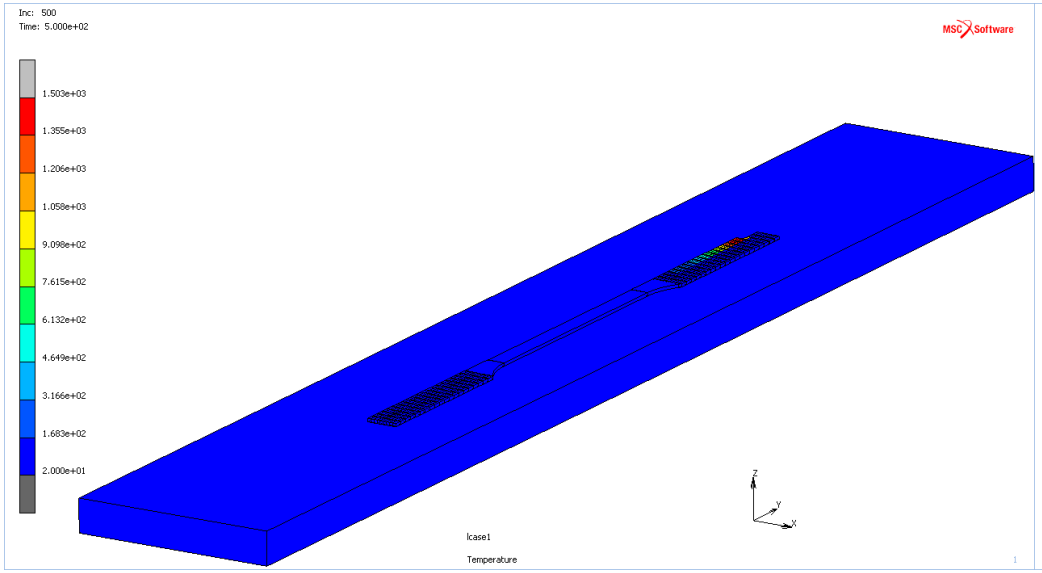
- Deactivation Element Method (Early Birth Element Method)
- Wärmequelle in Zylinderform
- Laserstrahldurchmesser d_L = 0,1 mm
- Laserstrahleindringtiefe t_L = 0,1 mm
- Elementtyp: Hex-8 (ca. 15.000 bzw. 206.000 Elemente)

3.2 Numerische Simulation mit MSC Marc

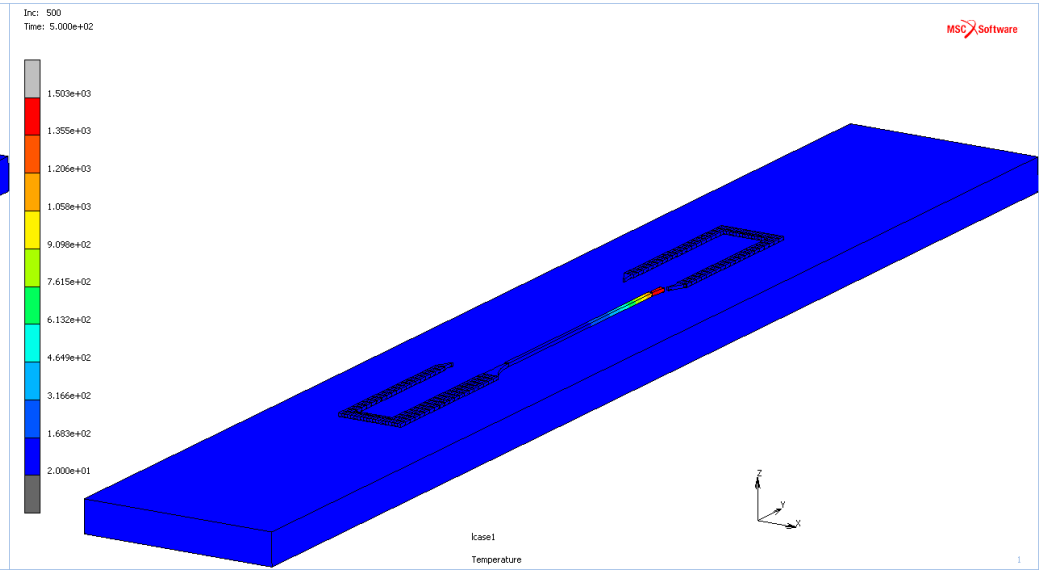
Numerische Ergebnisse der voll transienten thermo-mechanischen Simulation mit groben Netz

Einfluss des Laserbewegungspfades (mäanderförmig vs. spiralförmig; **Inkrement 500**)

Temperatur (mäanderförmig)



Temperatur (spiralförmig)

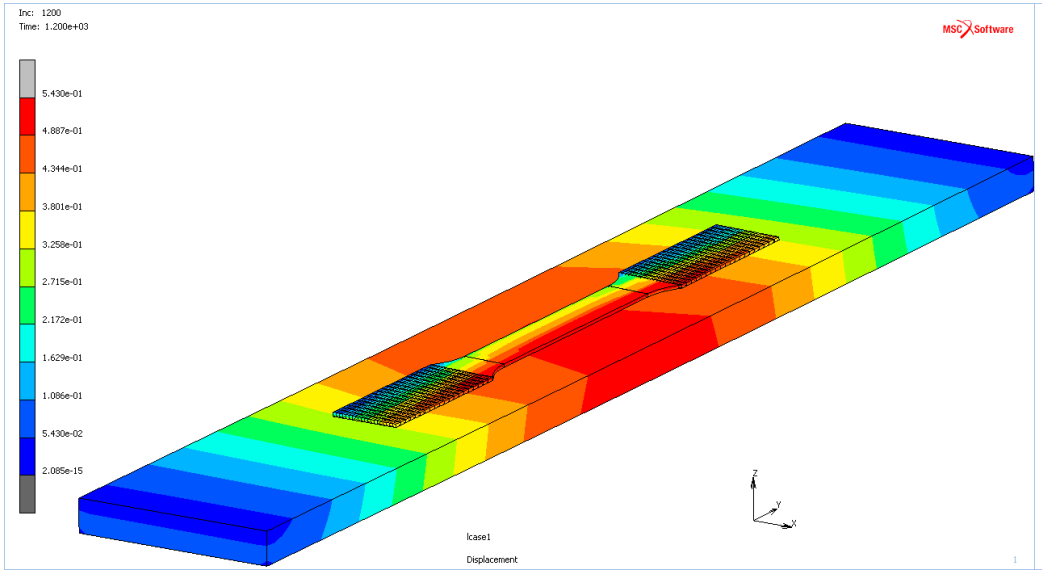


3.2 Numerische Simulation mit MSC Marc

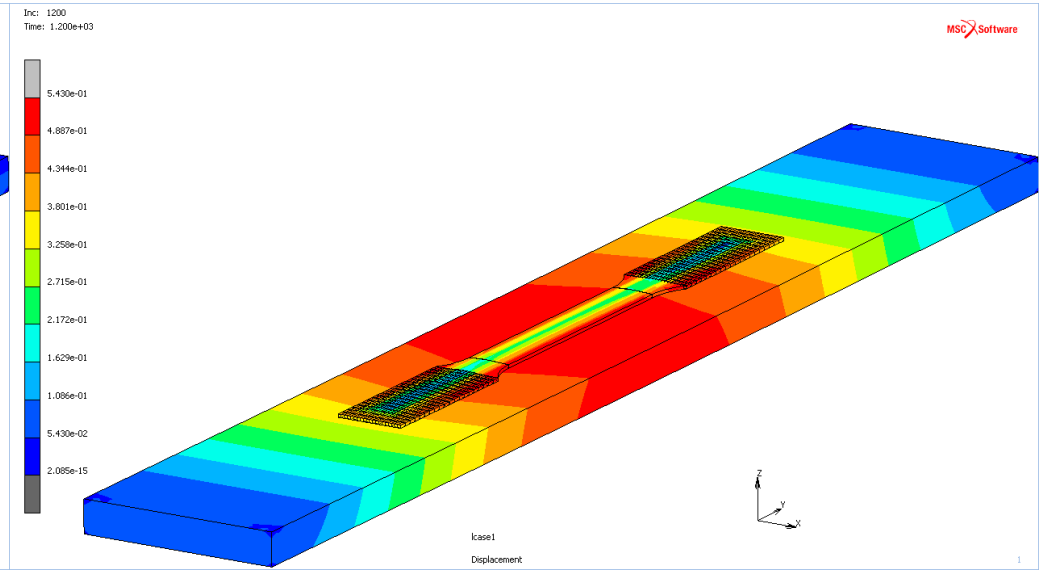
Numerische Ergebnisse der voll transienten thermo-mechanischen Simulation mit groben Netz

Einfluss des Laserbewegungspfades (mäanderförmig vs. spiralförmig; am **Prozessende** bei **RT**)

Verzug (mäanderförmig)



Verzug (spiralförmig)



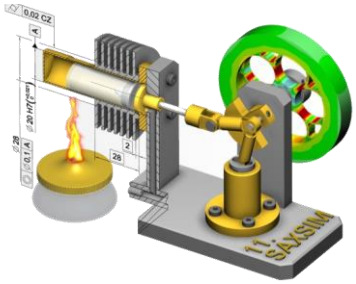
4. Zusammenfassung/Ausblick

Zusammenfassung

Berechnungsansatz	Mechanisch	Thermo-mechanisch	Voll transient thermo-mechanisch
Größenskala	Makro-Skala	Meso-Skala	Mikro-Skala
Detaillierungsgrad	☹ sehr gering	😐 gering	☺ hoch
Berechnungsdauer	☺ sehr gering	☺ gering	☹ hoch
Ergebnisqualität	☹ mangelhaft	😐 befriedigend	☺ gut
Erforderliche Materialdaten	☺ sehr gering	😐 umfangreich	☹ sehr umfangreich
Erforderliche Prozessparameter	☺ gering	😐 umfangreich	☹ sehr umfangreich
Kalibrierungsprozess notwendig	☹ ja	☺ nein	☺ nein
Zielgruppe	Praxis	Praxis/Entwicklung	Wissenschaft

Ausblick

- Bestimmung der Materialeigenschaften für Pulverwerkstoffe
- Effizienzsteigerung: Reduktion des Detaillierungsgrads der voll transienten thermo-mechanischen Simulation
- Ziel: Physikalisch korrekte Ergebnisse auf Größenskala der Schichtdicke



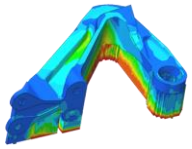
11. Anwendertreffen SAXSIM

Methoden und Herausforderungen bei der numerischen Simulation des selektiven Laserschmelzens (SLM)

VIF
VIRTUELLE FERTIGUNGSTECHNIK

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

UNIVERSITI TEKNOLOGI MARA

DAAD

Simufact Additive