

# Schlussbericht vom 30.06.2025

zum IGF-Vorhaben FKZ **22690 N**

## Thema

Reduktion des in-situ Verzugs und der Konturüberhöhung durch material- und geometriespezifische Parameteranpassung im PBF-LB/M-Prozess

## Berichtszeitraum

01.01.2023 bis 30.06.2025

## Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.

Wallstr. 58/59

10179 Berlin

## Forschungseinrichtung(en)

Universität Bremen - ISEMP

Am Fallturm 1

28359 Bremen

Ruhr-Universität Bochum - HAM

Universitätsstr. 150

44801 Bochum



Airbus Endowed Chair for  
Integrative Simulation and  
Engineering of Materials and Processes



**RUHR**  
**UNIVERSITÄT**  
**BOCHUM**

**RUB**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....</b>	<b>3</b>
1.1	Arbeitspaket 1.1: Vorarbeiten & Definition der Probekörper .....	3
1.2	Arbeitspaket 1.2: Experimentelle Materialcharakterisierung.....	4
1.3	Arbeitspaket 1.3: Numerisches Materialmodell .....	7
1.4	Arbeitspaket 1.4: Thermomechanisches Simulationsmodell.....	8
1.5	Arbeitspaket 2.1: Entwicklung von Datenschnittstellen .....	9
1.6	Arbeitspaket 2.2: Integration der Mess-Sensorik .....	10
1.7	Arbeitspaket 2.3: Kalibrierung der Simulationsergebnisse.....	14
1.8	Arbeitspaket 2.4: Validierung der Simulationsergebnisse .....	15
1.9	Arbeitspaket 3.1: Simulationsbasierte Optimierung der Prozessparameter und Belichtungsstrategien.....	16
1.10	Arbeitspaket 3.2: Algorithmus zur automatisierten Auslegung der optimierten Prozessführung	23
1.11	Arbeitspaket 3.3: Experimentelle Validierung der Optimierungsstrategien.....	25
1.12	Arbeitspaket 3.4: Optimierung von KMU-relevanten Geometrien.....	28
1.13	Arbeitspaket 4: Dokumentation, Ergebnistransfer & Veröffentlichung der Ergebnisse.....	31
<b>2</b>	<b>Verwendung der Zuwendung .....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Wissenstransfer in die Wirtschaft .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>Durchgeführte Transfermaßnahmen .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>38</b>

# 1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

## 1.1 Arbeitspaket 1.1: Vorarbeiten & Definition der Probekörper

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Proben- und Demonstratorgeometrien eingesetzt, um sowohl die thermischen als auch die mechanischen Modellanteile der Simulation zu kalibrieren und anschließend zu validieren. Für die grundlegenden Parameterstudien sowie zur Kalibrierung des thermischen Simulationsanteils kamen Einzelüberhangsproben zum Einsatz (Abbildung 1a). Obwohl die exemplarisch dargestellte Probe einen Überhangswinkel von 30° aufweist, wurden Breite, Tiefe, Höhe und Überhangswinkel je nach Untersuchungsziel systematisch variiert, um ein breites Spektrum geometrischer Einflussgrößen abzudecken. Ergänzend dazu wurden Cantileverproben (ebenfalls Abbildung 1a) genutzt, die sich aufgrund ihrer einseitigen Einspannung besonders zur Kalibrierung der mechanischen Verzugsmodelle eignen.

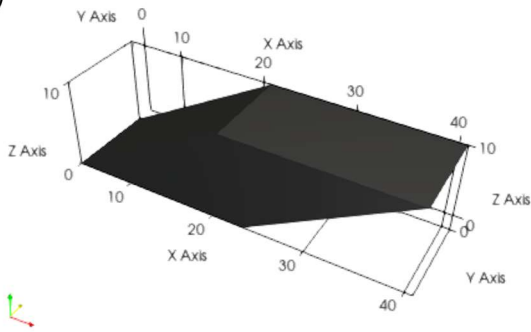
Durch den Wegfall zweier Unternehmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss reduzierte sich der Umfang an KMU-relevanten Bauteilen. Dennoch konnten zentrale Referenzgeometrien berücksichtigt werden. Hierzu zählt das 3DBenchy (Abbildung 1c), ein aus dem Consumer-Bereich etabliertes Benchmark-Bauteil für schnelle Anlagen- und Prozessbeurteilungen. Aufgrund seiner ausgeprägten Überhänge, Brücken, Bögen und innenliegenden Bohrungen eignet sich das Benchy auch im metallischen PBF-LB/M besonders für eine schnelle, praxisnahe Bewertung der Prozessstabilität.

Ergänzend wurde der sogenannte Brenner (Abbildung 1d) integriert, ein Bauteil aus einem parallelen Projekt der FE2, das eine Vielzahl unterschiedlicher Überhangssituationen kombiniert und daher ein anspruchsvolles Validierungsobjekt darstellt. Als weiteres komplexes Prüfobjekt kam ein topologieoptimierter „Blumenstrauß“ zum Einsatz (Abbildung 1e), der vom PbA zur Verfügung gestellt wurde. Mit seinen zahlreichen organisch geformten Überhängen repräsentiert er typische Anwendungen aus der industriellen Produktentwicklung.

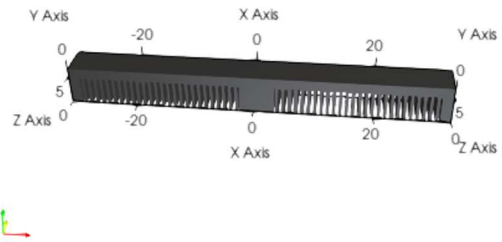
Für die gezielte Evaluierung unterschiedlicher Belichtungs- und Scanstrategien wurde zudem ein Propeller ausgewählt (Abbildung 1f). Dieser weist offene Seitenflächen auf, wodurch die flügelähnlichen Strukturen und deren Verzüge gut sichtbar und messbar sind. Die freistehenden Blades reagieren besonders empfindlich auf thermische Gradienten und eignen sich daher ideal zur Gegenüberstellung verschiedener Strategien zur Verzugsreduktion.

Abschließend wurden zwei spiralförmige Überhangsgeometrien eingesetzt – eine äußere und eine innere Spirale (Abbildung 1g/h). Beide Proben dienen der Validierung der Simulationsergebnisse, wobei sich insbesondere die innere Spirale als hochgradig verzugskritisch erwies und somit wertvolle Erkenntnisse zur Leistungsgrenze der Prozessparameter und der Simulation lieferte.

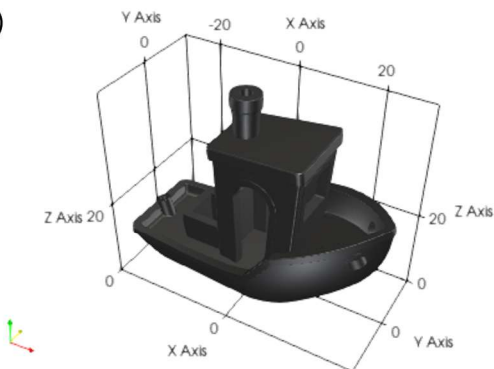
(a)



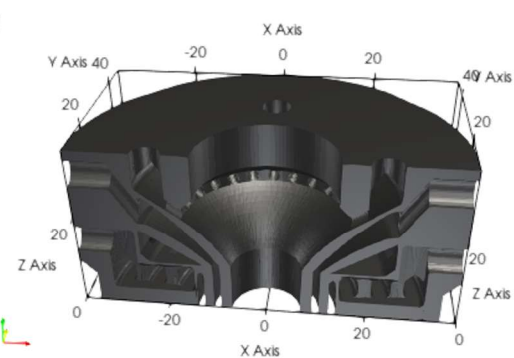
(b)



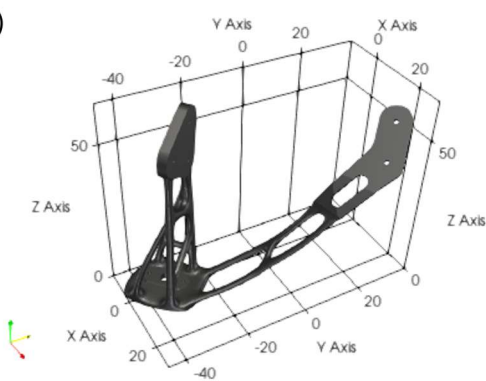
(c)



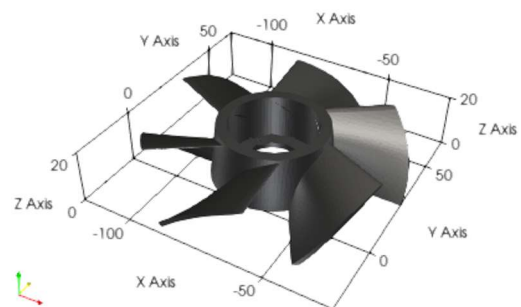
(d)



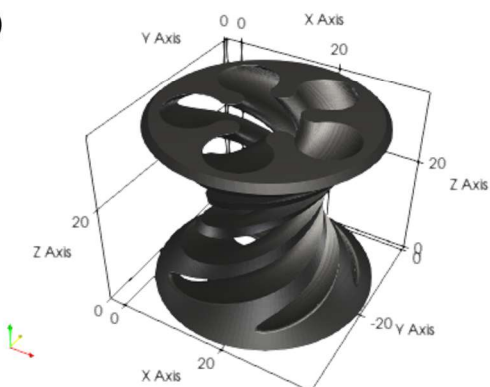
(e)



(f)



(g)



(h)

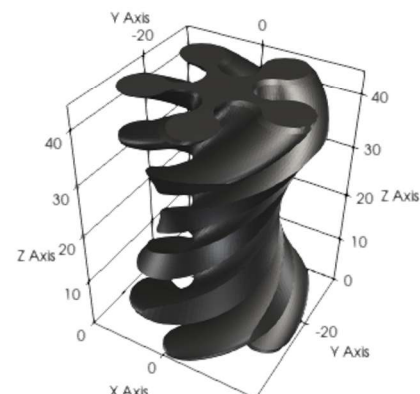


Abbildung 1: Probegeometrien (Maßstab in mm). (a) Einzelüberhangsprobe, (b) Cantilever, (c) Brenner, (e) Blumenstrauß, (f) Propeller, (g) äußere Spirale, (h) innere Spirale.

## 1.2 Arbeitspaket 1.2: Experimentelle Materialcharakterisierung

Die Grundlage für die Bestimmung der Materialdaten sowie für die Durchführung weiterer Experimente bildete die Qualifizierung der Prozessparameter. Hierbei wurde ein systematischer Ansatz gewählt, bei

welchem zahlreiche Größen für den jeweiligen Prozessparametersatz aufgenommen wurden. Die Qualifizierung der Prozessparameter wurde für die Werkstoffe AlSi10Mg und Alloy 718 und jeweils drei Schichtstärken  $D_s$  (AlSi10Mg: 30  $\mu\text{m}$ ; 60  $\mu\text{m}$ ; 120  $\mu\text{m}$ ; Alloy 718: 30  $\mu\text{m}$ ; 60  $\mu\text{m}$ ; 90  $\mu\text{m}$ ) anhand übereinander angeordneter Einzelspuren einer Länge von 5 mm durchgeführt. Für AlSi10Mg wurden hierzu Laserleistungen  $P$  zwischen 200 und 380 W in 20-W-Schritten sowie Scangeschwindigkeiten  $v_s$  von 200 bis 3000 mm/s in Intervallen von 200 mm/s bei einem Fokusbereich  $d_f$  von 80  $\mu\text{m}$  (ergänzend 120  $\mu\text{m}$ ; 160  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  für  $D_s = 120 \mu\text{m}$ ) untersucht. Beim Werkstoff Alloy 718 erfolgte eine vergleichbare Untersuchung, jedoch mit Laserleistungen von 80 bis 380 W, Scangeschwindigkeiten zwischen 200 und 2000 mm/s und einem Fokusbereich von 80  $\mu\text{m}$ . Jede Parameterkombination wurde dreimal gefertigt.

Die gestapelten Einzelspuren wurden auf der Bauplattform eingebettet und in zwei Ebenen metallografisch analysiert. Hierbei wurden folgende Größen untersucht: Kontinuität, Dichte und Breite der Einzelspur. Eine Ausnahme stellt hierbei der Parametersatz für AlSi10Mg bei einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  dar, da das genannte Qualifizierungsverfahren zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickelt war. In diesem Fall wurde die Breite der Einzelspur direkt aus einer Mikroskop-Aufnahme ohne vorherige metallografische Präparation ermittelt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch einige der aufgenommenen Schliffbilder.

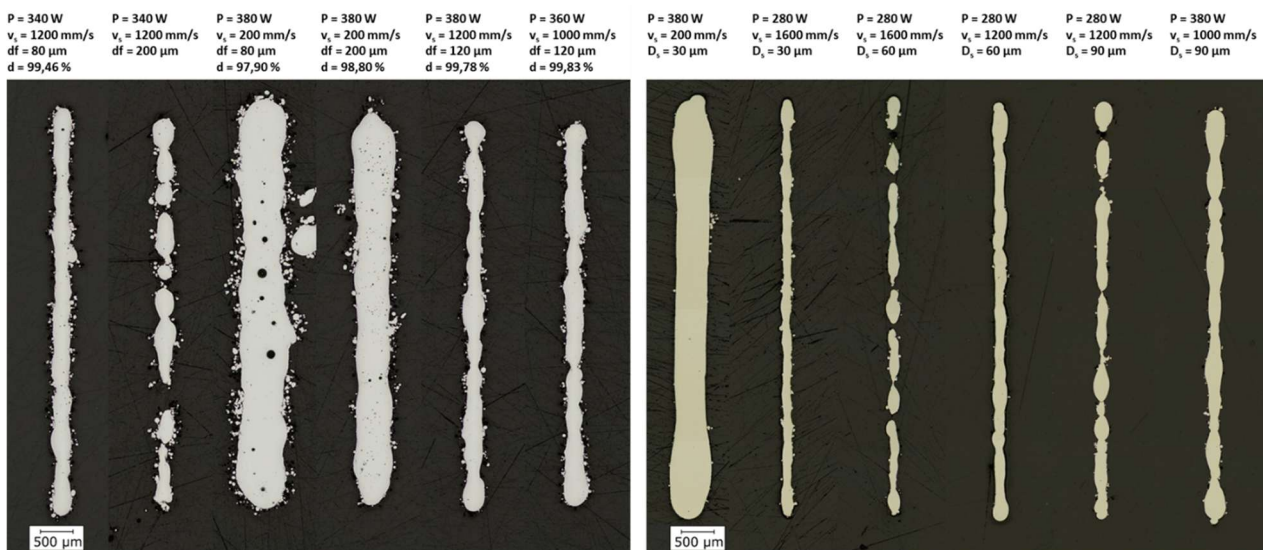


Abbildung 2: Schliffbilder von Einzelspuren gefertigt aus AlSi10Mg mit einer Schichtstärke von 120  $\mu\text{m}$  (rechts) und aus Alloy 718 unter Verwendung eines Fokusbereichs von 80  $\mu\text{m}$

Auf Grundlage der aus den Einzelspuren berechneten Aufbauraten – definiert durch das Produkt aus Spurbreite, Schichtstärke und Scangeschwindigkeit – und unter Berücksichtigung des Anteils stabil verlaufender Spuren wurden anschließend geeignete Parameterkombinationen für den Aufbau von Volumenkörpern ausgewählt. Der hierfür verwendete Hatchabstand wurde proportional zur durchschnittlichen Spurbreite festgelegt und beträgt jeweils 80 %, 70 % oder 60 % dieser Breite. Bei der Fertigung der Volumenkörper wurden zunächst würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von 5 mm gefertigt. Als Belichtungsstrategie wurde eine Flächenbelichtung mit einer Rotation von 90° so gewählt, dass die Vektorlänge stets 5 mm beträgt. Diese Proben wurden metallografisch analysiert und anhand ihrer erreichten relativen Dichte für die nächste Qualifizierungsstufe ausgewählt. Hierbei wurden würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von 10 mm unter Verwendung einer Streifenbelichtung mit 5 mm Streifenbreite und einem Schichtrotationswinkel von 137,51° gefertigt. Der Streifenüberlapp wurde zwischen 0 mm und 0,2 mm variiert. Auch diese Proben wurden metallografisch analysiert. Die Parameter für die weiteren Experimente wurden anhand der Dichte und der

Aufbaurrate ausgewählt. Für Alloy 718 wurde aufgrund des extremen Spratzerfluges auf die Nutzung der Schichtstärke von 90  $\mu\text{m}$  verzichtet. Die endgültig ausgewählten Parametersätze sind in Tabelle 1 aufgeführt.

*Tabelle 1: im Projekt qualifizierte und ausgewählte Parametersätze*

Material	Schichtstärke / $\mu\text{m}$	Laserleistung / W	Scange- schwindigkeit / $\text{mm} \times \text{s}^{-1}$	Hatchabstand / $\mu\text{m}$	Streifenüber- lapp / mm	Fokusburch- messer / $\mu\text{m}$
AlSi10Mg	30	300	1800	112	0,1	80
	60	360	1600	119	0,15	80
	120	380	1200	121	0,1	120
Alloy 718	30	360	1400	74	0,1	80
	60	380	1000	97	0,1	80

Als Eingangsgrößen für die thermomechanische Simulation werden charakteristische Materialdaten verwendet. Um diese zu gewinnen, wurden unter anderem Zugproben nach DIN 50125 Form B mit einem Durchmesser von 5 mm aus AlSi10Mg und Alloy 718 mit den in Tabelle 1 genannten Parametern in unterschiedlichen Orientierungen gefertigt, spanend nachbearbeitet und gemäß DIN EN ISO 6892 geprüft. Es wurde keine Wärmebehandlung durchgeführt, da der as-built-Zustand relevant ist. Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

*Tabelle 2: Mittelwerte der Ergebnisse der Zugprüfung der additiv hergestellten Zugproben*

Material	Schichtstärke / $\mu\text{m}$	Orientierung	Streckgrenze (Rp 0.2 %) / MPa	Zugfestigkeit (Rm) / MPa	Bruchdehnung / %	E-Modul / GPa
Alloy 718	30	Vertikal	593,8	906,4	34,6	129,0
		Horizontal	752,8	1011,0	28,3	166,8
		Diagonal	776,0	1072,4	26,3	212,8
	60	Vertikal	579,6	902,0	36,1	138,2
		Horizontal	711,0	998,7	28,8	173,3
		Diagonal	728,6	1036,6	26,2	192,0
AlSi10Mg	30	Vertikal	206,7	437,4	6,5	67,1
		Horizontal	281,5	461,3	10,1	71,5
		Diagonal	224,7	424,3	6,8	71,8
	60	Vertikal	205,6	433,1	6,8	66,5
		Horizontal	247,2	436,8	9,3	68,5
		Diagonal	229,2	433,0	7,5	70,5
	120	Vertikal	188,5	313,9	3,4	66,6
		Horizontal	230,6	372,9	5,4	66,7
		Diagonal	216,5	338,8	4,1	66,7

In ersten Versuchen konnte festgestellt werden, dass bei der Fertigung von AlSi10Mg kaum geometriebedingte Aufheizeffekte auftreten. Dies ist vermutlich auf die hohe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs zurückzuführen. Aus diesem Grund wurden die thermischen Eigenschaften nur für Alloy 718 (Vollmaterial und Pulver) ermittelt. Die Wärmekapazität wurde mittels DSC, die thermische Dehnung mittels TMA und die Temperaturleitfähigkeit mittels LFA zwischen 20 °C und 1100 °C gemessen. Aus den ermittelten Werten wurden die Ausdehnungskoeffizienten, die temperaturabhängigen Dichten sowie die Wärmeleitfähigkeit



ermittelt. Anzumerken ist, dass die Pulverproben nur bis 700 °C gemessen wurden. Ausgewählte Messwerte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

*Tabelle 3: Messwerte thermischer Kenngrößen des genutzten Alloy 718*

Material	Größe	Temperatur / °C											
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Alloy 718 gefertigt mit $D_s = 60 \mu\text{m}$	Wärmekapazität (Abkühlphase) / $\text{J} \times (\text{g} \times \text{K})^{-1}$	0,42	0,44	0,47	0,49	0,51	0,52	0,57	0,65	0,68	0,66	0,70	0,78
	Temperaturleitfähigkeit / $\text{mm}^2 \times \text{s}^{-1}$	2,74	2,94	3,23	3,53	3,81	4,09	4,34	4,67	4,59	4,66	4,80	4,96
	Wärmeleitfähigkeit / $\text{W} \times (\text{m} \times \text{K})^{-1}$	9,85	10,95	12,15	13,98	16,07	17,81	19,70	22,05	22,44	23,40	25,00	26,86
Alloy 718 - Pulver	Wärmekapazität (Abkühlphase) / $\text{J} \times (\text{g} \times \text{K})^{-1}$	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,49	0,55	0,67	/	/	/	/
	Temperaturleitfähigkeit / $\text{mm}^2 \times \text{s}^{-1}$	0,060	0,051	0,048	0,046	0,047	0,046	0,051	0,060	/	/	/	/
	Wärmeleitfähigkeit / $\text{W} \times (\text{m} \times \text{K})^{-1}$	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,16	/	/	/	/

### 1.3 Arbeitspaket 1.3: Numerisches Materialmodell

Im Arbeitspaket 1.3 wurde ein numerisches Materialmodell aufgebaut, das die Grundlage für die im Projekt vorgesehenen thermischen und mechanischen Simulationen bildet. Damit wurde das in der Projektbeschreibung formulierte Ziel, ein für PBF-LB/M geeignetes, rechenzeiteffizientes Materialmodell bereitzustellen, vollständig erreicht.

Die benötigten temperaturabhängigen Materialkennwerte wurden auf Basis verfügbarer Literaturdaten sowie vorbereiteter experimenteller Messungen zusammengestellt. Für die Abbildung der prozessinduzierten Verzüge wurde ein vereinfachtes, energieaktiviertes Modell verwendet. Dieses Modell verzichtet bewusst auf die detaillierte Berechnung des Schmelzbades und konzentriert sich auf die für den Verzug maßgeblichen Effekte. Dadurch konnte die Rechenzeit gegenüber vollumfänglichen mesoskaligen Simulationen deutlich reduziert werden.

Das Modell unterstützt verschiedene Aktivierungsebenen (z. B. einzelne Inseln, komplette Schichten oder Schichtpakete), die im Projekt als hinsichtlich des globalen Verzugsverhaltens äquivalent bestätigt wurden. Ein projektspezifischer Vernetzer ermöglicht die effiziente Abbildung von Pulver, Bauteil und Bauplatte in einer vereinfachten Domäne. Die zeitliche Reihenfolge der Aktivierungsschritte wird direkt aus den Maschinen-Daten (CLI) übernommen und bildet somit die reale Belichtungsabfolge ab. Zur Beschreibung der verzugsrelevanten Materialantwort wurde ein temperaturabhängiger Dehnungsterm implementiert, der die thermische Ausdehnung und Schrumpfung während des Prozesses angemessen berücksichtigt.

Konvergenz- und Sensitivitätsstudien zeigten, dass vergleichsweise grobe Toleranzen ausreichend sind, um stabile und belastbare Simulationsergebnisse zu erhalten. Damit ist das Modell auch für größere und komplexere Bauteile geeignet. So konnten Geometrien mit rund 750.000 Elementen (Abbildung 3) in weniger als zwei Stunden simuliert werden. Das Modell erfüllt damit vollständig die im Vorhaben formulierten Anforderungen an Rechenzeit, Stabilität und Praxistauglichkeit und bildet eine verlässliche Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete zur Optimierung und Validierung.

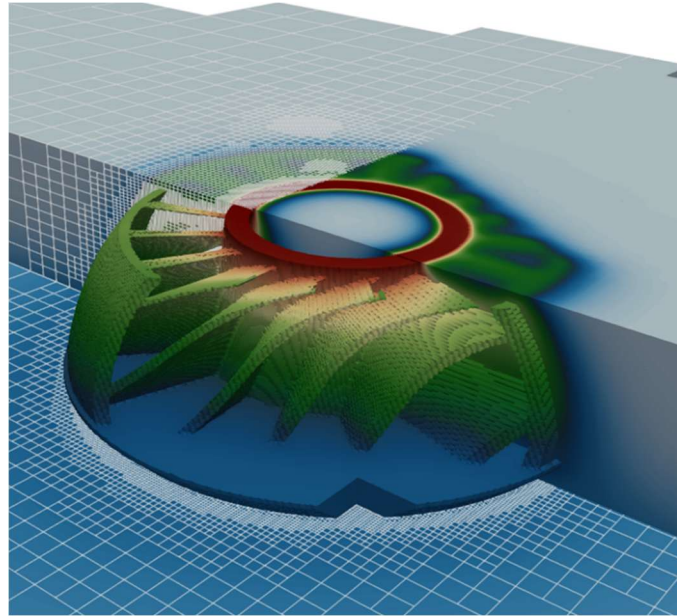


Abbildung 3: Temperatursimulation eines komplexen Bauteils mit dünnwandigen und innenliegenden Strukturen. Die Rechendomäne umfasst 750 000 Elemente; die Rechenzeit beträgt unter zwei Stunden bei Verwendung von Schichtpaketen zu je 60 Schichten.

#### 1.4 Arbeitspaket 1.4: Thermomechanisches Simulationsmodell

Im Arbeitspaket 1.4 wurde ein thermomechanisches Simulationsmodell aufgebaut, das – wie in der Projektbeschreibung vorgesehen – die Vorhersage des Temperaturfeldes und des daraus resultierenden Bauteilverzugs während des PBF-LB/M-Prozesses ermöglicht

Damit ist die im Antrag definierte Grundlage für die späteren Kalibrierungs- und Validierungsschritte geschaffen.

Im Rahmen der Modellentwicklung wurden zunächst verschiedene Wärmequellen und Randbedingungen systematisch untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Gasfluss den stärksten Einfluss auf die globale Bauteilerwärmung hat, während andere Randbedingungen – wie konvektive und radiative Wärmeabfuhr – einen geringeren Beitrag leisten. Ergänzend wurden unterschiedliche Bauraumtemperaturen und Kühlrandbedingungen analysiert, um deren Einfluss auf die thermische Stabilität des Prozesses abzuschätzen.

Zur Überprüfung der Konsistenz zwischen Temperaturfeld und mechanischem Modell wurde untersucht, ob erhöhte Umgebungstemperaturen – wie erwartet – zu reduzierten Verzügen führen (Abbildung 4). Dies bestätigte die korrekte Wirkrichtung der im Modell eingesetzten thermischen inhärenten Dehnungen und stellt einen wichtigen Validierungsschritt für die Eignung des Modells dar.

Für die realitätsnahe Abbildung der Temperaturhistorie wurde das gesamte Build-CLI eingelesen, sodass die tatsächlichen Schichtzeiten und Belichtungsabfolgen des Baujobs berücksichtigt werden. Dadurch konnten zeitliche Effekte wie globale Aufheizung oder veränderte Abkühlraten über die Bauhöhe hinweg konsistent abgebildet werden – ein explizites Ziel des Arbeitspakets gemäß Antrag (Abbildung 5).

Mit Abschluss dieses Arbeitspaketes liegt ein thermomechanisches Simulationsmodell vor, das die im Projekt formulierten Anforderungen an Rechenzeit, Stabilität und Abbildung der relevanten Einflussgrößen erfüllt und die Grundlage für die nachfolgenden Schritte zur Kalibrierung und Validierung bildet.



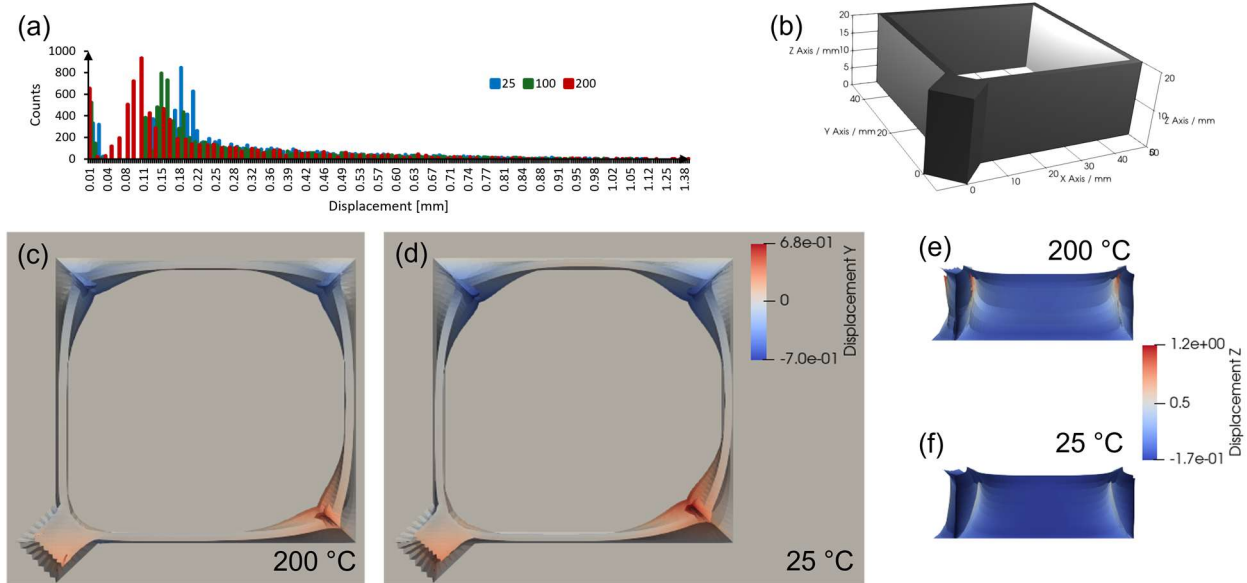


Abbildung 4: Simulation eines Quaders aus Alloy 718 mittels der Methode der inhärenten Dehnungen unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungen. Vergleich der Simulationen für Umgebungstemperaturen von 200 °C (c, e) und 25 °C (d, f); die dargestellten Verzüge sind um den Faktor 10 vergrößert. (a) Histogramm der Verzüge für drei unterschiedliche Umgebungstemperaturen, (b) Referenzquader.

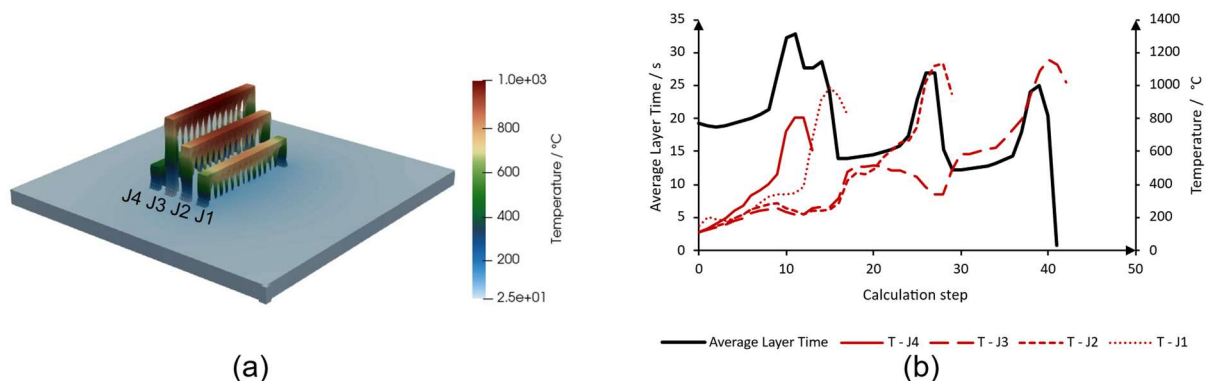


Abbildung 5: Thermische Simulation eines Baujobs durch unabhängige Simulation der Einzelbauteile unter Berücksichtigung der variierenden Schichtzeiten. (a) Temperaturfeld der Cantilever, (b) Verlauf der durchschnittlichen Schichtzeit (schwarz) und der Maximaltemperatur (rot) über den Berechnungsschritten.

## 1.5 Arbeitspaket 2.1: Entwicklung von Datenschnittstellen

Im Arbeitspaket 2.1 wurde ein durchgängiger Datenaustausch zwischen Preprocessing, Simulation und Versuchsanlage aufgebaut. Dazu wurde ein CLI\*-basierter Workflow eingerichtet, der die Daten aus Genesis in die Simulation überführt und anschließend wieder in ein formatkompatibles Interface zur Aconity-MIDI zurückgibt. Dadurch können reale Belichtungsabfolgen und Schichtzeiten vollständig in der Simulation abgebildet werden.

Für die Auswertung experimenteller Messdaten wurde ein standardisierter Pfad über GOM Inspect aufgebaut. Die Daten werden automatisiert exportiert und in ParaView überführt, sodass ein direkter Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten möglich ist. Ergänzend wurde ein Clickbot implementiert, der GOM-Messungen unmittelbar vor jeder Schichtbelichtung auslöst und damit eine konsistente in-situ Erfassung sicherstellt.

Die gewählte Struktur basiert bewusst auf offenen Formaten (CLI<sup>+</sup>, GOM/ASCII-Exports) und ist damit für KMU übertragbar, da keine proprietären oder unternehmensspezifischen Datenformate erforderlich sind. Damit erfüllt das Arbeitspaket die Anforderungen an eine robuste, praxistaugliche und für Dritte adaptierbare Dateninfrastruktur.

## 1.6 Arbeitspaket 2.2: Integration der Mess-Sensorik

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuer laserdichter Anlagendeckel entwickelt (Abbildung 6), der die Integration eines Streifenlichtprojektors (ATOS Core 200), einer Thermografiekamera (Optris PI640) sowie optischer Schutzkomponenten wie Germaniumfenstern und IR-Spiegeln ermöglicht. Oberste Priorität hat dabei die Sicherheit des Personals, das mit der Anlage arbeitet. Weiterhin war die Beschädigung der Messgeräte konstruktiv auszuschließen. Neben der Abschirmung gegenüber Laserstrahlung musste insbesondere verhindert werden, dass Prozessnebenprodukte wie Schmauch in die Gehäuse der Messsysteme eindringen und die innenliegende Elektronik beschädigen oder späteren Betrieb zu sicherheitsrelevanten Problemen führen.

Um die Geräte vor Laserstrahlung und Verunreinigungen zu schützen, wurden sie außerhalb der Baukammer positioniert. Für eine sichere und gleichzeitig messtechnisch hochwertige Integration mussten optische Bauteile gewählt werden, die die jeweilige Messstrahlung möglichst gut transmittieren, während die Laserwellenlänge weitgehend blockiert wird. Der Streifenlichtprojektor arbeitet im Spektralbereich von 400–500 nm, wofür unter anderem Hot-Mirror-Lösungen infrage kommen, die kurze Wellenlängen gut transmittieren und längere Wellenlängen stark reflektieren. Diese optischen Elemente stellen aber keinen ausreichenden Schutz vor der Laserstrahlung dar. Um eine Gewährleistung der Lasersicherheit zu erreichen, wäre die Integration eines zwangsangesteuerten Shutters erforderlich. Alternativ können Laserschutzfenster eingesetzt werden, die zwar eine geringere Transmission der Messstrahlung aufweisen, dafür jedoch eine hohe Schutzstufe bieten. Um Verzögerungen zu vermeiden, wurden während der Lieferzeit des Anlagendeckels beide Varianten entwickelt und realisiert. Auf Basis praktischer Versuche wurde sich für den Einsatz eines Laserschutzfensters entschieden, da dieses die größte Sicherheit darstellt.



Abbildung 6: Umsetzung des neuen Anlagendeckels (a) mit montierten Messgeräten, (b) ohne montierte Messgeräte, (c) eingebautes Germaniumfenster, (d) eingebauter Halter mit Infrarot-Spiegeln

Für die Thermografiekamera, deren Arbeitsbereich zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 14  $\mu\text{m}$  liegt, wurde ein antireflexionsbeschichtetes Germaniumfenster ausgewählt. Da die Transmissionswerte von Germanium bei der Laserwellenlänge von 1070 nm zwar gering sind, aber keine vollständige Bewertung der Lasersicherheit vorlag, wurde die Kamera zusätzlich durch ein Kunststoffgehäuse eingehaust. Auf diese Weise wird zum einen verhindert, dass Störstrahlung aus der Umgebung die Messungen beeinflusst, aber auch, dass es zu einer Gefahr des Bedieners durch austretende – wenn auch schwache – Laserstrahlung kommt. Der gefertigte und montierte Anlagendeckel ist in Abbildung 6 zu sehen.

Vor Abschluss der Konstruktion des Anlagendeckels wurden erste Versuche mit dem Streifenlichtprojektor durchgeführt. Dabei ließen sich Verzüge von Überhangproben erfolgreich in 3D vermessen. Als Referenzebene diente bei diesen Messungen eine durch die Oberflächen der Grundkörper erzeugte Ebene, um Unebenheiten der Bauplattform auszugleichen. Auch Beschädigungen des Beschichters konnten anhand der aufgenommenen Daten bereits detektiert werden. Die Verzugsmessung einer Überhangsprobe ist in Abbildung 7 dargestellt.

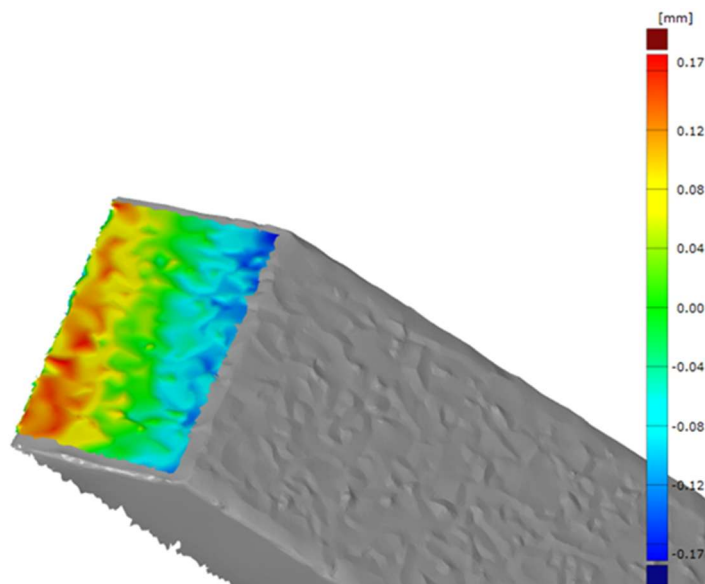
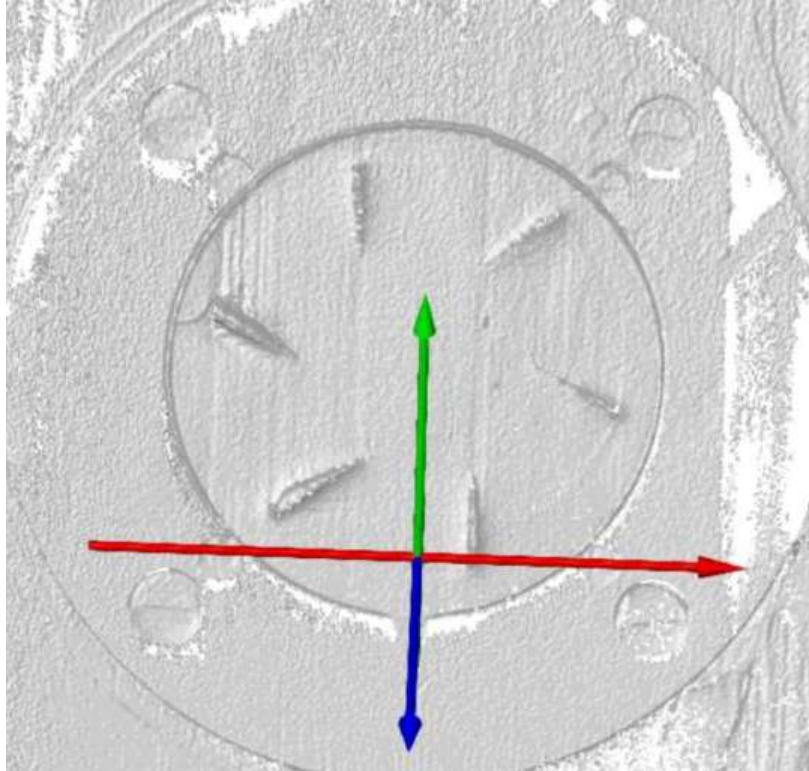


Abbildung 7: kolorierte Darstellung der gemessenen Ebenheitsabweichung an einer Probe

Die anschließende Integration der Messtechnik in die Anlage verlief erfolgreich. Alle Geräte wurden angeschlossen und die Kommunikation über die digitalen 0–24-V-Ausgänge der Maschine sowie über die zusätzliche Schnittstelle der Thermografiekamera und den über einen LabJack U3-HV angesteuerten 3D-Scanner eingerichtet. Die Messabläufe lassen sich mittels skriptbasierter Steuerung flexibel konfigurieren, sodass Thermografieaufnahmen sowohl während als auch vor der Belichtung erfolgen können. Der 3D-Scanner ermöglicht Messungen vor und nach dem Beschichten, erfordert jedoch aufgrund variabler Belichtungszeiten zusätzliche Wartezeiten zur Anpassung an unterschiedliche Oberflächenreflektivitäten. In Abbildung 8 ist das Netz eines 3D-Scans während eines Prozesses zu erkennen. Der Scan erfolgte nach dem Schichtauftrag und zeigt klaren Bauteilverzug sowie Beschädigung des Beschichters. Dies ist an den Riefen im aufgetragenen Pulverbett zu sehen.



*Abbildung 8: Ermittelter Netz aus einem 3D-Scan nach dem Schichtauftrag während des Prozesses. Verzug des Bauteils und riefen im Pulverbett durch Beschichter-Kollision sind zu erkennen.*

Für präzise Temperaturmessungen ist eine materialspezifische Einstellung des Emissionsgrads erforderlich. Da dieser maßgeblich von Oxidationszustand und Oberflächenbeschaffenheit abhängt, muss die Kalibrierung direkt unter realen Prozessbedingungen erfolgen. Hierfür wurde ein spezielles Setup entwickelt (Abbildung 9): Eine Hälfte der Bauplattform wurde beschichtet, die andere mit einem Referenzsticker versehen, dessen Emissionsgrad bekannt ist. Durch gezielte Beheizung von Bauplattform und Proben mittels Induktivheizung kann der Emissionsgrad durch Vergleich mit der bekannten Temperatur des Stickers exakt bestimmt werden. Die hierfür entwickelte Methode ermöglicht künftig eine zuverlässige in-situ-Temperaturmessung während des additiven Fertigungsprozesses.



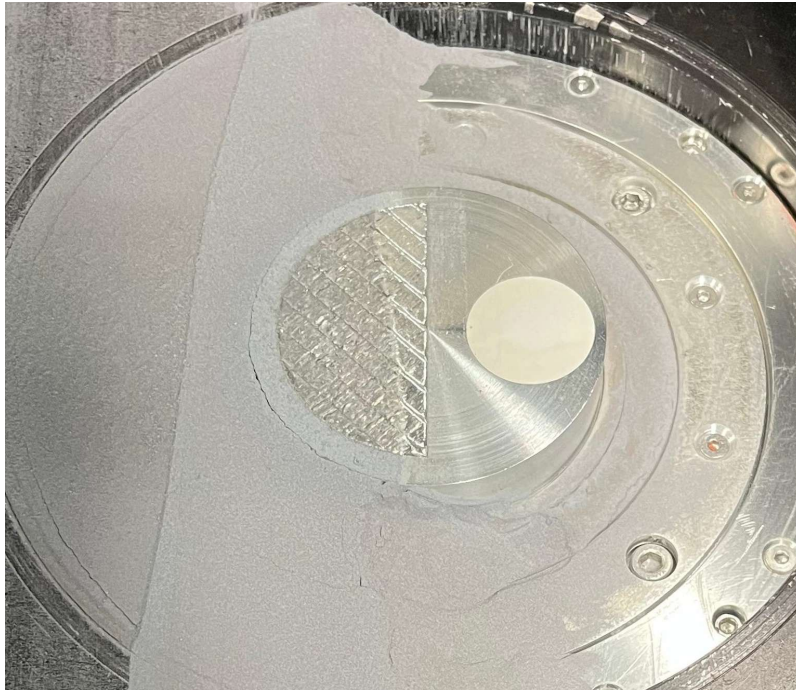


Abbildung 9: Setup zur Ermittlung des Emissionsgrades additiv gefertigter Oberflächen. Links: additiv aufgebaute Oberfläche; rechts: Emissionsgrad Sticker zur Ermittlung der Temperatur des Bauteils. (Ostermann et al. 2025)

Die thermischen Aufnahmen werden ebenfalls schichtweise erstellt. Ein Standbild einer solchen Aufnahme ist in Abbildung 10 dargestellt.

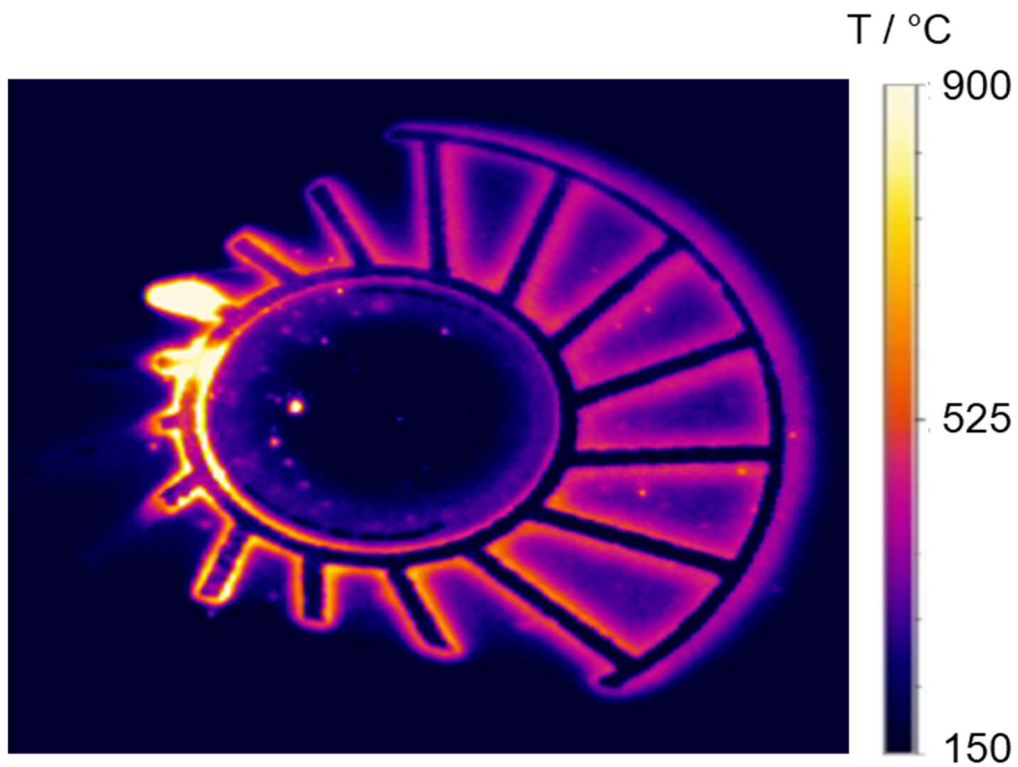


Abbildung 10: Thermografie-Aufnahme während der Belichtung eines Impellers aus Alloy 718

## 1.7 Arbeitspaket 2.3: Kalibrierung der Simulationsergebnisse

Im Arbeitspaket 2.3 wurden die thermischen und mechanischen Simulationsergebnisse systematisch kalibriert und mit experimentellen Daten abgeglichen. Zunächst erfolgte eine qualitative Validierung der thermischen Simulation, bei der typische Temperaturverläufe wie globale Aufheizung und schichtabhängige Abkühlzeiten erfolgreich reproduziert wurden. Die simulierten Trends entsprachen den experimentellen Beobachtungen und bestätigten die grundsätzliche Zuverlässigkeit des Modells.

Für die quantitative Anpassung wurden zwei zentrale Parameter kalibriert:

- (1) eine hatchvektorabhängige Offset-Zeit, um anlagenspezifische Effekte wie Beschleunigung, Entschleunigung und Sky-Writing abzubilden, sowie
- (2) materialabhängige Absorptionskoeffizienten, deren Anpassung die realen Aufheizungsverläufe nachbildet.

Die Einbindung vollständiger CLI-Daten ermöglichte zudem den direkten Abgleich zwischen Simulation und realen Schichtzeiten, sodass Aufheizungseffekte über den gesamten Baujob hinweg validiert werden konnten.

Zur mechanischen Kalibrierung wurden Cantileverproben eingesetzt, mit denen die inhärenten Dehnungen bestimmt wurden (Abbildung 11). Obwohl der notwendige Abtrennprozess mittels Säge bei AlSi10Mg zu potenziellen Beeinflussungen durch mechanische Lasten führen kann, erwiesen sich die erzielten Ergebnisse als hinreichend stabil und reproduzierbar für die im Projekt vorgesehenen Simulationsmethoden.

Damit liegen für die weiteren Arbeitspakete kalibrierte thermische und mechanische Modellparameter vor, die eine verlässliche Vorhersage des Verzugsverhaltens ermöglichen.

Es wurden die für Alloy 718 relevanten thermophysikalischen Materialdaten – thermische Leitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität – temperaturabhängig im Unterauftrag (Fraunhofer IWM, Freiburg) bestimmt. Dazu wurden Proben mit drei unterschiedlichen Parametersätzen gefertigt und untersucht, da Literaturhinweise auf mögliche Abhängigkeiten von Prozessparametern wie der Schichtdicke hindeuteten. Die Messungen zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben; lediglich oberhalb von ca. 500 °C traten leichte Abweichungen in den Aufheiz- und Abkühlzyklen auf, die für die verwendeten thermischen Simulationen ohne Schmelzbadmodellierung nicht relevant sind. Bestätigt wurde zudem die stark reduzierte Temperaturleitfähigkeit des Pulvers (Faktor 50–100 unter Vollmaterial). Trotz fehlender verwertbarer Unterschiede liefern die Daten eine wichtige Grundlage für die Kalibrierung der thermischen Simulation.



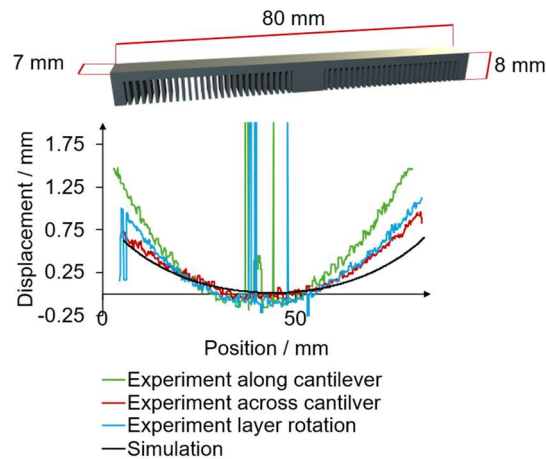


Abbildung 11: Verzug dreier Cantilever-Proben aus AlSi10Mg sowie die Kalibrierergebnisse (schwarz). Die großen Ausschläge in der Mitte entsprechen Referenzmarkern auf der Oberseite der Cantilever und stellen keinen tatsächlichen Verzug dar. (Behrens et al. 2025b)

## 1.8 Arbeitspaket 2.4: Validierung der Simulationsergebnisse

Im Arbeitspaket 2.4 wurden die kalibrierten Simulationsmodelle anhand ausgewählter Referenzgeometrien validiert. Die mechanische Validierung erfolgte durch den Vergleich der vorhergesagten Verzüge mit den gemessenen Verzügen von Einzelüberhangsproben (

Abbildung 12) sowie den Blades des Propellers (Abbildung 13), die jeweils mit Standardparametern gefertigt wurden. Die erzielten Ergebnisse zeigen eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, sodass die Verzugsvorhersagen für die im Projekt betrachteten Geometrien als zuverlässig eingestuft werden können. Ergebnisse veröffentlicht in (Behrens et al. 2025b) und (Behrens et al. 2025a).

Eine thermische Validierung war für AlSi10Mg nicht erforderlich, da sich das Material aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit während des PBF-LB/M-Prozesses kaum aufheizt und somit keine ausgeprägten thermischen Gradienten auftreten. Für Alloy 718 wurde hingegen eine gezielte thermische Validierung durchgeführt. Anhand von Thermografieaufnahmen umgekehrter Pyramidengeometrien konnte das Modell erfolgreich reproduzieren, dass sich diese Strukturen während des Aufbaus stark aufheizen und Temperaturen von über 300 °C erreichen, selbst ohne Bauraumvorheizung.

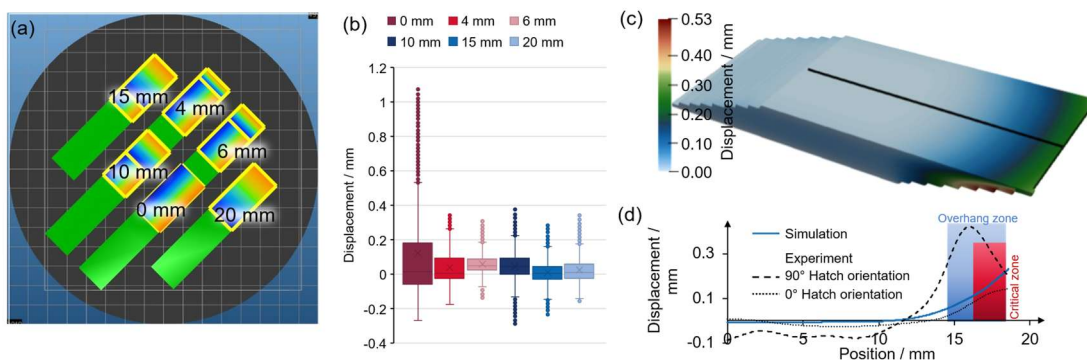


Abbildung 12: Vergleich der Verzüge in der obersten Schicht von 25°-Überhangsproben aus Alloy 718 auf einer Aconity MIDI bei orthogonaler und paralleler Ausrichtung der Belichtungsvektoren. (a) Visualisierung der Vektorausrichtung, (b) gemessene Abweichungen für unterschiedliche Überhangszonenbreiten, (c) Simulation des Überhangsverzugs, (d) Vergleich von simulierten und gemessenen Verzügen. Angepasst Abbildung aus (Behrens et al. 2025a).

Damit konnten sowohl die thermischen als auch die mechanischen Modellkomponenten für die relevanten Materialien und Geometrien validiert werden, sodass die Simulation als belastbare Grundlage für die im Projekt vorgesehenen Optimierungs- und Übertragungsarbeiten dient.

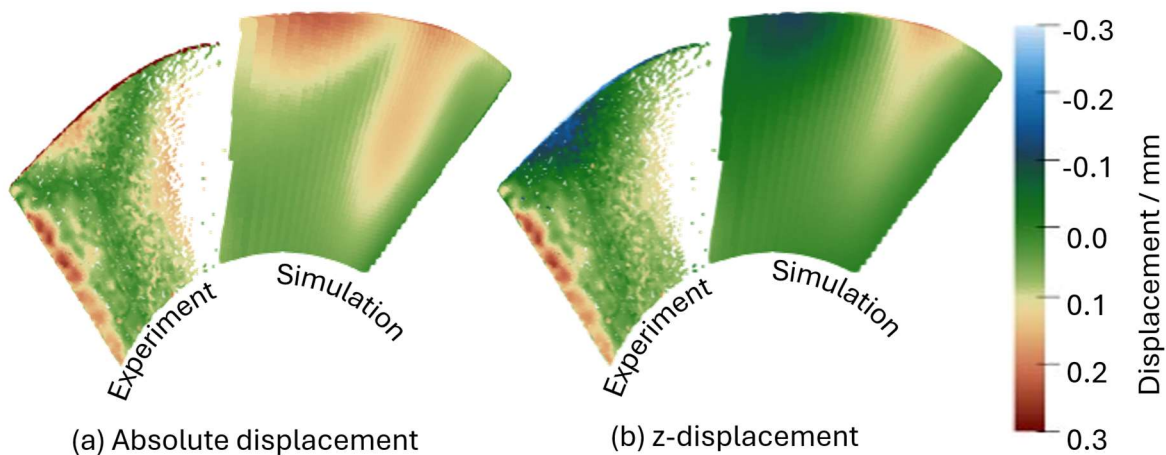


Abbildung 13: Vergleich des experimentell gemessenen und simulierten Verzugs eines mit Streifenhatching und Schichtrotation gefertigten Propellerblatts aus AlSi10Mg. (Behrens et al. 2025b)

### 1.9 Arbeitspaket 3.1: Simulationsbasierte Optimierung der Prozessparameter und Belichtungsstrategien

Im Arbeitspaket 3.1 wurden die im Projekt entwickelten thermischen und mechanischen Simulationsmodelle genutzt, um verzugsrelevante Prozessparameter und Belichtungsstrategien systematisch zu identifizieren und zu optimieren, wie in der Projektbeschreibung vorgesehen. Ein zentrales Ergebnis ist der Nachweis, dass identische Überhangswinkel je nach Bauteilgeometrie zu deutlich unterschiedlichen Verzugsverläufen führen. Besonders anschaulich zeigte sich dies an Hohlkegelstrukturen (Abbildung 14), die je nach Orientierung entweder kritische positive z-Verzüge oder unkritische negative z-Verzüge aufweisen. Durch eine Unterbrechung der Mantelfläche („segmentierter Kegel“) konnten die Verzüge jedoch in beiden Orientierungen deutlich reduziert werden. Dies bestätigt die in der Projektbeschreibung formulierte Annahme, dass geometriespezifische Effekte im PBF-LB/M-Prozess eine wesentliche Rolle spielen.

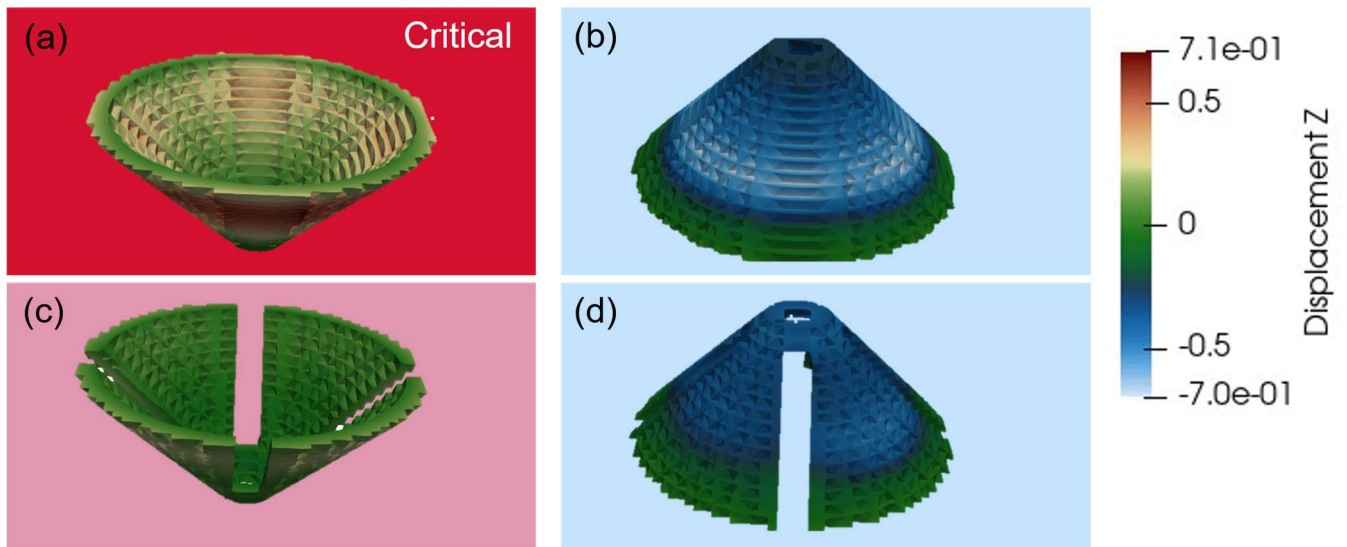


Abbildung 14: Farbliche Darstellung des simulierten Verzugs verschiedener Hohlkegelgeometrien: (a) invertierter Hohlkegel, (b) Hohlkegel, (c) invertierter Hohlkegel mit Schlitzen und (d) Hohlkegel mit Schlitzen.

Weiterhin wurden adaptive Schichtstärken im Bereich von 30 – 120  $\mu\text{m}$  untersucht. Größere Schichtstärken zeigten ein deutliches Potenzial zur Reduktion der Bauzeit (Abbildung 15) und erwiesen sich insbesondere bei 120  $\mu\text{m}$  als robuster gegenüber Beschichter-kollisionen (Abbildung 16). Damit konnte ein wichtiger Beitrag zur in AP 3 formulierten Zielsetzung geleistet werden, prozessseitige Beschleunigungspotenziale ohne zusätzliche Verzugsrisiken zu erschließen. Ergebnisse veröffentlicht in (Ortmann et al. 2024)

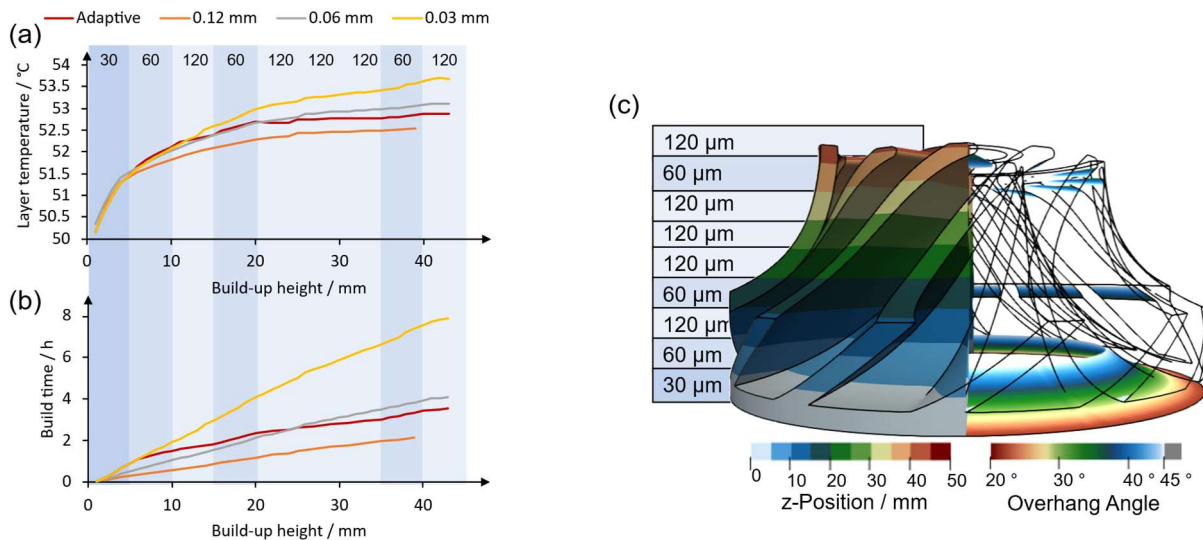


Abbildung 15: Zwischenschichttemperaturen über der Bauteilhöhe (a) und Aufbauzeiten (b) aus der thermischen Simulation eines komplexen Bauteils mit Schichthöhen in Abhängigkeit von den Überhangswinkeln (c). (Ortmann et al. 2024)

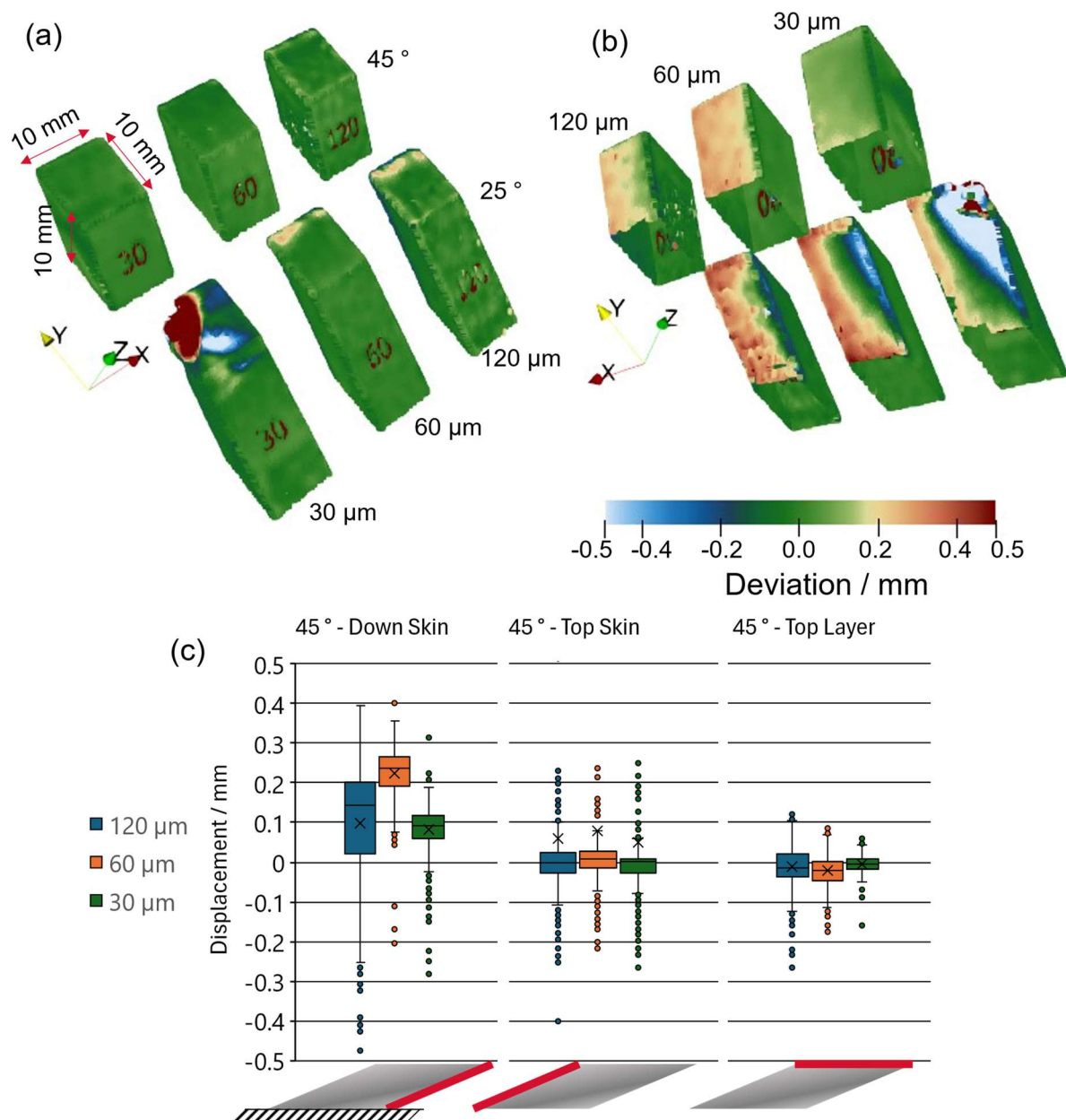


Abbildung 16: „Gemessene Geometrieabweichungen von 25°- und 45°-Überhängen aus AlSi10Mg, gefertigt mit unterschiedlichen Schichtstärken auf einer Aconity MIDI. (a) Farbliche Darstellung der Geometrieabweichungen am Topskin, (b) am Downskin, (c) Boxplots der Geometrieabweichungen für Downskin, Topskin und die oberste Schicht. (Ortmann et al. 2024)

Die Untersuchung verschiedener Belichtungsstrategien ergab, dass alternierende Scanvektoren zwischen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$  zu sehr verzugsarmen Ergebnissen führen (Abbildung 17). Nahezu verzugsfreie Überhänge wurden durch sogenannte Ghost-Vektoren erzielt, bei denen Scanvektoren ohne Laser verlängert werden, um lokale Wärmeakkumulationen zu vermeiden. Es zeigte sich außerdem eine deutliche Maschinenabhängigkeit: Auf der Aconity-MIDI und der TruPrint 1000 traten teils entgegengesetzte Verzugsrichtungen auf, was primär auf Unterschiede in den Scangeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Dies unterstreicht die Relevanz simulationsbasierter Methoden zur maschinenübergreifenden Prozessauslegung.



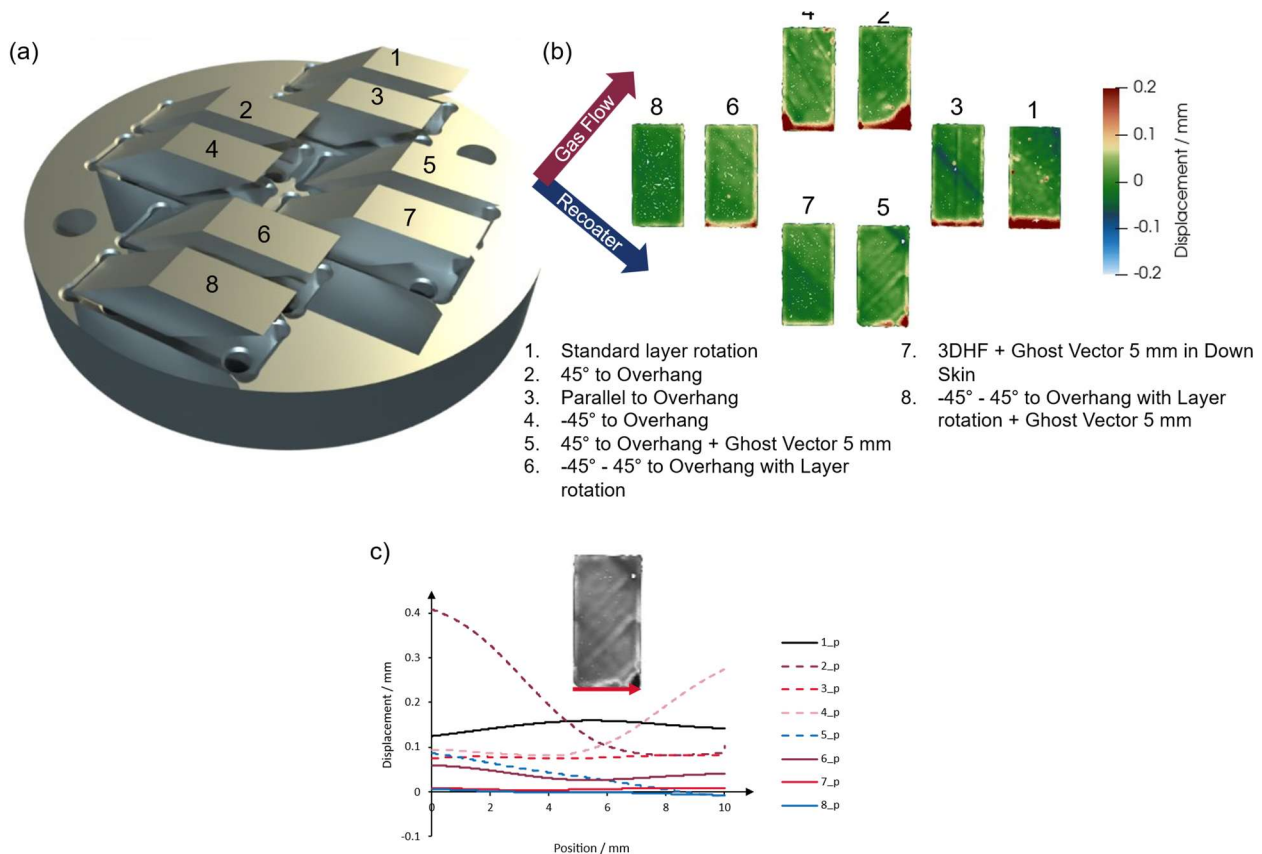


Abbildung 17: „30°-Überhangsproben aus Alloy 718, gefertigt auf einer TruPrint 1000. (a) CAD-Modell des Baujobs, (b) farbliche Darstellung der gemessenen Abweichungen in der obersten Schicht, (c) grafische Darstellung der Abweichung an der Überhangkante. In Teilen veröffentlicht in (Behrens et al. 2025a).

Vorsintern erwies sich als wenig effektiv (Abbildung 18), wohingegen Doppelbelichtungsstrategien – insbesondere bei komplexen Spiralen (AP 3.3, Abbildung 27) – eine signifikante Verzugsreduktion ermöglichten. Ebenso wurde der Einfluss des Gasflusses auf die Scanstrategie bewertet: Eine Ausrichtung der Belichtungsvektoren parallel zum Gasfluss reduzierte den Verzug, führte aber gleichzeitig zu verstärkter Spratzerbildung, was bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden muss.

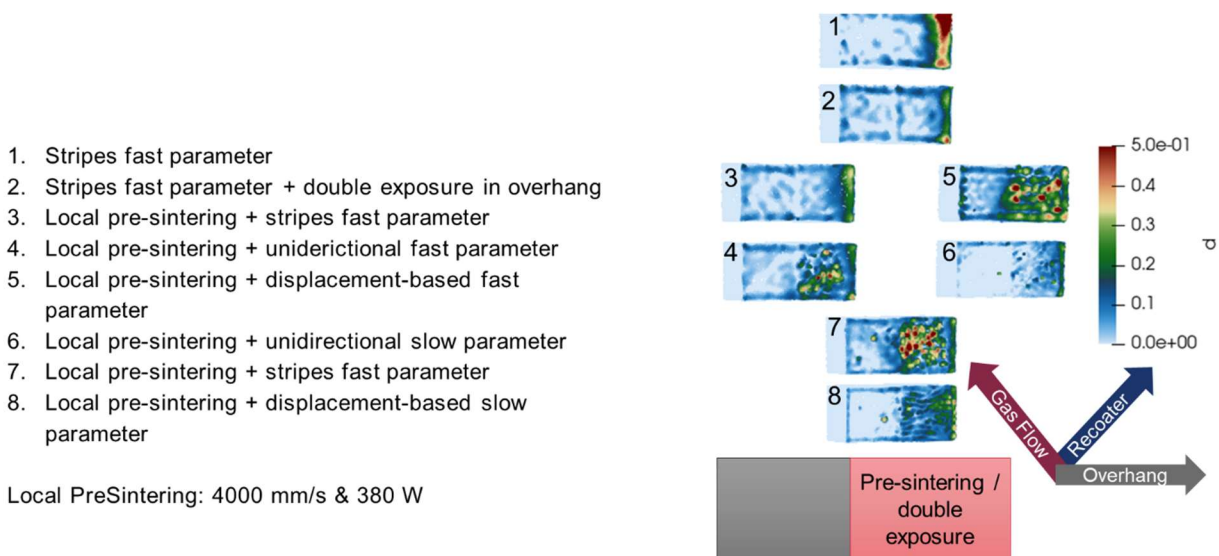


Abbildung 18: 30°-Überhangsproben aus Alloy 718, gefertigt auf einer Aconity MIDI unter Verwendung unterschiedlicher Doppelbelichtungsstrategien.

Die thermischen Simulationen bestätigten die starke Abhängigkeit des Verzugs von der Vektorlänge: Kurze Scanvektoren erzeugten ausgeprägte lokale Überhitzungen, während lange Vektoren eine deutlich gleichmäßigere Temperaturverteilung und geringere Verzüge ermöglichten (Abbildung 19). Die mechanischen Simulationen identifizierten darüber hinaus einen kritischen Bereich von etwa 4 mm bei 25°-Überhängen, in dem thermisch-mechanische Effekte besonders stark ausgeprägt sind. Ergebnisse veröffentlicht in (Behrens et al. 2025a).

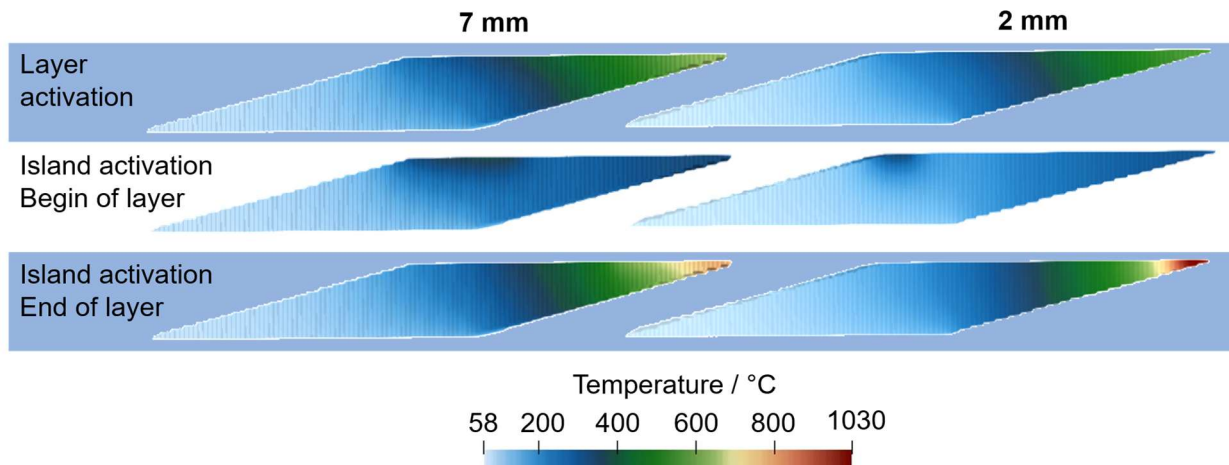


Abbildung 19: Simulation der Temperaturverteilung in einer Überhangsprobe mit Belichtungsvektorlängen von 7 mm (links) und 2 mm (rechts). Oben: schichtweise Aktivierung. Mitte: Aktivierung einzelner Inseln, Temperatur nach der ersten Insel der letzten Schicht. Unten: Aktivierung einzelner Inseln, Temperatur nach der letzten Insel. (Behrens et al. 2025a)

Die Auswertung der Monitoringdaten lieferte wertvolle zusätzliche Erkenntnisse über die thermische Belastung im Bauteil. Hier zeigte sich, dass künstliche Wartezeiten zwischen den Hatches die effektivste Methode zur Vermeidung lokaler Überhitzungen darstellen. Gleichwohl traten bei bestimmten Geometrien erhöhte globale Schichttemperaturen auf, die vermutlich auf veränderte Emissions- oder Absorptionskoeffizienten sowie auf konvektive Effekte der Bauplattformposition zurückzuführen sind. Die Darstellung der gefilterten zeitabhängigen Emissionswerte für kubische Proben zeigt in Abbildung 20 das Verhalten der Emissionen auf den Symmetrieebenen. Die hellsten Pixel markieren dabei die Aktivierung einzelner Pixel, während die Steigung der Linien der Geschwindigkeit der Hatches in Richtung der Symmetrieebenen entspricht. Abbildung 18 zeigt dazu die entsprechende Bauplattform mit den kubischen Proben. Damit bestätigten die Monitoringdaten sowohl die Simulationsergebnisse als auch die in der Projektbeschreibung formulierte Zielsetzung, lokale Prozessanpassungen simulationsgestützt bewerten zu können.



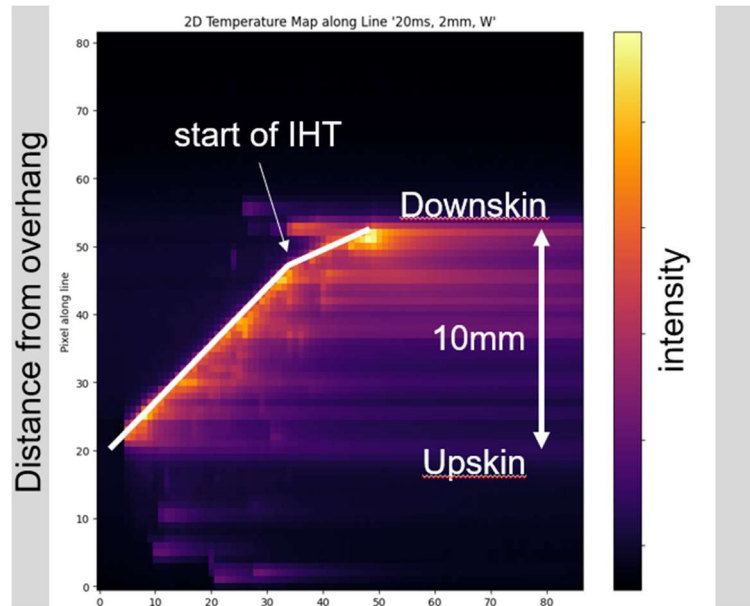


Abbildung 20: Darstellung der zeitabhängigen Emissionswerte auf der Symmetrieebene einer Überhangsprobe mit erkennbarem Start der Interhatch Zeiten

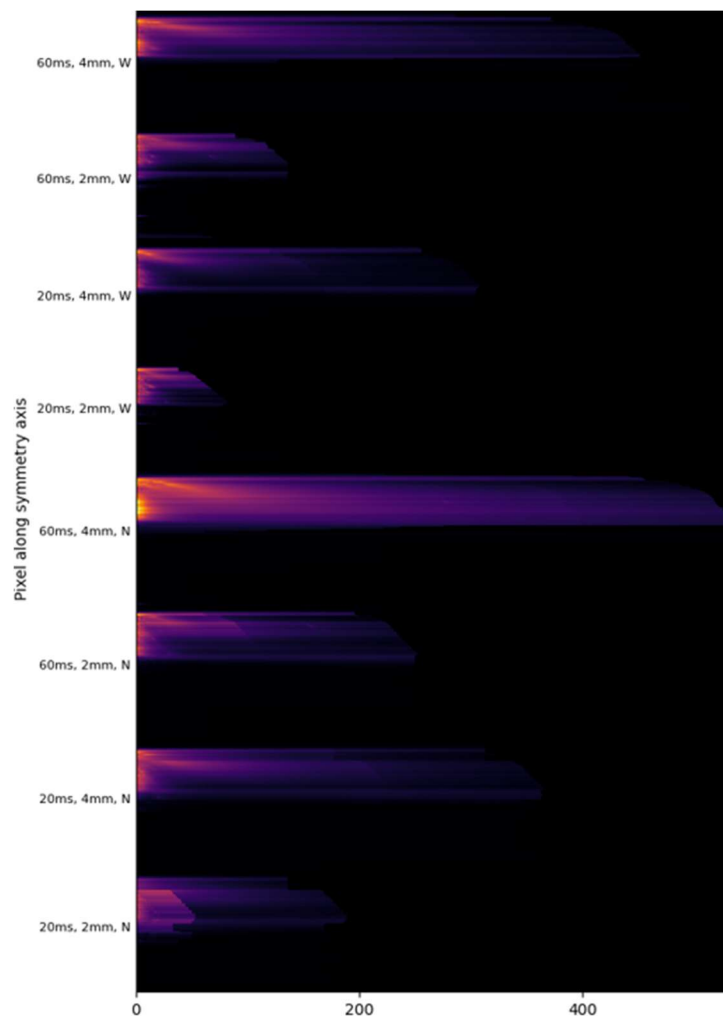


Abbildung 21: Darstellung der zeitabhängigen Emissionswerte auf der Symmetrieebene von Überhangsproben mit unterschiedlichen Interhatch Zeiten. Die Peaks jedes Pixels wurden eingerückt.

In Abbildung 22 sind Bauteile dargestellt, die das Auftreten einer geometriebedingten Überwärmung und Verzugs durch Schrumpfung provozieren. Die Überwärmung konnte im Prozess mittels Thermografie identifiziert werden. Aufgrund der erhöhten Bauteiltemperatur wurde die Laserleistung reduziert. Auf diese Weise konnte nicht nur weiterer Überhitzung entgegengewirkt, sondern auch der Verzug um bis zu 29 % reduziert werden. Ergebnisse sind veröffentlicht in (Ostermann et al. 2025).

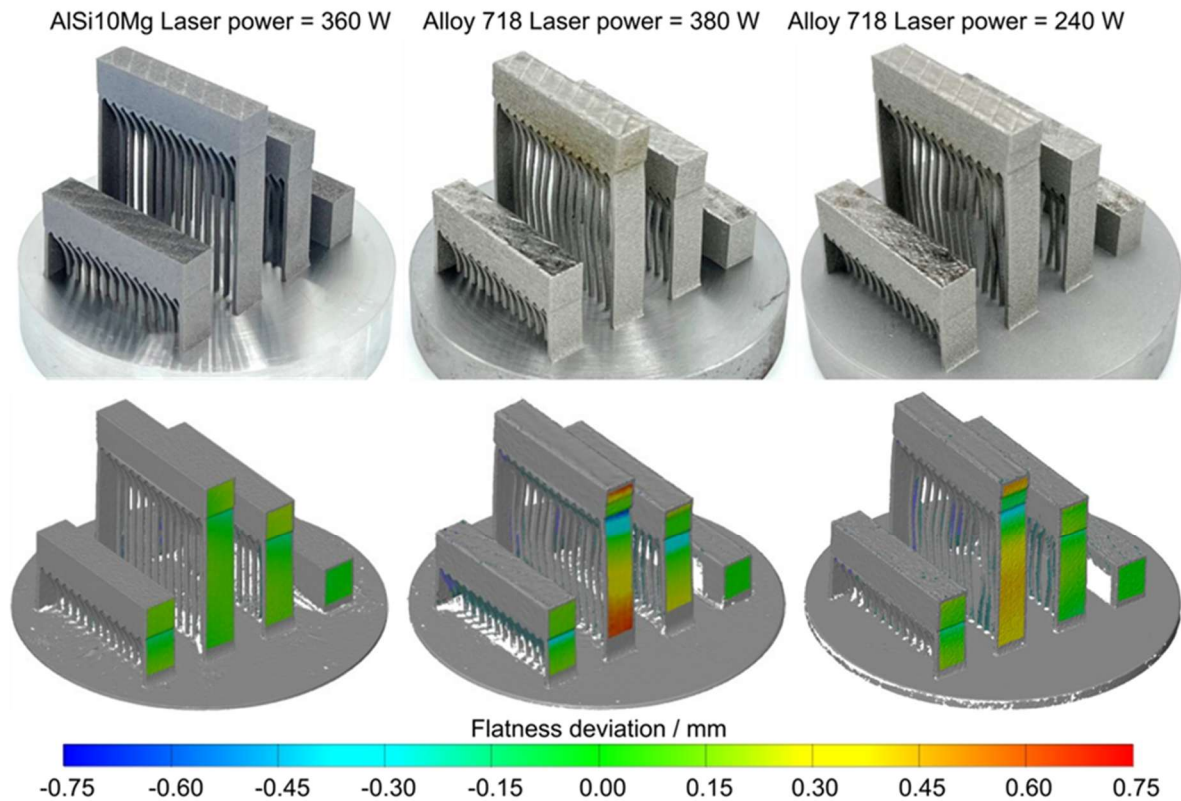


Abbildung 22: Fotos (oben) und 3D-Scan mit gemessener Ebenheitsabweichung (unten) von Proben, welche Aufheizeffekte und Verzug provozieren.

Eine weitere effektive Parameteranpassung war langsamere Prozessparameter, aber mit ähnlicher absoluter Energieeinbringung zu verwenden. Dadurch konnten Überhangsverzüge drastisch reduziert werden unabhängig von der Belichtungsstrategie (Abbildung 23). Ergebnisse veröffentlicht in (Behrens et al. 2025a).

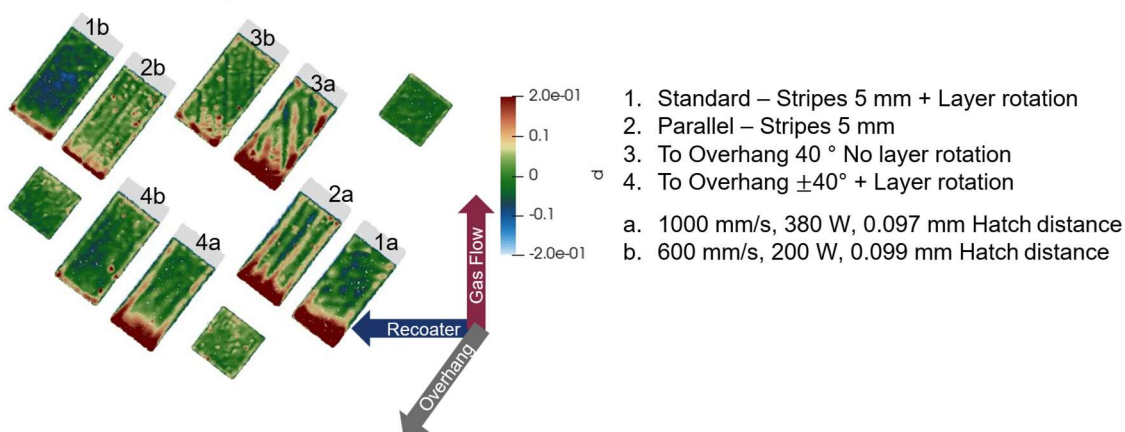


Abbildung 23: „30°-Überhangsproben aus Alloy 718, gefertigt auf einer Aconity MIDI mit unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten. Die farbliche Darstellung zeigt die gemessenen Abweichungen in der obersten Schicht. (Behrens et al. 2025a)

Insgesamt konnte im Rahmen dieses Arbeitspakets nachgewiesen werden, dass simulationsbasierte Optimierungsansätze eine Vorhersage und gezielte Reduktion verzugsrelevanter Prozessphänomene ermöglichen und damit eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Validierungs- und Übertragungsarbeiten darstellen.

### 1.10 Arbeitspaket 3.2: Algorithmus zur automatisierten Auslegung der optimierten Prozessführung

Im Arbeitspaket 3.2 wurde ein Konzept für einen Algorithmus zur automatisierten Auslegung einer optimierten Prozessführung entwickelt. Ziel war es – wie in der Projektbeschreibung vorgesehen –, simulationsbasierte Erkenntnisse direkt in die Prozessparameter der Anlage zu übertragen. Auf Grundlage der thermischen Simulationen wurden zunächst adaptive Schichtwartezeiten berechnet, um lokale Überhitzungen zu reduzieren und kritische Temperaturspitzen zu glätten (Abbildung 24). Da diese Wartezeiten in vielen industriellen PBF-LB/M-Anlagen derzeit nicht direkt umsetzbar sind, wurde dieser Ansatz im Projekt als Konzept ausgearbeitet, jedoch nicht als vollautomatisierbare Steuerfunktion implementiert. Ergebnisse veröffentlicht in (Behrens et al. 2024).

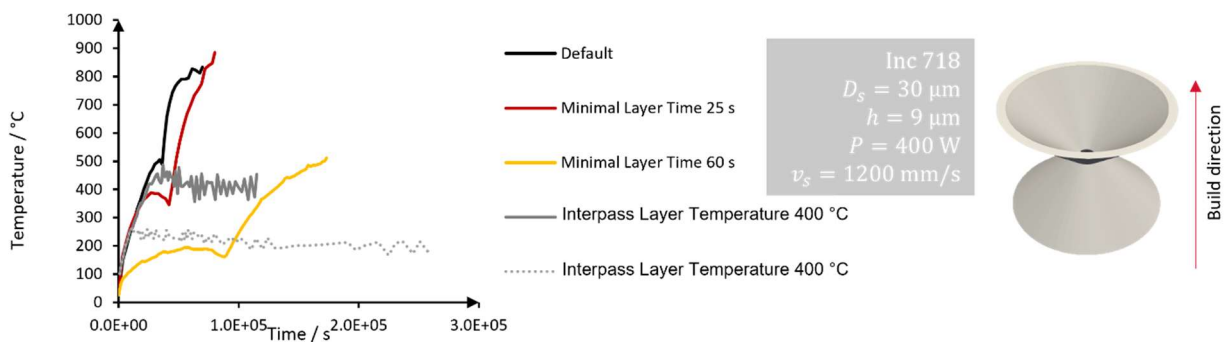


Abbildung 24: Temperatursimulation eines hohlen Doppelkonus unter Verwendung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Abkühlzeiten: ohne Anpassung der Abkühlzeit (Default), minimale Schichtzeiten von 25 s und 60 s (Minimal Layer Time) sowie simulativ bestimmte adaptive Abkühlzeiten zur Stabilisierung der Temperaturen auf 400 °C bzw. 200 °C (Interpass Layer Temperature). (Behrens et al. 2024)

Ein zweiter, praxistauglicherer Ansatz war die verzugsbasierte Orientierung der Belichtungsvektoren. Hierbei wird die Scanrichtung für jede Insel so gewählt, dass sie 90° zum simulierten Verzugsvektor steht (Abbildung 25). Dadurch wird die lokale Steifigkeit gezielt erhöht und die Verzugsausprägung reduziert. Der Algorithmus identifiziert dazu automatisch kritische Inseln, deren simulierte z-Verzüge einen definierten Grenzwert überschreiten. Für diese Bereiche werden anschließend spezifische Anpassungen vorgenommen:

- Einführung zusätzlicher Schichten ohne Pulverauftrag zur lokalen Glättung von Überhangsverzügen,
- Einsatz angepasster Parametersätze mit reduzierter thermischer Last,
- sowie eine klare Parametertrennung zwischen Bulk, kritischen Bereichen und Doppelbelichtung.

## Displacement-based hatching orientation

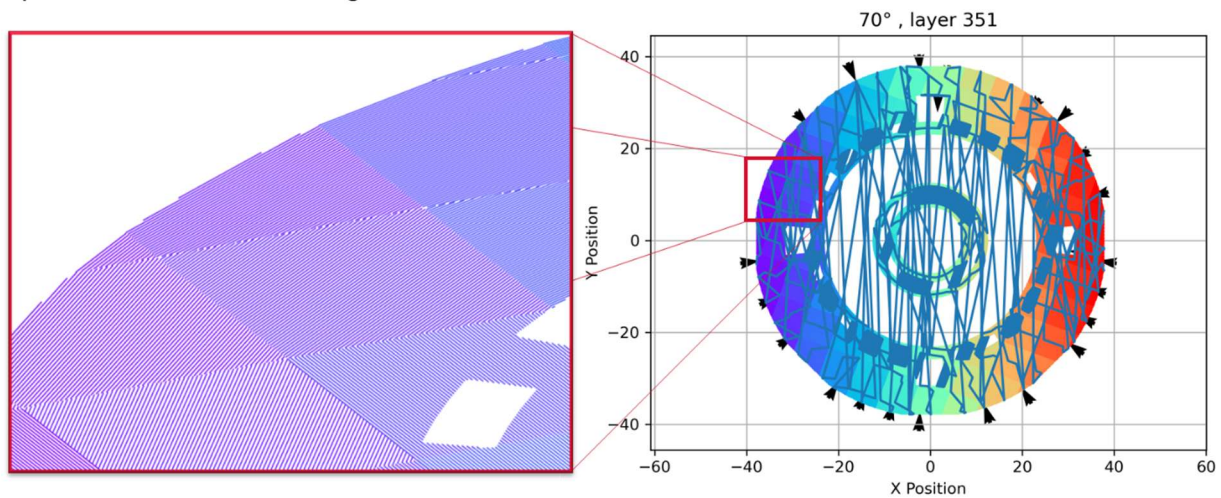


Abbildung 25: Darstellung der Hatchvektoren als Linien; die Farbskala (Rot → Lila) zeigt den zeitlichen Verlauf. Die schwarzen Pfeile markieren die gewichteten Mittelwerte der simulierten Verzugsvektoren je Insel. In kritischen Bereichen wird die Orientierung der Hatchvektoren so angepasst, dass sie senkrecht zum simulierten Bauteilverzug stehen.

Die Wirksamkeit dieses Ansatzes wurde am Propellerdemonstrator überprüft. Der Aufbau bestätigte die simulationsbasierte Prognose: Eine Orientierung der Belichtungsvektoren senkrecht zur Richtung des simulierten, maximalen Verzugs führte zu einer deutlichen Reduktion der Verformungen in den freistehenden Blades. Damit konnte gezeigt werden, dass der algorithmische Ansatz grundsätzlich geeignet ist, simulationsbasiertes Wissen automatisiert in optimierte Prozessstrategien zu überführen. Dafür wurde ein entsprechendes Simulationstool entwickelt (Abbildung 26).

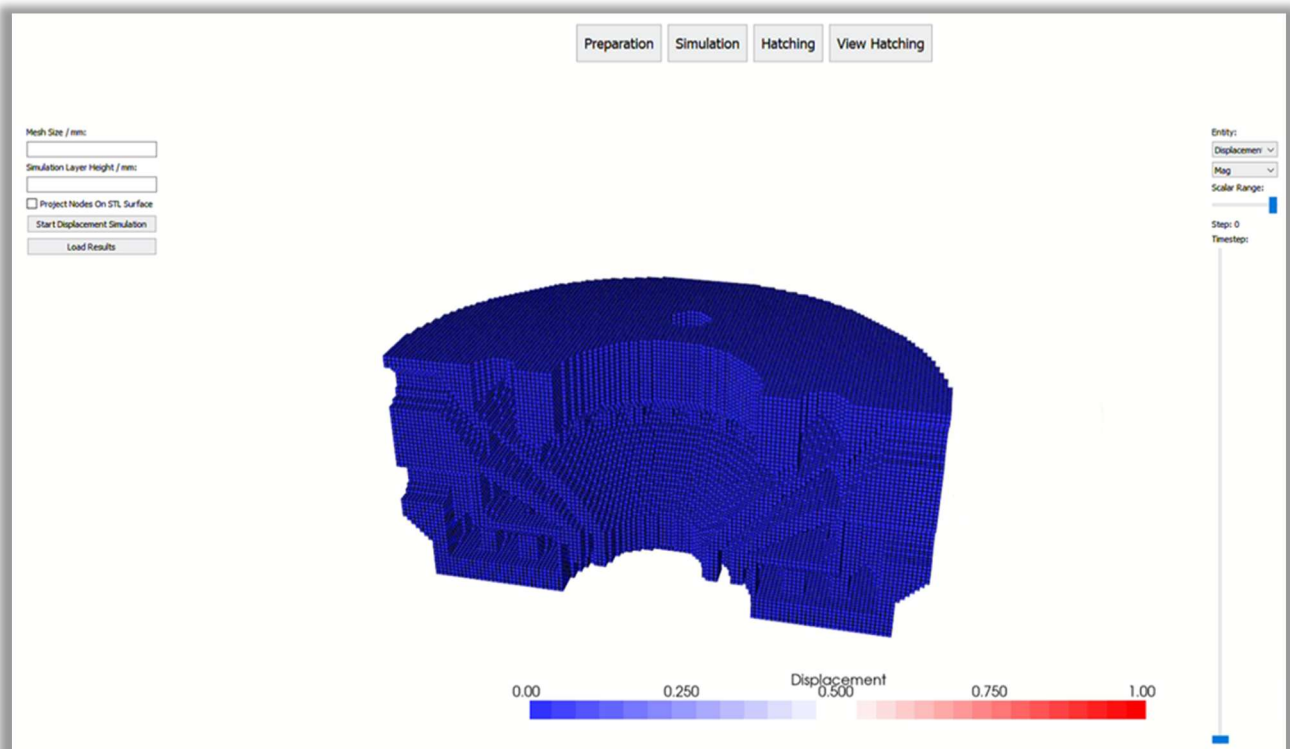


Abbildung 26: Benutzeroberfläche des Softwaretools mit Darstellung des Simulationsfensters sowie des automatisch generierten FEM-Netzes für den Brenner.



### 1.11 Arbeitspaket 3.3: Experimentelle Validierung der Optimierungsstrategien

Im Arbeitspaket 3.3 wurden die im Projekt entwickelten Optimierungsstrategien experimentell überprüft. Dabei bestätigten die Versuche an kritischen Geometrien – wie in der Projektbeschreibung gefordert – die Wirksamkeit simulationsbasierter Belichtungs- und Parameteranpassungen. Insbesondere bei inneren Spiralgeometrien zeigte sich, dass langsamere Parametersätze und Doppelbelichtungen in Kombination mit einer simulationsbasierten Vektorausrichtung den Bauteilverzug deutlich reduzieren konnten (Abbildung 27). Standardparameter führten bei diesen Strukturen hingegen zu einem vorzeitigen Bauabbruch.

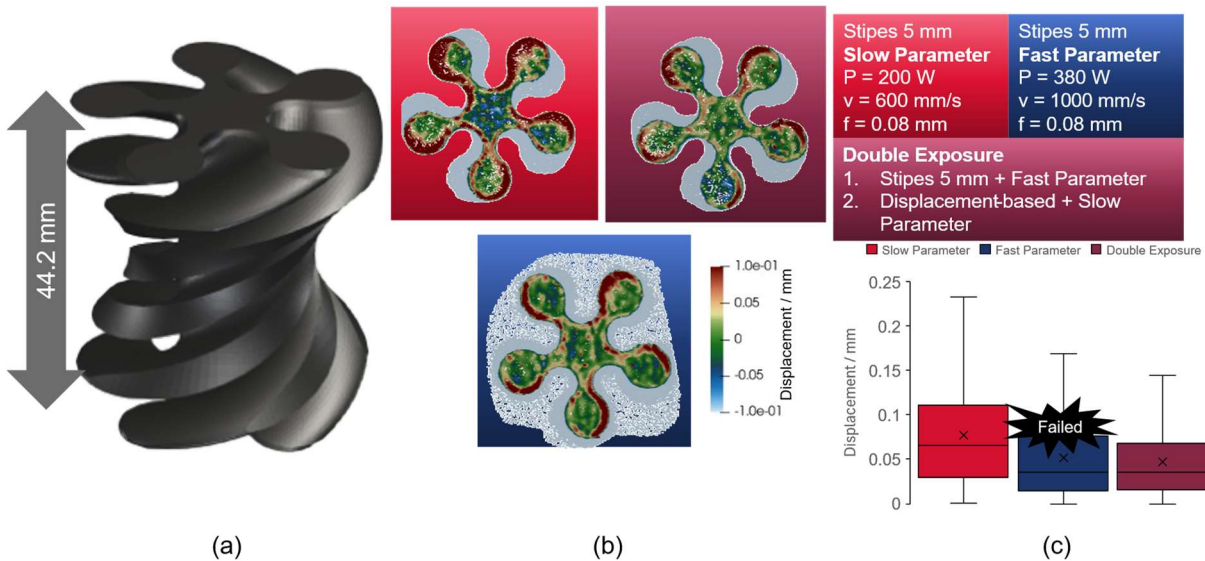


Abbildung 27: „Vergleich der Verzüge in der obersten Schicht einer aus Alloy 718 gefertigten Spirale für drei Parameterstrategien: langsamer Parametersatz (Slow), schneller Parametersatz (Fast) und Doppelbelichtung (Double Exposure). (a) CAD-Modell, (b) Verzugsmessung der obersten Schicht, (c) Boxplots. Die Fertigung mit dem Fast-Parametersatz musste nach ca. 20 mm aufgrund kritischer Verzüge abgebrochen werden.“

Auch am Propellerdemonstrator (Aconity, AlSi10Mg) konnte eine deutliche Verbesserung erzielt werden: Die simulationsbasierte Hatch-Orientierung reduzierte den Verzug der freistehenden Blades gegenüber dem üblichen Stripe-Hatching mit Schichtrotation signifikant (Abbildung 28). Ergebnisse veröffentlicht in (Sehrt et al. 2024) und (Behrens et al. 2025b).

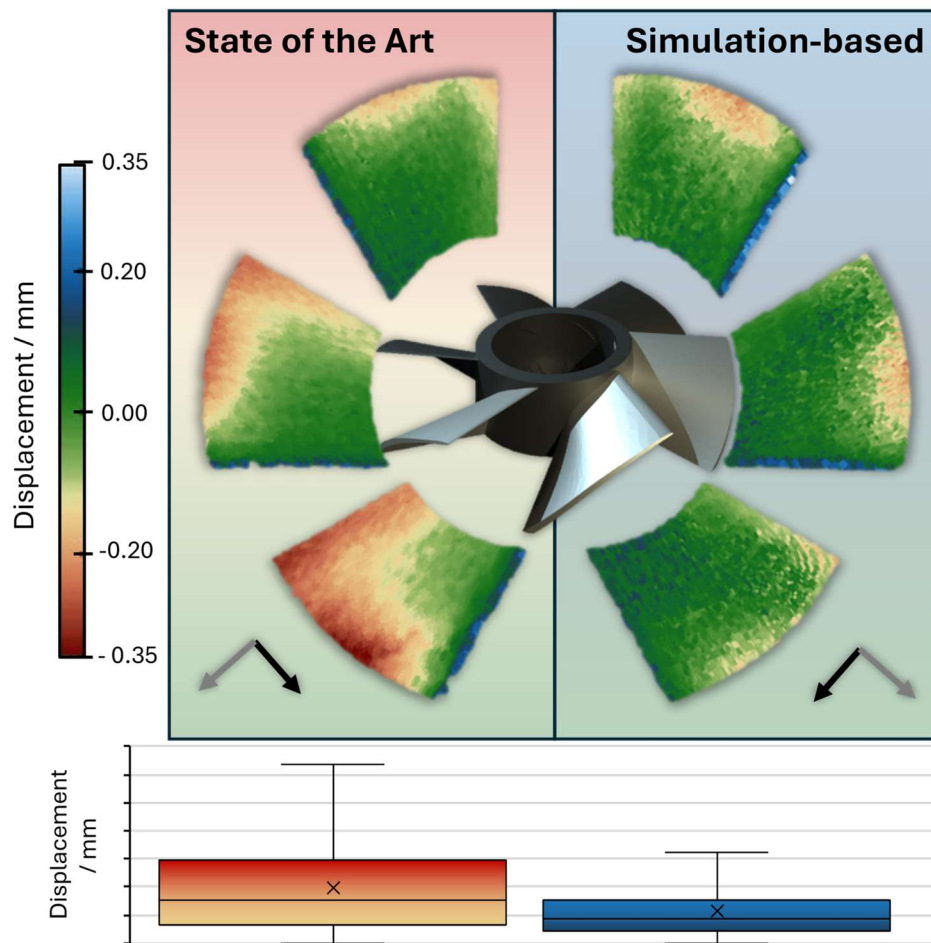


Abbildung 28: Gemessene z-Verschiebung zweier aus AlSi10Mg gefertigter Propeller: (links) hergestellt mit Standard-Streifenhatching und Schichtrotation sowie (rechts) mit verzugsbasierter Belichtungsstrategie. (Sehrt et al. 2024)

Bei dickeren Propellern aus Alloy 718 fiel die experimentelle Bewertung weniger eindeutig aus. Da die Blades abwechselnd im Standard- bzw. simulationsbasierten Hatching gefertigt wurden, überlagerten geometrie-spezifische Verzüge teilweise den Effekt der Belichtungsstrategie. Dadurch war kein signifikanter Nachweis der Strategieeffizienz möglich, die Tendenz zeigt aber geringfügig weniger Verzug durch das simulationsba-sierte Hatching (Abbildung 29).



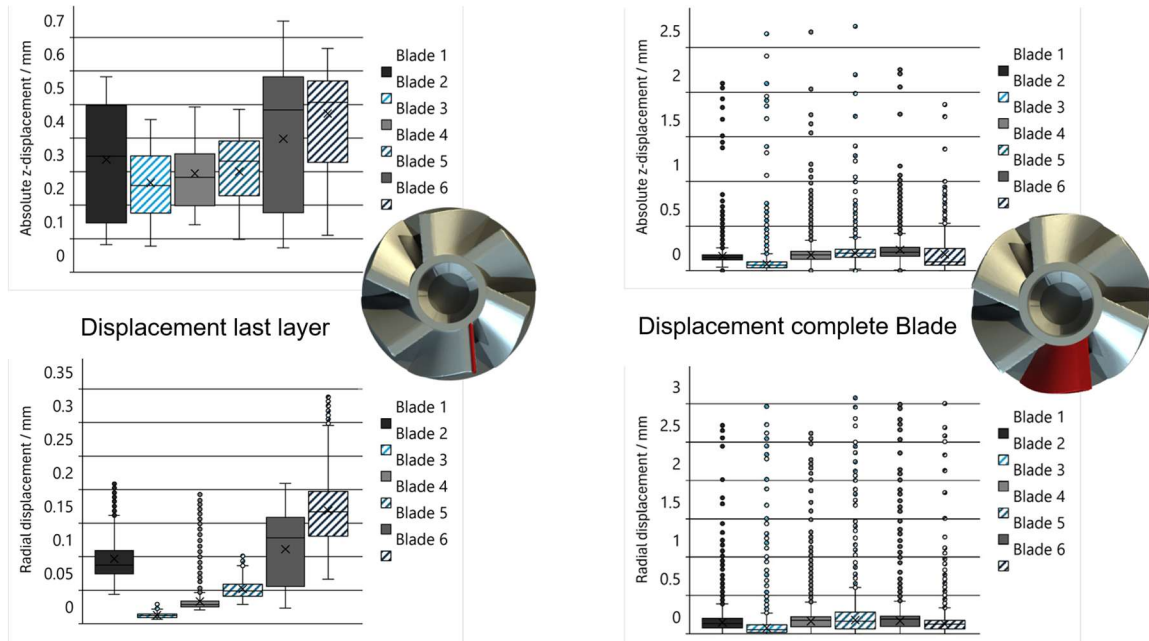


Abbildung 29: Boxplots des Verzugs der Propellerblades. Gestreifte Balken: simulationsbasiertes Hatching; ausgefüllte Balken: Standardparameter. Links: Verzug in der obersten Schicht. Rechts: Verzug des gesamten Blades. Oben: Betrag des Verzugs in z-Richtung. Unten: Verzug zur Propellermitte.

Für die simulationsbasierten Wartezeiten zeigte sich, dass die berechneten Werte deutlich von den üblichen minimalen Schichtzeiten abweichen können (Abbildung 30). Gleichzeitig erreichten die Wartezeiten jedoch bei gleicher Endtemperatur eine deutlich höhere zeitliche Effizienz. Ein weiterer wichtiger Befund betrifft Schichten mit sehr kleinem Flächenanteil: Diese sind thermisch nicht in der Schicht selbst kritisch, sondern erst in nachfolgenden Schichten, da sie dann als „Flaschenhals“ für die Wärmeabfuhr wirken und dadurch Überhitzungen begünstigen. Ergebnisse veröffentlicht in (Behrens et al. 2024).

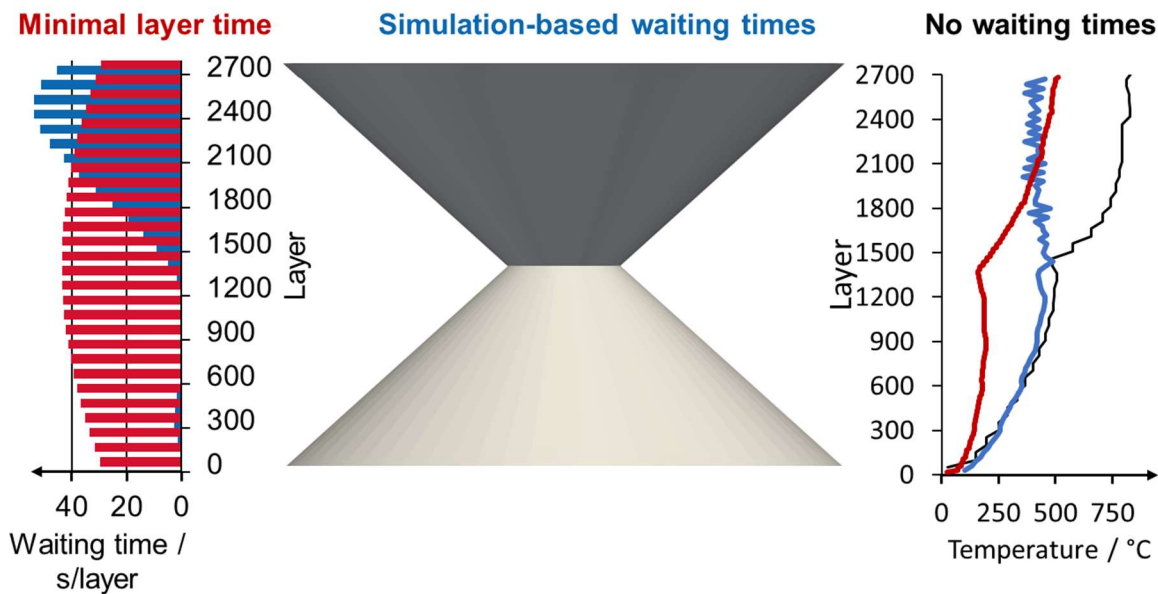


Abbildung 30: Vergleich simulationsbasierter Wartezeiten mit Wartezeiten basierend auf minimalen Schichtzeiten. Links: durchschnittliche Wartezeit pro Schicht. Mitte: Bauteil mit z-Position entsprechend der dargestellten Schichtzahl. Rechts: Temperaturverläufe für minimale Schichtzeit (rot), simulationsbasierte Wartezeit (blau) und ohne Wartezeit (schwarz) für Alloy 718 auf der Aconity MIDI.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets bestätigen somit die grundsätzliche Wirksamkeit simulationsgestützter Prozessanpassungen, liefern aber zugleich wichtige Hinweise zu Geometrieeinflüssen, maschinenabhängigen Effekten und zu den Grenzen vereinfachter Strategien.

### 1.12 Arbeitspaket 3.4: Optimierung von KMU-relevanten Geometrien

Im Arbeitspaket 3.4 wurden die simulationsbasierten Optimierungsansätze auf KMU-relevante Bauteilgeometrien übertragen. Aufgrund des Wegfalls zweier Unternehmenspartner wurde der ursprünglich geplante Geometrieumfang auf eine reduzierte, aber repräsentative Auswahl fokussiert. Die Validierung erfolgte an komplexen Bauteilen, die typischerweise im industriellen Umfeld ohne Stützstrukturen schwer herstellbar sind.

Der Propeller mit äußerst kritischen Überhangswinkeln von bis zu  $10^\circ$  konnte erfolgreich aus Alloy 718 aufgebaut werden (Abbildung 31) – trotz deutlich geringerer Überhangsgrenzen als in der Literatur empfohlen ( $45\text{--}60^\circ$ ). Der erfolgreiche Aufbau war primär auf langsame Prozessparameter und ein simulationsbasiertes Hatching zurückzuführen; jedoch wurde der gesamte Satz auch mit Standard-Hatching reproduzierbar gefertigt. Die Oberflächenqualität war erwartungsgemäß reduziert, da bewusst auf Konturbelichtung verzichtet wurde, um überlagernde Effekte zu vermeiden.



Abbildung 31: „Fotografie des Propellers mit aufgedickten Flügeln und Überhangswinkeln zwischen  $10^\circ$  und  $40^\circ$ , gefertigt aus Alloy 718. Die Bauteile wurden ohne Konturbelichtung hergestellt.“

Ein weiterer zentraler Demonstrator war der Brenner aus Alloy 718, der zunächst vollständig gefertigt und anschließend segmentiert wurde (Abbildung 32). Trotz stark verzugsanfälliger Überhänge und ungünstiger Orientierung zum Beschichter konnte das Bauteil erfolgreich aufgebaut werden – im Gegensatz zu einem parallelen Projekt, in dem der Brenner mit herkömmlicher Prozessführung nicht herstellbar war. Dies verdeutlicht die Bedeutung simulationsbasierter Scanstrategien für herausfordernde Geometrien.

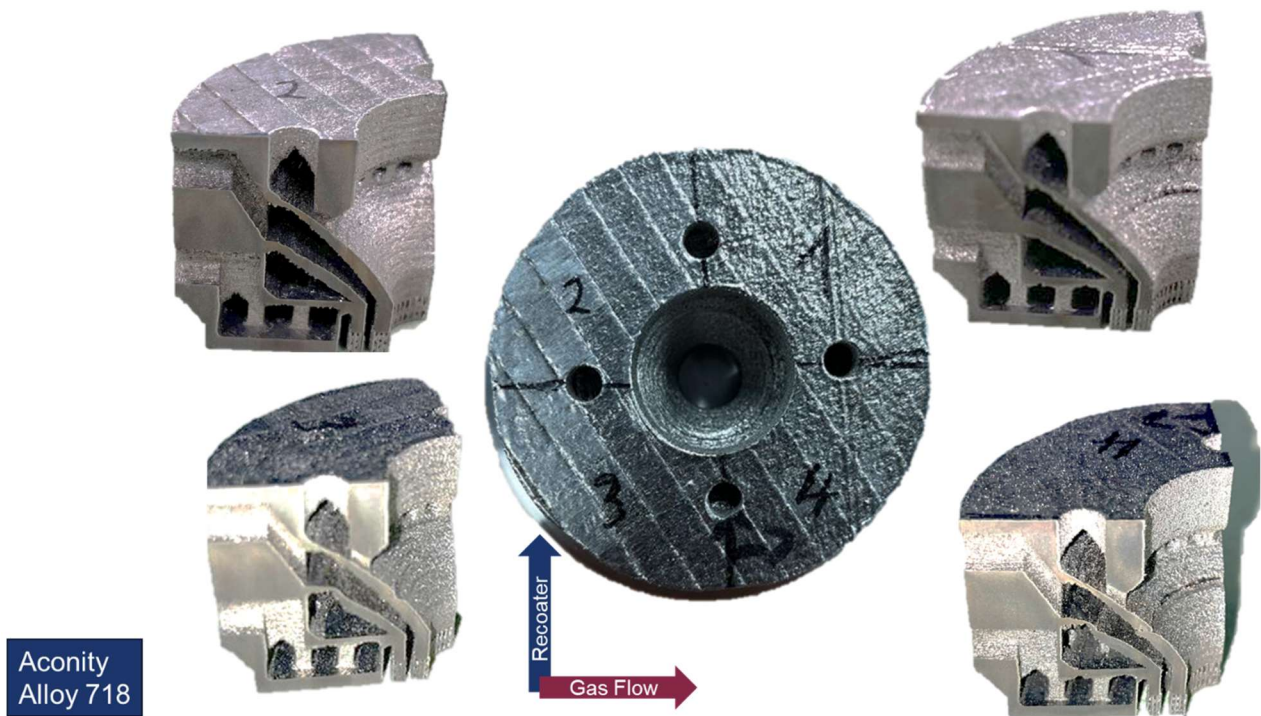


Abbildung 32: Fotografien des vollständig gefertigten Brenners sowie der in Viertelabschnitte getrennten Bauteile. Die Fertigung erfolgte unter Verwendung einer simulationsbasierten Belichtungsstrategie.

Der Blumenstrauß stellte eines der anspruchsvollsten Benchmark-Bauteile dar (Abbildung 33). Neben zahlreichen 10°-Überhängen enthielt er bis zu 7 mm lange Brücken mit 0°-Überhang. Der Aufbau in AlSi10Mg gelang mit simulationsbasiertem Hatching, wenngleich die 10°-Überhänge über längere Bauhöhen keine ausreichende Qualität erreichten. Als realistisch stützfrei herstellbare Grenzgeometrie konnten Überhangwinkel von ca. 20° bestätigt werden, während 10° nur punktuell – wie beim Propeller – zuverlässig umsetzbar sind.

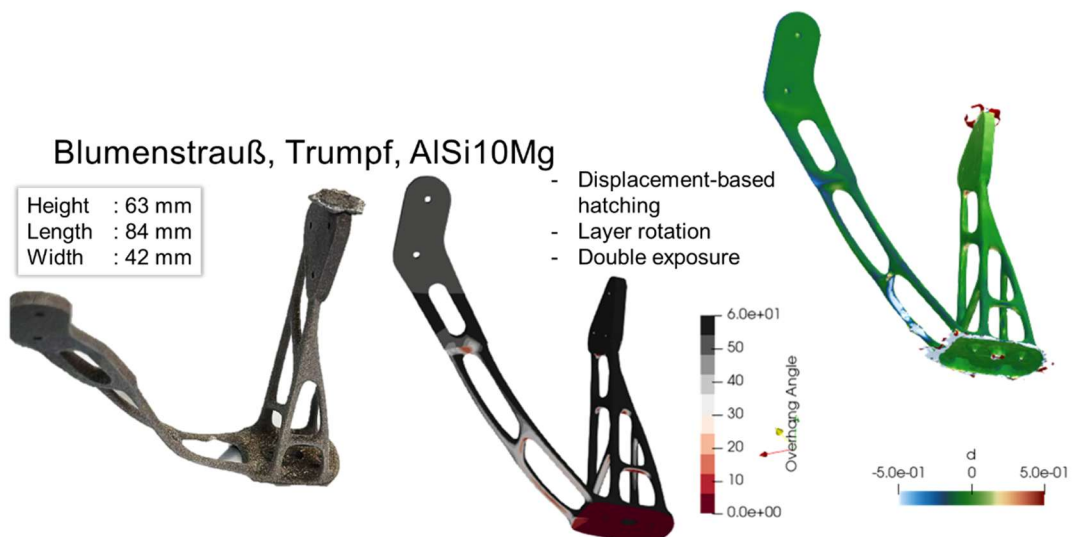


Abbildung 33: Fotografie (links), kritische Überhangsbereiche (Mitte) sowie farblich dargestellte gemessene Bauteilverzüge (rechts) des aus AlSi10Mg gefertigten Blumenstraußes.

Auch das Benchy wurde erfolgreich gefertigt (Abbildung 34). Allerdings zeigten sich Schrumpflinien sowie ein im Vergleich zum Standard-Hatching erhöhter globaler Verzug, was auf einen verstärkten



Schrumpfungseffekt durch Doppelbelichtung hindeutet. Diese Wechselwirkung muss bei der praktischen Anwendung von Doppelbelichtungen berücksichtigt werden.

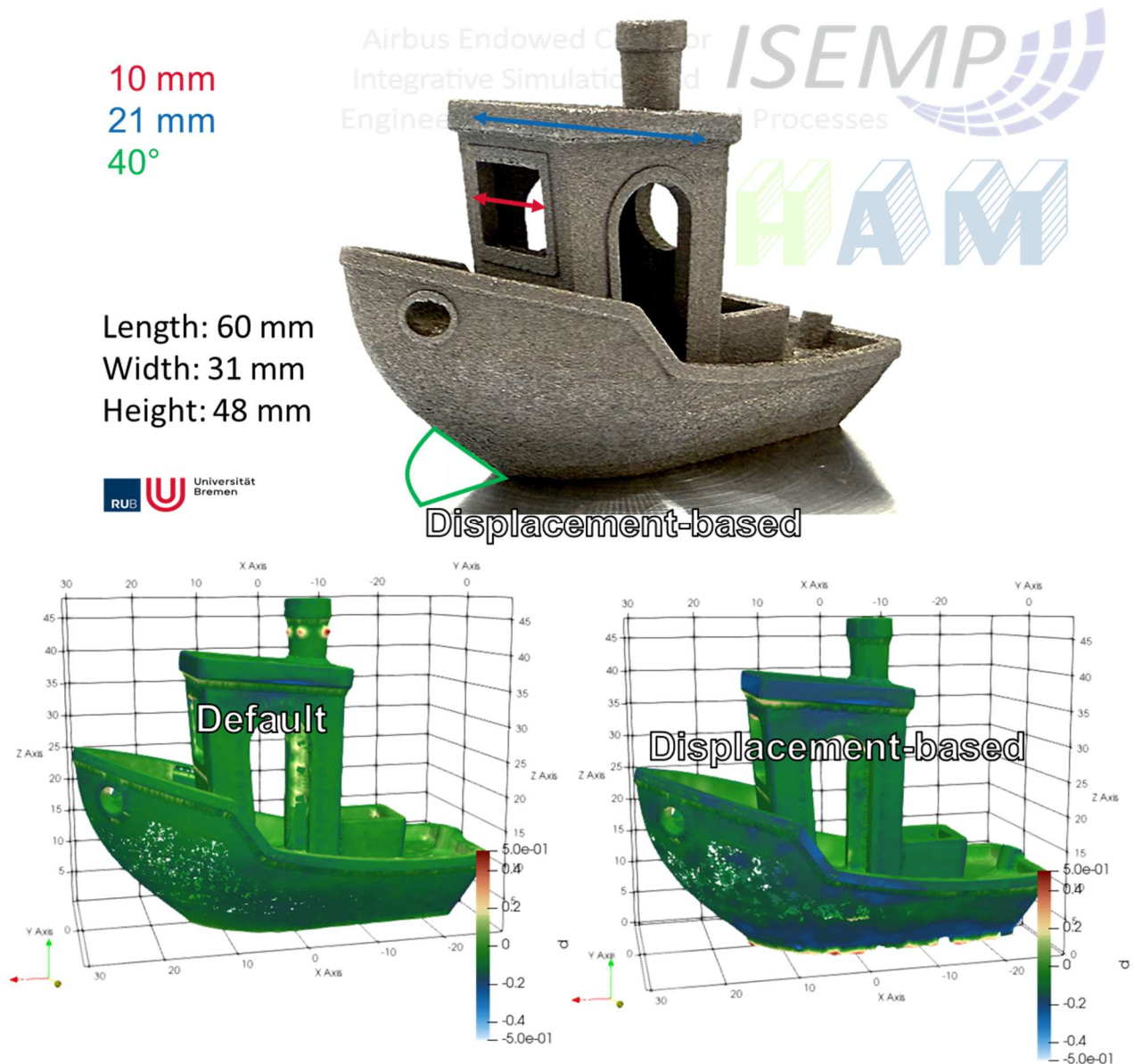


Abbildung 34: Fotografie des aus AlSi10Mg gefertigten 3DBenchy (oben) sowie farbliche Darstellung der gemessenen Verzüge für Bauteile, die mit einer Standardbelichtungsstrategie (unten links) bzw. mit einem simulationsbasierten Hatching (unten rechts) hergestellt wurden.

Zum Abschluss wurde der Brenner in einer aufgeschnittenen, verzugsunkritischen Variante erneut gefertigt (Abbildung 35). Die Belichtungsstrategie wurde hierbei mit einer kommerziellen Software (Genesis) generiert, jedoch auf Grundlage der im Projekt entwickelten Optimierungsansätze. Das resultierende Bauteil war nahezu optisch fehlerfrei. Gleichzeitig zeigte sich, dass kommerzielle Tools bestimmte kleinräumige Optimierungen (z. B. das Vermeiden sehr kurzer Hatchvektoren) automatisch ausführen, während der projektspezifische Hatcher in der Simulationssoftware diese Funktionen bisher nur eingeschränkt unterstützt.



Abbildung 35: Brennerbauteil aus Alloy 718, vorbereitet mit der kommerziellen Pre-Processing-Software Genesis (Amsis GmbH, Deutschland). Das angewendete Hatching entspricht bestmöglichst den im Projekt entwickelten, optimierten Belichtungsstrategien.

Damit demonstriert AP 3.4 erfolgreich die Übertragbarkeit der simulationsbasierten Optimierungsstrategien auf praxisrelevante KMU-Bauteile und verdeutlicht sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die derzeitigen Grenzen der implementierten Methoden.

### 1.13 Arbeitspaket 4: Dokumentation, Ergebnistransfer & Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die gewählte Schichtstärke einen wesentlichen Einfluss auf das Verzugverhalten besitzt. Kleinere Schichtstärken führen grundsätzlich zu geringeren Verzügen, erhöhen jedoch zugleich die Wahrscheinlichkeit von Beschichterkollisionen. Daher empfiehlt sich eine homogene Verteilung der Inter-Hatch-Zeiten, um Wärmeakkumulationen auszugleichen. Unabhängig vom Material erwies es sich zudem als günstig, die Reihenfolge der Belichtungsvektoren stets in Richtung des Überhangs zu orientieren.

Für Alloy 718 steht das thermische Management im Mittelpunkt. Sowohl die lokale Temperaturführung im Überhangbereich als auch die globale Bauteilaufheizung bestimmen maßgeblich die Prozessstabilität. Belichtungsvektoren zwischen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$  zur Überhangkante erwiesen sich als besonders vorteilhaft. Eine Maximierung der Abkühlzeit zwischen den Hatches – etwa durch lange Scanvektoren ( $>10$  mm), den Einsatz von Ghost-Vektoren oder längere Inter-Hatch-Zeiten – verbessert die Temperaturhomogenität deutlich. Auch langsame Prozessparameter und Doppelbelichtungsstrategien zeigten eine ausgleichende, glättende Wirkung auf kritische Überhangzonen.

Für AlSi10Mg stellte sich die Situation anders dar. Hier können lokale Überhitzungen in Überhangbereichen kritisch sein, gleichzeitig führt jedoch eine Verlangsamung des Prozesses nicht zu einer Verbesserung der Bauteilqualität. Im Gegenteil: schnellere Prozessparameter lieferten stabilere und qualitativ bessere Ergebnisse. Die Wirksamkeit simulationsbasierter Hatch-Optimierungen hängt zudem stark vom eingesetzten Prozessfenster ab. So konnten auf der Aconity-Maschine ( $D_s = 60 \mu\text{m}$ ;  $P = 360 \text{ W}$ ;  $v_s = 1600 \text{ mm/s}$ ;  $h = 119 \mu\text{m}$ ) deutliche Verzugsreduktionen erzielt werden, während auf der TruPrint-Anlage ( $D_s = 60 \mu\text{m}$ ;  $P = 150 \text{ W}$ ;  $v_s = 1800 \text{ mm/s}$ ;  $h = 60 \mu\text{m}$ ) lokale Überhitzungen dominierten und die Wirkung der Strategie begrenzten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die optimale Prozessführung material-, maschinen- und geometrieabhängig ist. Die im Projekt entwickelten Leitlinien ermöglichen jedoch eine gezielte Anpassung der Fertigungsparameter, um Überhänge prozesssicherer und verzugsärmer zu fertigen.

- **Neue Forschungstrends in additiven Fertigungsverfahren**, J. T. Sehart, N. Ostermann, R. Ortmann, L. Bürgel, P. Oehlmann, *VDI Wissensforum* (2024), <https://www.vdi-wissensforum.de/news/neue-forschungstrends-in-additiven-fertigungsverfahren/>
- **Adaptive slicing in powder bed fusion of metals using a laser beam—Investigation on productivity, laser absorption, geometrical accuracy, and thermal conditions**, R. Ortmann, N. Ostermann, C. Behrens, T. Grimm, V. Ploshikhin, J. T. Sehart, *Journal of Laser Applications*, Konferenzgebundene Veröffentlichung (ICALEO 2024).
- **Geometriebedingte Erwärmung und ihre Auswirkungen in PBF-LB/M**, Niklas Ostermann, *DGM-Fachausschusssitzung Additive Fertigung* (2024), Vortrag
- **Temperature control by simulated adaptive layer times in powder bed fusion processes**, C. Behrens, N. Ostermann, J. T. Sehart, V. Ploshikhin, *Progress in Additive Manufacturing*, Konferenzgebundene Veröffentlichung (Rapid.Tech 2024).
- **Thermal management through simulation-driven inter-layer times in multi-laser powder bed fusion processes**, C. Behrens, N. Ostermann, J. T. Sehart, V. Ploshikhin, *Additive* 2024, Vortrag
- **Impact of Hatching Strategies on Overhang Displacement in PBF-LB/M**, C. Behrens, N. Ostermann, T. Grimm, J. T. Sehart, V. Ploshikhin, *Progress in Additive Manufacturing*, Konferenzgebundene Veröffentlichung (Rapid.Tech 2025).
- **Experimental investigation and thermographic imaging of geometry-dependent overheating and its effects in PBF-LB/M**, Niklas Ostermann, Luca P. M. Bürgel, Marvin Siewert, Christoph Behrens, Tobias Grimm, Vasily Ploshikhin, Jan T. Sehart, *Progress in Additive Manufacturing*, Konferenzgebundene Veröffentlichung (Rapid.Tech 2025).
- **Reducing distortion using a displacement-controlled hatching strategy in PBF-LB/M**, C. Behrens, N. Ostermann, T. Grimm, J. T. Sehart, V. Ploshikhin, *Progress in Additive Manufacturing*, Konferenzgebundene Veröffentlichung (Rapid.Tech 2026). Eingereicht/Preprint
- **Veröffentlichung geplant zu langsamen Prozessparametern und deren Einfluss auf lokale Überhitzung und Überhangsverzug**, Geplant für ICALEO 2026



## 2 Verwendung der Zuwendung

Tabelle 4: Personaleinsatz HAM

HAM	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	24	Entwicklung des Anlagendeckels, Parameterstudien, Qualifizierungen, Kalibrierungen, Durchführung der Experimente und Datengewinnung
A.2 übriges Fachpersonal	4	Elektrische Integration der Messsysteme, Beratung und Unterstützung bei der Entwicklung des Anlagendeckels
A.3 Hilfskräfte	24	Analytik von Probekörpern, Unterstützung bei der Durchführung von Experimenten

Tabelle 5: Personaleinsatz ISEMP

ISEMP	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	18	Entwicklung Hatchingalgorithmus, Planung und Auswertung von Experimenten zur Identifikation kritischer Parameter, Durchführen von Simulationen, Entwicklung von Simulationsmethoden
A.2 wiss.-techn. Personal	5	Entwicklung und Erforschung ortsangepasster Prozessparameter
A.3 wiss.-techn. Personal	4,5	Entwicklung und Testen der Simulationssoftware, Identifikation kritischer Parameter durch Simulationen, Entwicklung von Algorithmen zur Parameteroptimierung
A.4 Hilfskräfte	13	Auswertung von Messungen. Softwareentwicklung einzelner Funktionen. Software-Testing.
A.5 Hilfskräfte	6	Auswertung von Messungen.

### 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die im Antrag definierten Ziele einer simulationsgestützten Optimierung der Überhangfertigung im PBF-LB/M-Prozess zu erreichen. Die hohe Zahl an Personenstunden sowie die Beteiligung zweier Forschungseinrichtungen waren aufgrund der starken Verzahnung aus Simulation, Prozessentwicklung, Monitoringdatenanalyse und experimenteller Validierung erforderlich. Beide Partner brachten komplementäre Kompetenzen ein: numerische Modellierung und Algorithmik auf der einen, prozess- und messtechnische Expertise einschließlich großflächiger Versuchsserien auf der anderen Seite. Die parallele Bearbeitung war entscheidend, um Modelle, Parameterstudien, Datenschnittstellen und Fertigungsversuche effizient aufeinander abzustimmen.

Die kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate war sachlich begründet. Das Projekt startete aufgrund der verspäteten Bewilligung erst zum 1. April 2023 und damit drei Monate später als geplant. Zusätzlich verzögerte sich AP 2.2 durch Lieferprobleme der Sensortechnik sowie einen Ausfall der Aconity-Anlage, sodass die für AP 2.3/2.4 notwendigen Thermografieaufnahmen erst ab Mai 2024 zur Verfügung standen. Da diese Daten Voraussetzung für die quantitative Kalibrierung der thermischen und mechanischen Simulationen sind, konnten die darauffolgenden Arbeitspakete erst verspätet und schrittweise aufgenommen werden. Ein Vorziehen anderer Arbeitspakete war nicht möglich, da AP 3.1 ausdrücklich auf der validierten Simulation aufbaut. Der angepasste Arbeitsplan wurde zwischen den Partnern abgestimmt und durch die Verlängerung konnte der Projekterfolg gewährleistet werden.

Der vergebene Unterauftrag zur Messung der temperaturabhängigen Materialkennwerte von Alloy 718 war angemessen, da hierfür spezialisierte Geräte und Messmethoden erforderlich sind, die im Projektkonsortium nicht in ausreichender Genauigkeit verfügbar waren. Die Daten bildeten eine wichtige Grundlage für die Kalibrierung der thermischen Simulation und stellten sicher, dass die Modelle physikalisch belastbar parametrisiert wurden.

Insgesamt waren alle Arbeiten in Art und Umfang angemessen, eng an den Projektzielen ausgerichtet und notwendig, um robuste Ergebnisse für KMU bereitzustellen. Die erzielten Demonstratoren und Optimierungsstrategien bestätigen die sachgerechte Verwendung der Mittel und die Relevanz des gewählten methodischen Ansatzes.

### 4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die im Projekt erzielten Ergebnisse ermöglichen eine deutlich zuverlässigere und wirtschaftlichere Fertigung von Überhängen im PBF-LB/M-Prozess und adressieren damit zentrale Herausforderungen von KMU. Durch die entwickelten thermischen und thermomechanischen Simulationen können kritische Überhangbereiche bereits vor der Fertigung vorhergesagt und geeignete Prozessparameter simulationsgestützt abgeleitet werden. Dies reduziert Ausschuss, Nacharbeit und Fertigungsabbrüche deutlich und erhöht die Prozesssicherheit – insbesondere bei anspruchsvollen Werkstoffen wie Alloy 718.

Die untersuchten Belichtungsstrategien, Ghost-Vektoren, Doppelbelichtungen und adaptiven Wartezeiten eröffnen KMU neue Möglichkeiten zur Herstellung stützfreier oder stützreduzierter Geometrien, was Bauteilkosten und Bauzeiten senkt. Die erfolgreiche Fertigung komplexer Demonstratoren wie Propeller, Brenner und Blumenstrauß belegt die industrielle Anwendbarkeit. Die entwickelten Guidelines zu Schichtstärke, Vektorausrichtung und thermischem Management können unmittelbar umgesetzt werden – unabhängig vom Maschinenhersteller.

Der Aufbau offener Datenschnittstellen (CLI\*, GOM-Exports) sowie ein Algorithmus zur Reduktion großer Monitoringdatenmengen erleichtern KMU den Zugang zu simulations- und monitoring-gestützten Prozessoptimierungen ohne proprietäre Software. Der konzeptionell entwickelte Algorithmus zur automatisierten Prozessauslegung bildet zudem eine Grundlage für zukünftige digitale Zwillinge.

Der Wissenstransfer erfolgte über den projektbegleitenden Ausschuss, Industriepartner, Demonstratoren und klar formulierte Handlungsempfehlungen. Insgesamt stärken die Ergebnisse die Wettbewerbsfähigkeit von KMU, indem sie Prozessrobustheit, Vorhersagbarkeit und Bauteilqualität im metallischen Laserstrahlschmelzen nachhaltig verbessern.

## 5 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses (online/hybrid)	Diskussion der Ergebnisse und Informationsaustausch	Sitzung bei Forschungseinrichtungen oder PAMitgliedern	12.6.2023 9:00 Uhr – 12:00 Uhr
			7.12.2023 9:00 Uhr – 12:09 Uhr
			7.6.2024 9:00 Uhr – 12:30 Uhr
			8.1.2025 14:00 Uhr – 17:00 Uhr
			26.6.2025 10:00 Uhr – 12:00 Uhr
Publikationen auf Fachtagungen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen / Poster	Rapid.Tech	14. – 16. Mai 2024 13. – 15. Mai 2025
		Additive 2024	12.-14. Juni 2024
		ICALEO	4. – 7. November 2024
Publikationen in Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch	Progress in Additive Manufacturing	2024, 2025
		Rte Journal	2025
		Journal of Laser Applications	2024
Teilnahme an Sitzungen des Fachausschuss „Additive Fertigung“ der DGM	Vorstellung und Diskussion der gewonnenen Ergebnisse	DGM Fachausschusssitzungen (online)	18.12.2024
Zwischenbericht	Schriftliche Darstellung der Ergebnisse und der weiteren Vorgehensweise	Online	2024
			2025
Richtlinien	Im Rahmen des Zwischenberichts klare Handlungsrichtlinien notiert	Online	2025
Sonstiges	Beitrag im VDI Wissensforum	VDI	2024
	Planung für den Ergebnistransfer mit Prototec GmbH	Online	2024
	Einbindung der Ergebnisse in die Lehre	Bremen	2024
	Darstellung der Ergebnisse auf Institut-Website	Online	2025
Abschlussbericht	Darstellung der Projektergebnisse	Online	2025/2026
Personaltransfer	Erhaltung des Wissens und direkter Wissenstransfer in die Industrie		Nach Abschluss des Projektes

## 6 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Einbindung in die universitäre Lehre	Einbindung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen und die Doktorandenausbildung	Vorlesungen an der Uni Bremen und der Ruhr-Universität Bochum	Fortlaufend
Ergebnistransfer in die Wirtschaft durch Seminare	Weiterbildung und Schulungen von Mitarbeitern kleiner und mittelständischer Unternehmen	Uni Bremen	Auf Anfrage
Fachgespräche mit Unternehmen außerhalb des PA	Information über die Forschungsergebnisse und den Nutzen für KMU, Diskussion der Projektergebnisse	Nach Absprache, evtl. Kontakt über Internetplattform	Fortlaufend
Publikationen auf Fachtagungen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	Rapid.Tech; ICALEO	2026
Publikationen in Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Progress in Additive Manufacturing; Journal of Laser Applications	2026
Einbeziehung von Multiplikatoren	Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Know-how-Transfer, Stärkung Forschungsstandort Deutschland		Fortlaufend



## 7 Literaturverzeichnis

### Literaturverzeichnis

Behrens, Christoph; Ostermann, Niklas; Grimm, Tobias; Sehrt, Jan T.; Ploshikhin, Vasily (2025a): Impact of hatching strategies on overhang displacement in PBF-LB/M. In: *Progress in Additive Manufacturing* 10 (6), S. 3977–3988. DOI: 10.1007/s40964-025-01156-8.

Behrens, Christoph; Ostermann, Niklas; Grimm, Tobias; Sehrt, Jan T.; Ploshikhin, Vasily (2025b): Reducing Distortion Using a Displacement-Based Hatching Strategy in Pbf-Lb/M. In: *Progress in Additive Manufacturing*.

Behrens, Christoph; Ostermann, Niklas; Sehrt, Jan T.; Ploshikhin, Vasily (2024): Temperature control by simulated adaptive layer times in powder bed fusion processes. In: *Progress in Additive Manufacturing* 9 (3), S. 705–713. DOI: 10.1007/s40964-024-00669-y.

Ortmann, Robert; Ostermann, Niklas; Behrens, Christoph; Grimm, Tobias; Ploshikhin, Vasily; Sehrt, Jan T. (2024): Adaptive slicing in powder bed fusion of metals using a laser beam—Investigation on productivity, laser absorption, geometrical accuracy, and thermal conditions. In: *J. Laser Appl.* 36 (4), S. 42056. DOI: 10.2351/7.0001563.

Ostermann, Niklas; Bürgel, Luca P. M.; Siewert, Marvin; Behrens, Christoph; Grimm, Tobias; Ploshikhin, Vasily; Sehrt, Jan T. (2025): Experimental investigation and thermographic imaging of geometry dependent overheating and its effects in PBF-LB/M. In: *R7e*. DOI: 10.58134/fh-aachen-rte\_2025\_004.

Sehrt, Jan T.; Ostermann, Niklas; Ortmann, Robert; Bürgel, Luca; Oehlmann, Paul (2024): Neue Forschungstrends in additiven Fertigungsverfahren. Hg. v. VDI Wissensforum. Online verfügbar unter <https://www.vdi-wissensforum.de/news/neue-forschungstrends-in-additiven-fertigungsverfahren/>.