

Forschungsprojekt AMPHEA

Additive Manufacturing for Plugin Hybrid Electrical Aircraft
Additive Fertigung für elektrische Plugin-Hybrid-Flugzeuge

Fachlicher Projekt-Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Förderkennzeichen: 20Q1955A

Projektlaufzeit: 01.10.2020 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.10.2020 – 29.02.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



DLR

Projektträger
Luftfahrtforschung

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Angaben	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand.....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2	Ergebnisse der Arbeitspakete	9
2.1	Erarbeitung der thermischen und mechanischen Anforderungen (AP 1.1).....	9
2.2	Erstellung eines Designkonzepts (AP 1.2).....	9
2.3	Topologieoptimierung (AP 1.3)	11
2.4	Fertigungsgerechte Gestaltung des topologieoptimierten Designs (AP 1.4)	20
2.5	Herstellung von Funktionsmustern und Probekörpern mittels	
	Additiver Fertigung (AP 2.1)	22
2.6	Herstellung von Funktionsmustern und Probekörpern mittels	
	Additiver Fertigung und Fügen (AP 2.2).....	29
2.7	Strömungsoptimierte Nachbearbeitung der Bauteile (AP 2.3).....	32
2.8	Analyse der Fertigungsverfahren und verschiedenen Materialien (AP 2.4).....	33
2.9	Qualitätssicherung des Fertigungsprozesses (AP 2.5)	40
2.10	Fertigung von Demonstratorbauteilen (AP 3.1).....	46
2.11	Praxisversuche im Testflugzeug (AP 3.2)	49
2.12	Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens (AP 4.1)	50
2.13	Analyse und Bewertung der Umweltfreundlichkeit des Verfahrens (AP 4.2)	53
3	Verwertbarkeit der Ergebnisse	54
3.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Verwertbarkeit.....	54
3.2	Veröffentlichungen, Vorträge, Messen und studentische Arbeiten	54
A	Literaturverzeichnis	i
B	Abkürzungsverzeichnis	v
C	Formelzeichen	vi
D	Erklärung	ix

1 Allgemeine Angaben

Dieses Kapitels gibt einen Überblick über das Vorhaben. Dabei werden insbesondere auf die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen für die Umsetzung, die Planung und den Ablauf, den wissenschaftlichen und technischen Ausgangszustand sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen eingegangen.

1.1 Aufgabenstellung

Die Untersuchung und anwendungsbezogene Demonstration der Potenziale der Additiven Fertigung für die Herstellung komplexer Wärmetauscher-Systeme für Luftfahrtanwendungen war die zentrale Aufgabe dieses Projekts. Als additives Fertigungsverfahren sollte aufgrund der hohen geometrischen Gestaltungsfreiheit das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) genutzt werden. Ziel des Projekts war es, durch innovative Füllstruktur-Geometrien und Oberflächenkonditionierungen ein verbessertes thermisches und aerodynamisches Verhalten an den Grenzflächen innerhalb des Wärmetauschers zu erreichen.

Ein Schwerpunkt lag auf der Vermeidung von konventionellen Formen und Werkzeugen, um sich daraus ergebende Gestaltungsfreiheiten zu nutzen und für anspruchsvolle Anwendungen thermisch optimierte Komponenten zu generieren. Der optimierte Wärmeübergang sollte Verluste reduzieren und Treibstoff im Flugbetrieb einsparen. Durch die verbesserte thermische Auslegung kritischer Bauteile sollte zudem die Betriebssicherheit erhöht werden.

Auf Makroebene sollte die Ressourceneffizienz mittels einer Topologieoptimierung gesteigert werden. Die Einsparung von Rohstoffen wurde als ein zentraler Aspekt für die Zukunftsfähigkeit der Luftfahrtbranche gesehen. Durch eine bionische Auslegung der komplexen und filigranen Strukturen sollte der funktionsintegrierte Leichtbau industriell umsetzbar gemacht werden. Auf Mikroebene erfolgte eine Oberflächenkonditionierung mit dem Ziel der Optimierung des thermischen sowie aerodynamischen Übergangs. Dafür wurden auf Basis von statistischer Versuchsplanung geeignete Fertigungsstrategien sowie Stützstrukturen identifiziert, die in die Bauteilfunktion integriert wurden.

Durch die umfassenden Untersuchungen und Analysen im Rahmen dieses Projekts wurde maßgeblich zur Befähigung des PBF-LB/M-Prozesses für die Luftfahrt beigetragen. Es wurden insbesondere ein verbessertes Systemverständnis und eine effiziente Ressourcennutzung angestrebt.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) beschäftigt sich seit rund 20 Jahren mit additiven Fertigungsverfahren und fokussiert die Befähigung des PBF-LB/M-Prozesses zur Fertigung von maßhaltigen und komplexen Strukturen. Im Rahmen der

Forschungsprojekte SimuSint (BMBF), AeroSim (EU CleanSky) und AscentAM (EU CleanSky II) wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt und in einer Open-Source-Simulationssoftware implementiert, das die simulative Abbildung und Analyse des PBF-LB/M-Prozesses ermöglicht. Eine schwach gekoppelte thermo-mechanische Finite-Elemente-Berechnung prädiziert die makroskopischen Verzüge während des Fertigungsprozesses und wurde an Luftfahrtbauteilen validiert. Im Projekt AMThermoQS (BMW) wurde eine schichtweise In-Prozess-Überwachung auf Basis von Thermographie entwickelt. Das Forschungsprojekt ProSim (DFG) verbesserte das Prozessverständnis durch eine Analyse der Wirkmechanismen. Zudem wurden Erkenntnisse aus dem Projekt ReVeBa (DFG) zur Meta-Modellierung für das Laserstrahlschweißen auf den PBF-LB/M-Prozess übertragen. Aus dem Projekt TOPOS (BFS) bestehen umfangreiche Vorkenntnisse zur Topologieoptimierung, insbesondere für Osteosyntheseplatten zur Unterkieferrekonstruktion. Diese Kompetenzen wurden in den Projekten ASIMOV (BFS) und FOMIPU (BMBF) für medizintechnische Anwendungen weiter ausgebaut. Das *iwb* verfügt über eine erstklassige Ausstattung im Bereich der Additiven Fertigung und eine interdisziplinäre Aufstellung, die sich als Innovationsgarant erwiesen hat.

Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens war die Kooperation mit einem Luftfahrt-Unternehmen zwingend erforderlich, um die fertigungstechnischen Werkzeuge anzuwenden und die experimentellen sowie simulativen Methoden im Luftfahrtbereich zu erproben. Dabei wurden die spezifischen Anforderungen der Luftfahrtindustrie berücksichtigt, um zu gewährleisten, dass die entwickelten Technologien den Standards und Sicherheitsvorschriften dieser Branche entsprachen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit des Forschungsprojekts AMPHEA (Förderkennzeichen: 20Q1955A) betrug 40 Monate, vom 01. November 2020 bis 29. Februar 2024. Die zuwendungsfähigen Kosten für das *iwb* betragen 487.600,00 €. Bei der festgelegten Förderquote von 100,00 % ergab sich eine geplante Fördersumme in Höhe von 487.600,00 €. Der vorliegende Abschlussbericht erstreckt sich über den Zeitraum vom 01. November 2020 bis 29. Februar 2024. In Abbildung 1 sind der Zeitplan für die Projektlaufzeit einschließlich der viermonatigen kostenneutralen Verlängerung und die Meilensteine dargestellt. Ebenso sind die Verantwortlichkeiten der Projektpartner, dem *iwb* und der AdvanTec GmbH (ADV), veranschaulicht.

Das Ziel von Arbeitspaket (AP) 0 „Projekt- und Anforderungsmanagement“ war die Koordination und Kommunikation mit den Projektpartnern sowie die Verfolgung der Arbeitsergebnisse und Zeitvorgaben. ADV übernahm die Organisation und Dokumentation von Arbeitstreffen, Web-Meetings und Status-Meetings. Zudem wurden Review-Meetings vorbereitet und geeignete Lokalitäten dafür ausgewählt.

Das Hauptarbeitspaket 1 „Auslegungsmethode“ zielte darauf ab, eine Methode zur Auslegung von additiv gefertigten Wärmetauscher-Systemen zu entwickeln, die direkt in die Außenhaut eines Flugzeugs integriert werden. Dazu wurden die fertigungsbedingten Restriktionen hinsichtlich minimaler Wandstärke experimentell ermittelt. Die thermischen und mechanischen Anforderungen an das Wärmetauscher-System wurden zunächst erarbeitet und in einem vom *iwb* entwickelten Anforderungskatalog systematisch gesammelt und strukturiert (AP 1.1). Auf dieser Basis wurden erste Designkonzepte erstellt und auf ihre Integrationsfähigkeit überprüft (AP 1.2). Bei der Topologieoptimierung wurden alle technischen und physischen Parameter hinsichtlich der mechanischen und thermischen Beanspruchungen und der zur Verfügung stehenden Bauraumdimensionen überprüft und in dem Designkonzept iterativ berücksichtigt (AP 1.3). Anschließend wurde ein fertigungsgerechtes Konstruktionsmodell des topologie-optimierten Wärmetauscher-Systems abgeleitet (AP 1.4).

In dem Hauptarbeitspaket 2 „Entwicklung der Fertigungsmethoden“ wurden zwei Varianten zur Fertigung des Wärmetauscher-Systems untersucht. Zuerst wurden Funktionsmuster und repräsentative Prüfkörper mittels PBF-LB/M in Integralbauweise gefertigt (AP 2.1). Die zweite Fertigungsvariante verfolgte den Aufbau von Bauteilen mittels PBF-LB/M, die anschließend gefügt wurden (AP 2.2). Ein geeigneter Nachbearbeitungsprozess wurde ermittelt, um eine thermisch sowie fluiddynamisch optimierte Oberfläche für die innenliegenden Kühlkanäle und die Außenhaut des Wärmetauscher-Systems sicherzustellen (AP 2.3). Im weiteren Verlauf wurden die beiden Fertigungsrouten analysiert und verglichen (AP 2.4). Abschließend erfolgte die Qualitätssicherung für den Fertigungsprozess (AP 2.5).

Im Rahmen von Hauptarbeitspaket 3 „Validierung am Demonstrator“ wurden umfangreiche Untersuchungen des Wärmetauschers durchgeführt. Zunächst wurden Demonstratoren gefertigt (AP 3.1). Anschließend erfolgten Experimente, bei denen das Wärmetauscher-System in ein weiterentwickeltes Testflugzeug der ADV eingebaut und getestet werden sollte (AP 3.2).

Das Hauptarbeitspaket 4 „Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit“ verfolgte die Bewertung der Fertigungsrouten nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt (AP 4.1), gefolgt von einer Analyse und Evaluation der Umweltfreundlichkeit (AP 4.2). Das *iwb* unterstützte bei der systematischen Planung und Durchführung dieser Analysen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand

Die Topologieoptimierung erhielt seit ihrer Einführung von BENDSØE & KIKUCHI (1988) Einzug in vielen Bereichen des Maschinenbaus. Nach wie vor stellt die numerische Auslegung von strukturmechanischen Bauteilen das Hauptanwendungsgebiet dar (SIGMUND & MAUTE 2013). Unter den gängigen Optimierungsmethoden weist die Topologieoptimierung die größte Gestaltungsfreiheit auf. Mit klassischen Herstellungsverfahren ist die Fertigung von optimierten Bauteilgeometrien häufig nur schwer und mit sehr hohen Kosten zu realisieren (LIU ET AL. 2018). Bei einer Geometrieangepassung nachträglich zur Topologieoptimierung besteht jedoch die Gefahr einer Verschlechterung der Bauteileigenschaften.

Im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren gibt es bei der Additiven Fertigung nur geringfügige geometrische Einschränkungen durch den Herstellprozess. Die Additive Fertigung ist daher prädestiniert für die Herstellung von topologieoptimierten Bauteilen. Allerdings gibt es auch Einschränkungen, welche bei der Gestaltfindung berücksichtigt werden müssen (LIU ET AL. 2018). Von KLAHN ET AL. 2017 wurden beispielsweise Gestaltungsprinzipien und Richtwerte vorgestellt, die der Konstrukteur beachten sollte. Stützstrukturen stellen eine klassische Herausforderung in der Additiven Fertigung dar. Deshalb beschäftigt sich die aktuelle Forschung damit, die Anzahl der Stützstrukturen zu reduzieren. Andere Einflussfaktoren aus dem Herstellprozess, wie beispielsweise thermisch induzierte Eigenspannungen, werden dagegen nur selten in einer Optimierung mitberücksichtigt. Ein Grund dafür sind die zumeist hohen Berechnungszeiten der Simulationsprogramme (LIU ET AL. 2018). Somit erfordert der Auslegungsprozess mittels Topologieoptimierung nach heutigem Stand der Forschung eine konsekutive, manuelle Überprüfung der Fertigbarkeit und gegebenenfalls eine Anpassung der Geometrie. Dies verändert jedoch die mechanischen und thermischen Eigenschaften des zuvor optimierten Bauteils.

Bei der spezifischen Topologieoptimierung von Wärmetauscher-Systemen gibt es bereits erste Ansätze, eine Einheitszelle als ein repräsentatives Volumenelement zu definieren, welche den Wärmetransport optimiert, während Druckverluste reduziert werden (HANSJOSTEN ET AL. 2018). Hierbei wurden jedoch das gewählte Material und die Fertigbarkeit außer Acht gelassen. GERSTLER & ERNO (2017) untersuchten verschiedene Werkstoffe (Aluminium, Titan Ti64, CoCr und Inconel 718) bei einem vordefinierten Hochtemperatur-Wärmetauscher. Sie erzielten eine Reduzierung der Masse und des Volumens von 66 % bzw. 50 % bei konstantem Wärmetransport und Druckverlust. Bei diesem Wärmetauscher-System wurden jedoch zwei Fluide genutzt und die mechanischen Anforderungen an das System nicht berücksichtigt.

Ein weiteres Designkonzept brachte der Ansatz des Manifold-Mikrokanal-Wärmetauschers hervor. ZHANG ET AL. 2018 erreichten hierbei eine Reduzierung der Masse eines Inconel-718-Wärmetauschers von 25 % im Vergleich zu kommerziell erwerblichen Wärmetauschern. Eine globale Topologieoptimierung wurde hierbei jedoch nicht angewendet.

FEMMER ET AL. (2015) führten experimentelle Untersuchungen an Füllstrukturen bezüglich deren Eignung in einem Wärmetauscher durch. Die Füllstrukturen wurden in einen Wärmetauscher-Versuchsaufbau integriert. Dabei konnte herausgefunden werden, dass sich die Strukturen in ihren strömungsmechanischen Eigenschaften aufgrund der Geometrie deutlich unterscheiden. Eine SchwarzD-Füllstruktur zeigte im Rahmen der Untersuchungen die höchste Wärmeübertragung in Abhängigkeit des Druckverlusts.

Die Arbeit von PENG ET AL. (2019) beschreibt den gesamten Produktentwicklungszyklus eines Wärmetauschers unter Einsatz von additiv gefertigten Füllstrukturen. Dazu wurde zunächst ein Konzept für das Design von Füllstruktur-Wärmetauschern entwickelt. Eine numerische Voruntersuchung ergab, dass mit dem additiv gefertigten Füllstruktur-Wärmetauscher die Wärmeübertragung um den Faktor 7,5 erhöht wurde. Eine experimentelle Bewertung wurde nicht durchgeführt.

Für das Fügen von additiv gefertigten Bauteilen wurden bereits Prozessfenster für die Werkstoffe Stahl (FIEGER ET AL. 2018) und Titan (WITS ET AL. 2015) ermittelt. Eine Forschungslücke besteht im Fügen von komplexen Geometrien mit innenliegenden Strukturen. Auch bei den Auswirkungen der Fügenaht auf anliegende Gefügestrukturen müssen noch ausführliche Untersuchungen durchgeführt werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war die Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern von zentraler Bedeutung für den Erfolg und die Umsetzung der Projektziele. Insbesondere die Kooperation mit der ADV, dem Konsortialführer im Forschungsprojekt AMPHEA, war von entscheidender Rolle. Diese Partnerschaft ermöglichte es, innovative Technologien weiterzuentwickeln und erfolgreich zu implementieren, wobei die ADV sowohl Fachwissen als auch Ressourcen, z. B. einen Prüfstand für experimentelle Untersuchungen, einbrachte.

Zusätzlich war die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern ein weiterer Schlüsselfaktor. Die RENA Technologies GmbH führte die Oberflächennachbearbeitung von additiv gefertigten Probekörpern durch. Dies trug maßgeblich dazu bei, weitere Nachbehandlungstechnologien in Bezug auf die funktionalen Anforderungen der Bauteile zu beurteilen. Die Materialise GmbH führte die Fertigung des ganzheitlichen Wärmetauscher-Demonstrators durch. Hierfür erfolgte ein intensiver Austausch zu den Designrandbedingungen und der Fertigbarkeit des Bauteils.

Die Zusammenarbeit mit diesen externen Partnern war äußerst zufriedenstellend, was sich in der Qualität der Projektergebnisse widerspiegelte. Zusammenfassend trugen diese genannten Partnerschaften wesentlich zum Erfolg des Projekts bei, indem sie die unterschiedlichen Kompetenzen und Ressourcen optimal bündelten und einbrachten.

2 Ergebnisse der Arbeitspakete

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der einzelnen APs mit dem Bezug zur Projektzielerreichung zusammengefasst.

2.1 Erarbeitung der thermischen und mechanischen Anforderungen (AP 1.1)

Das *iwb* unterstützte bei der Erstellung der Anforderungsliste den Projektpartner ADV mit technischen Informationen zu dem additiven Fertigungsprozess. Es wurden insbesondere die technischen Datenblätter der für den PBF-LB/M-Prozess relevanten Werkstoffe zur Verfügung gestellt. Die konventionellen Werkstoffe stellen

- die Aluminiumlegierung AlSi10Mg,
- die Titanlegierung Ti6Al4V,
- die Nickelbasis-Superlegierung Inconel718 und
- der Edelstahl 316L

dar. Aufgrund der Anforderungen an den Wärmetauscher waren der Elastizitätsmodul, die Dichte und die thermischen Werkstoffparameter für die weiteren Untersuchungen relevant. Diese sind in Tabelle 1 gelistet. Die Werkstoffkennwerte wurden jeweils für den Bauteilzustand ohne Wärmebehandlung bestimmt. Aufgrund des anisotropen Werkstoffverhaltens nach der Fertigung wurde für eine konservative Annahme der niedrigere Werkstoffkennwert in die jeweilige Koordinatenrichtung verwendet.

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte der für das PBF-LB/M relevanten Werkstoffe

Werkstoff	Elastizitätsmodul E in N/mm ²	Dichte δ in g/mm ³	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mm·K)
AlSi10Mg	70.000	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$103 \cdot 10^{-3}$
Ti6Al4V	110.000	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
IN718	160.000	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$
316L	185.000	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$

2.2 Erstellung eines Designkonzepts (AP 1.2)

Im Rahmen dieses APs wurde durch das *iwb* die Aufbaurichtung für das initiale Designkonzept definiert. Dies erfolgte unter Berücksichtigung des Designraums und der Bauraumgröße der industriellen PBF-LB/M-Maschine EOS M400-1. Diese PBF-LB/M-Maschine besitzt einen maximalen Bauraum von $400 \times 400 \times 400$ mm³.

Der Wärmetauscher wies laut der vorliegenden Einbausituation eine Gesamtlänge von 888 mm auf, wobei dieser in zwei Funktionssegmente mit einer Länge von 550 mm und 338 mm aufgeteilt wurde. Aufgrund des Überschreitens der Bauraumhöhe des ersten Funktionssegments (Länge von 550 mm) musste dieses Funktionssegment erneut aufgeteilt werden. Unter Berücksichtigung der Maschinenrestriktionen ergaben sich folglich drei Wärmetauscher-Segmente mit einer Grundlänge von 275 mm (Funktionssegment 1), 275 mm (Funktionssegment 2) und 340 mm (Funktionssegment 3).

In den Abmessungen waren etwaige Anbauteile, die aus der Detaillierung des Designkonzepts resultieren, nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund ist für eine Anpassung des Designs eine erneute Prüfung der Fertigungssituation durchzuführen. Der Wärmetauscher besitzt eine maximale Breite von etwa 330 mm. In Abbildung 2 ist die Fertigungssituation innerhalb der industriellen PBF-LB/M-Maschine EOS M400-1 schematisch dargestellt. Die x - y -Ebene kennzeichnet dabei die Belichtungsebene, während die z -Koordinate die Aufbaurichtung des Fertigungsprozesses repräsentiert. Aufgrund der Verschraubung der Bauplattform in der PBF-LB/M-Maschine können die Randbereiche der Bauplattform (siehe rote Markierung) nicht für die Platzierung der Funktionssegmente genutzt werden.

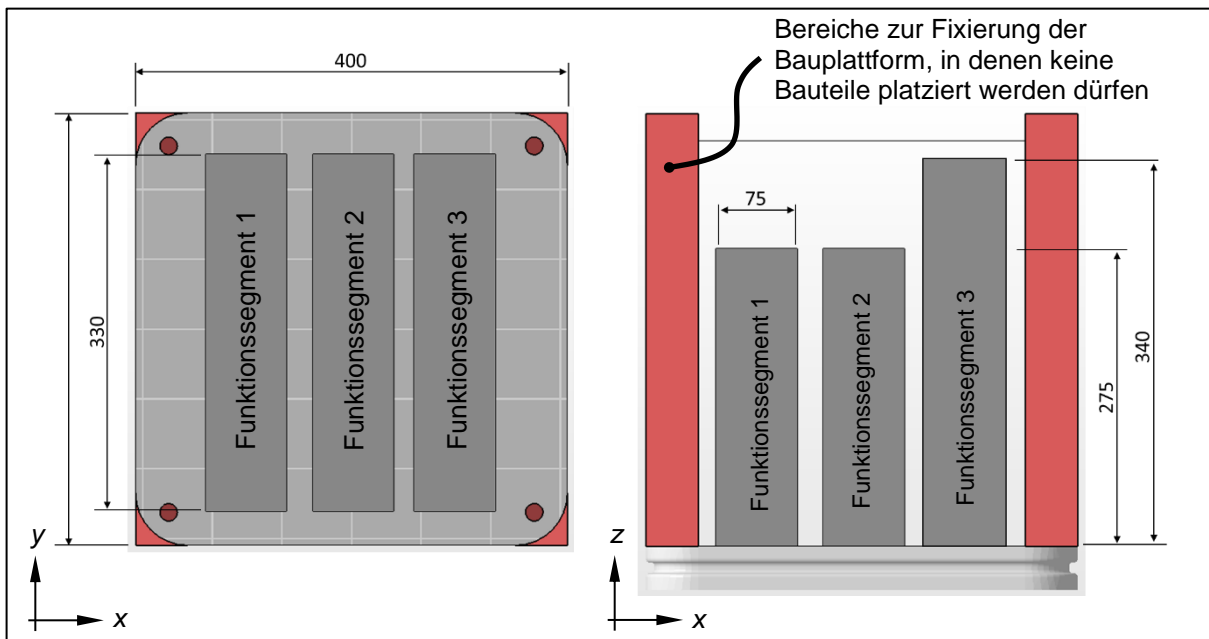


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Platzierung der drei Wärmetauscher-Funktionssegmente innerhalb des Bauraums der industriellen PBF-LB/M-Maschine EOS M400-1

Für die Fertigung der einzelnen Funktionssegmente empfahl sich eine Anordnung entlang der z -Koordinate (90° -Winkel zur Bauplattform). Dies gewährleistete eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit der Bauteile, da lediglich eine Fertigbarkeit in der x - z -Ebene bzw. y - z -Ebene sichergestellt werden musste. Zudem wurde der vorhandene Bauraum wirtschaftlich effizient ausgenutzt, da alle drei Funktionssegmente gleichzeitig gefertigt werden konnten. Dadurch wurden die Fertigungszeit und die Fertigungskosten zusätzlich reduziert.

2.3 Topologieoptimierung (AP 1.3)

Im Rahmen des Forschungsprojekts war das Ziel, eine geeignete Geometrie für den Designraum des Wärmetauschers zu definieren. Für eine hohe Wärmeübertragung mussten das kalte und heiße Fluid innerhalb des Wärmetauschers im direkten Wärmeaustausch stehen. Dies wurde durch Triply-Periodic-Minimal-Surface-Strukturen (TPMS-Strukturen) gewährleistet. Die TPMS-Strukturen besitzen die Eigenschaft, in einem dreidimensionalen Volumen zwei voneinander getrennte Bereiche zu erzeugen. Zudem weisen die Strukturen ein großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis auf. Dadurch stellen die Strukturen ein vielversprechendes Konzept zur Gestaltung des Innenraums von additiv gefertigten Wärmetauschern dar (FEMMER ET AL. 2015). Vier TPMS-Füllstrukturen, die in Abbildung 3 dargestellt sind, wurden für die detaillierte Untersuchung als geeignet eingestuft.

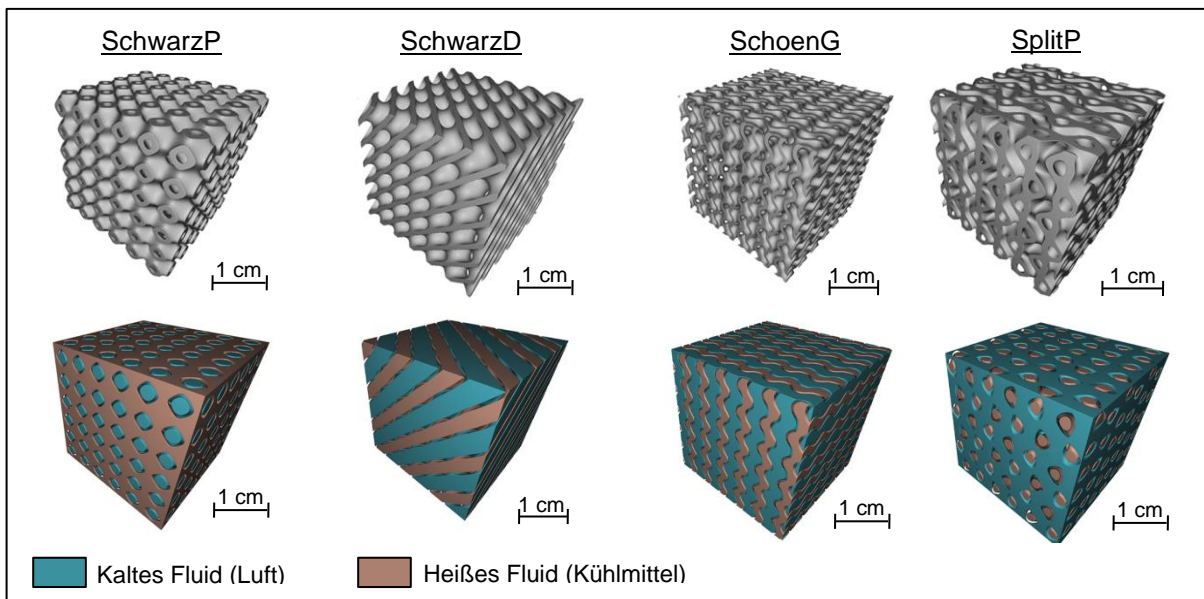


Abbildung 3: TPMS-Strukturen für die weitere Untersuchung des strömungsmechanischen Verhaltens

Der Aufbau der jeweils dargestellten TPMS-Strukturen erfolgt durch eine mathematische Operation von trigonometrischen Funktionen. Die Einheitszellen der TPMS-Strukturen können jeweils periodisch miteinander in die beliebigen Raumrichtungen kombiniert werden. Bei der Gestaltung der Strukturen stellten sowohl die Wandstärke als auch die Zellgröße relevante geometrische Parameter dar.

Für die Berechnung des strömungsmechanischen Verhaltens der einzelnen TPMS-Strukturen wurde eine Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (CFD-Simulation) aufgebaut. Um die Freiheitsgrade in der Simulation und folglich die Rechenzeit zu reduzieren, erfolgt der Aufbau eines repräsentativen Volumenelements (RVEs). Der Aufbau des Modells für die CFD-Analyse ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

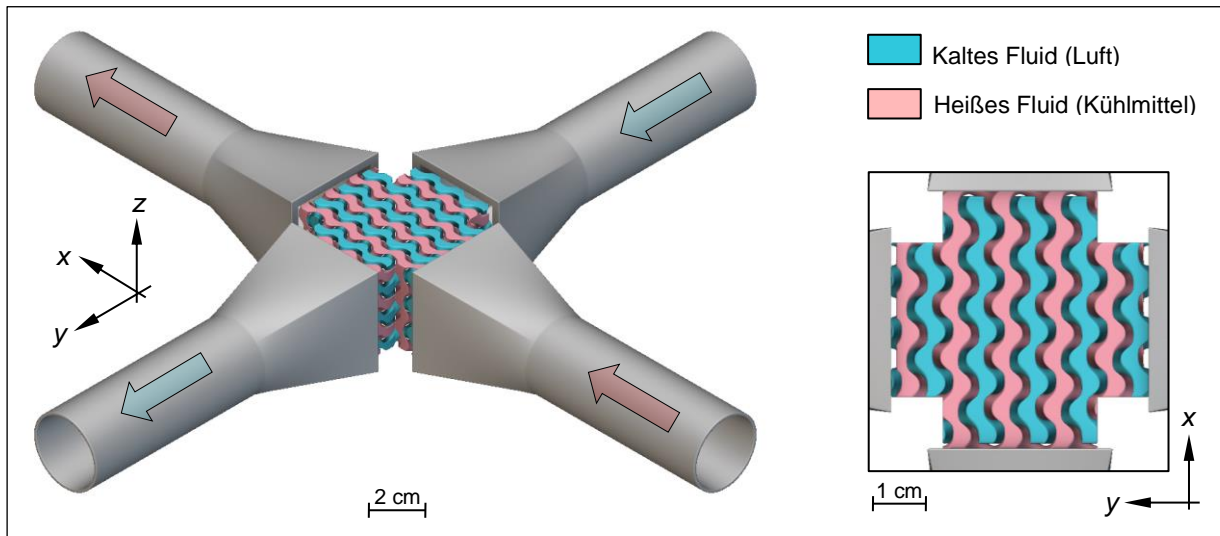


Abbildung 4: Aufbau der CFD-Simulation mit den freigeschnittenen Kanälen in der TPMS-Füllstruktur zur Untersuchung des strömungsmechanischen Verhaltens des definierten RVEs

Die TPMS-Struktur in der Mitte des Aufbaus besaß eine Außenkantenlänge von 50 mm. Innen befanden sich die TPMS-Kanäle für das kalte (Luft; Index k) und heiße (Kühlmittel; Index h) Fluid, die voneinander getrennt sind. Der Zulauf und der Ablauf erfolgten über eine Querschnittsfläche von $30 \times 30 \text{ mm}^2$. Die Kanäle erstreckten sich über eine Höhe von 30 mm (z-Richtung).

In der CFD-Analyse wurde eine Kreuzströmungsanordnung untersucht. Für die kreisrunden Einströmkanäle ergab sich ein hydraulischer Durchmesser $d_h = 23,92 \text{ mm}$. Mithilfe dessen und der Einströmgeschwindigkeiten $u_k = 26,39 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$ und $u_h = 1,33 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$ berechneten sich die Reynolds-Zahlen zu $Re_k = 42,54 \cdot 10^3$ und $Re_h = 38,78 \cdot 10^3$. Ebenso wurden am Einlass die Temperaturen $T_k = 288,15 \text{ K}$ und $T_h = 368,15 \text{ K}$ als Randbedingung aufgeprägt. Neben den Strömungsgeschwindigkeiten wurden auch die Temperaturen am Fluid-Auslass $T_{k,A}$ und $T_{h,A}$ sowie die Druckverluste Δp_k und Δp_h ermittelt. Es wurde ein Auslassdruck gemäß dem Atmosphärendruck ($p = 1013 \text{ hPa}$) festgelegt. Auf Basis einer zuvor durchgeführten Netzkonvergenz-Analyse an der SchoenG-Struktur (Zellgröße $s_z = 15,0 \text{ mm}$ und Wandstärke $t_w = 1,5 \text{ mm}$) wurde die maximale Elementgröße zu $e_{\max} = 0,4 \text{ mm}$ im Bereich der TPMS-Struktur definiert und keine Grenzschichten verwendet. Die Vernetzung der TPMS-Strukturen erfolgte aufgrund der komplexen Geometrie unter Verwendung eines unstrukturierten Tetraeder-Netzes mit einer Wachstumsrate von 1,2. Der Luftstrom wurde als inkompressibles Gas modelliert. Die Turbulenzmodellierung erfolgte mithilfe des k - ε -Modells.

Für eine gesteigerte Wärmeübertragung wurden geringe Wandstärken und geringe Zellgrößen bevorzugt. Diese Anforderung stand allerdings in einem Zielkonflikt mit der Fertigbarkeit durch das PBF-LB/M-Fertigungsverfahren. Es wurden die in Tabelle 2 aufgeführten TPMS-Strukturen mit den gelisteten geometrischen Parametern untersucht, wobei die Restriktionen für den PBF-LB/M-Fertigungsprozess eingehalten wurden.

Tabelle 2: Geometrische Parameter der untersuchten TPMS-Strukturen in der CFD-Simulation

TPMS-Struktur	Zellgröße	Wandstärke
	s_z in mm	t_w in mm
SchwarzD	5,0	0,5
SchwarzD	10,0	1,0 und 1,5 und 2,0
SchoenG	5,0	1,0
SchoenG	10,0	2,0
SplitP	5,0	1,5 und 2,0
SplitP	10,0	1,5 und 2,0

Eine detaillierte Untersuchung der SchwarzP-TPMS-Struktur erfolgte nicht, da im Rahmen einer gezielten Vorstudie diese Struktur die strömungsmechanisch ungünstigste Geometrie aufwies. Die Ergebnisse zeigten den geringsten Wärmeübergang bei höchstem Druckverlust, weshalb dieser Strukturtyp nicht weiter betrachtet wurde.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der CFD-Simulation für den Werkstoff AlSi10Mg und die SchwarzD-TPMS-Struktur mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 1,0$ mm (Benennung: SchwarzD-10-1.5) sowie die SplitP-TPMS-Struktur mit einer Zellgröße $s_z = 15,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 1,5$ mm (Benennung: SplitP-15-1.5) dargestellt. Beide Strukturen zeigten im Vergleich zu den anderen Strukturen die besten Ergebnisse. Die Strömungsgeschwindigkeiten am Fluid-Auslass variierten um $< 1\%$ zur am Fluid-Einlass definierten Randbedingung.

Tabelle 3: Ergebnisse der CFD-Simulation zur Beurteilung des strömungsmechanischen Verhaltens für die SchwarzD-TPMS-Struktur und die SplitP-TPMS-Struktur

TPMS-Struktur	Temperatur am Auslass (kaltes Fluid)	Temperatur am Auslass (heißes Fluid)	Druckverlust (kaltes Fluid)	Druckverlust (heißes Fluid)
	$T_{k,A}$ in K	$T_{h,A}$ in K	Δp_k in MPa	Δp_h in MPa
SchwarzD-10-1.5	326,6	367,9	$9,15 \cdot 10^{-3}$	$19,05 \cdot 10^{-3}$
SplitP-15-1.5	326,4	367,9	$12,61 \cdot 10^{-3}$	$23,17 \cdot 10^{-3}$

Die Wahl einer TPMS-Struktur mit einer hohen Zellgröße stimmt mit den Aussagen von MA ET AL. (2020) überein, um den Druckverlust im Wärmetauscher so gering wie möglich zu halten. Die Hochrechnung der benötigten Wärmeübertragungsfläche auf Basis der für die TPMS-Strukturen erzielten Ergebnisse erfolgte linear über die abzuführende Gesamtwärmeleistung mithilfe eines MATLAB-Skripts. Aus dem Designraum des Gesamtwärmetauschers wurde die mit der jeweiligen TPMS-Struktur verfügbare maximale Oberfläche ermittelt. Die resultierende Übertragungsfähigkeit UA , der Wärmedurchgangskoeffizient U und die entsprechenden Wärmeübertragungsflächen A_{ben} und A_{rea} sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Analytische Skalierung der CFD-Simulationsergebnisse auf die im Gesamt-Wärmetauscher zur Verfügung stehende Oberfläche für die strömungsmechanisch-performantesten TPMS-Strukturen vom Typ SchwarzD und SplitP

TPMS-Struktur	Übertragungsfähigkeit UA in W/K	Wärmedurchgangskoeffizient U in W/(mm ² ·K)	Benötigte Oberfläche A_{ben} in mm ²	Realisierbare Oberfläche A_{rea} in mm ²
SchwarzD-10-1.5	9.816	$4,185 \cdot 10^{-1}$	$469,0 \cdot 10^3$	$1,915 \cdot 10^6$
SplitP-15-1.5	9.395	$4,563 \cdot 10^{-1}$	$429,0 \cdot 10^3$	$1,722 \cdot 10^6$

Durch die Integration einer SchwarzD-TPMS-Struktur in den Wärmetauscher wurde eine Oberfläche $A_{rea} = 1,915 \cdot 10^6$ mm² realisiert. Für die Abfuhr der während des Flugs erzeugten Wärmeleistung $Q = 11,5$ kW wurde eine Oberfläche $A_{ben} = 469,0 \cdot 10^3$ mm² benötigt. Es ergab sich für das ganzheitliche Wärmetauscher-System ein Sicherheitsfaktor $SF = A_{rea} / A_{ben} = 4,08$. Die SchwarzD-TPMS-Struktur besaß im Vergleich zur TPMS-Struktur SplitP-15-1.5 einen geringeren Druckverlust in der CFD-Simulation und erfüllte die Grenzwerte (minimale Wandstärke, maximale Überhanglänge) für den PBF-LB/M-Prozess. Zudem besaß die Struktur eine beidseitig gleichmäßige Öffnung der Struktur und bot eine größere Wärmeübertragungsfläche in dem definiertem Volumen. Die erhöhte Pulverentfernbarkeit aufgrund der geringeren Verdrehung der innenliegenden Kühlkanäle stellte einen weiteren Vorteil dar. Die TPMS-Struktur SchwarzD-10-1.5 wurde aus diesem Grund für die weiteren Untersuchungen gewählt.

Bezüglich der Übertragungsfähigkeit und des Druckverlusts ließ sich ein Zielkonflikt für die TPMS-Strukturen identifizieren. Einerseits stieg durch eine Erhöhung der Übertragungsfläche bzw. eine Verringerung der Zellgröße die Wärmeübertragung an. Andererseits nahm der Druckverlust zu, da sich durch die Verringerung der Zellgröße der Strömungswiderstand für das Fluid erhöhte.

Neben dem Design der Füllstruktur innerhalb des Wärmetauschers war auch die geometrische Gestaltung der Einström- und Ausström-Zonen von hoher Relevanz. Daher wurden drei unterschiedliche Designvarianten in den ganzheitlichen Wärmetauscher integriert und hinsichtlich des resultierenden Druckverlusts untersucht:

- die Referenzgeometrie ohne eine innere Anpassung der Strömungsführung,
- ein mit Trennwänden unterteilter Designraum zur erzwungenen Strömungsführung und
- ein mit Hohlräumen versehener Ein- und Auslassbereich.

Die drei Geometrien sind in Abbildung 5 dargestellt. Um den Rechenaufwand in der CFD-Simulation zu begrenzen, wurde lediglich das mittlere Funktionssegment des Wärmetauschers mit einer Länge von 275 mm betrachtet.

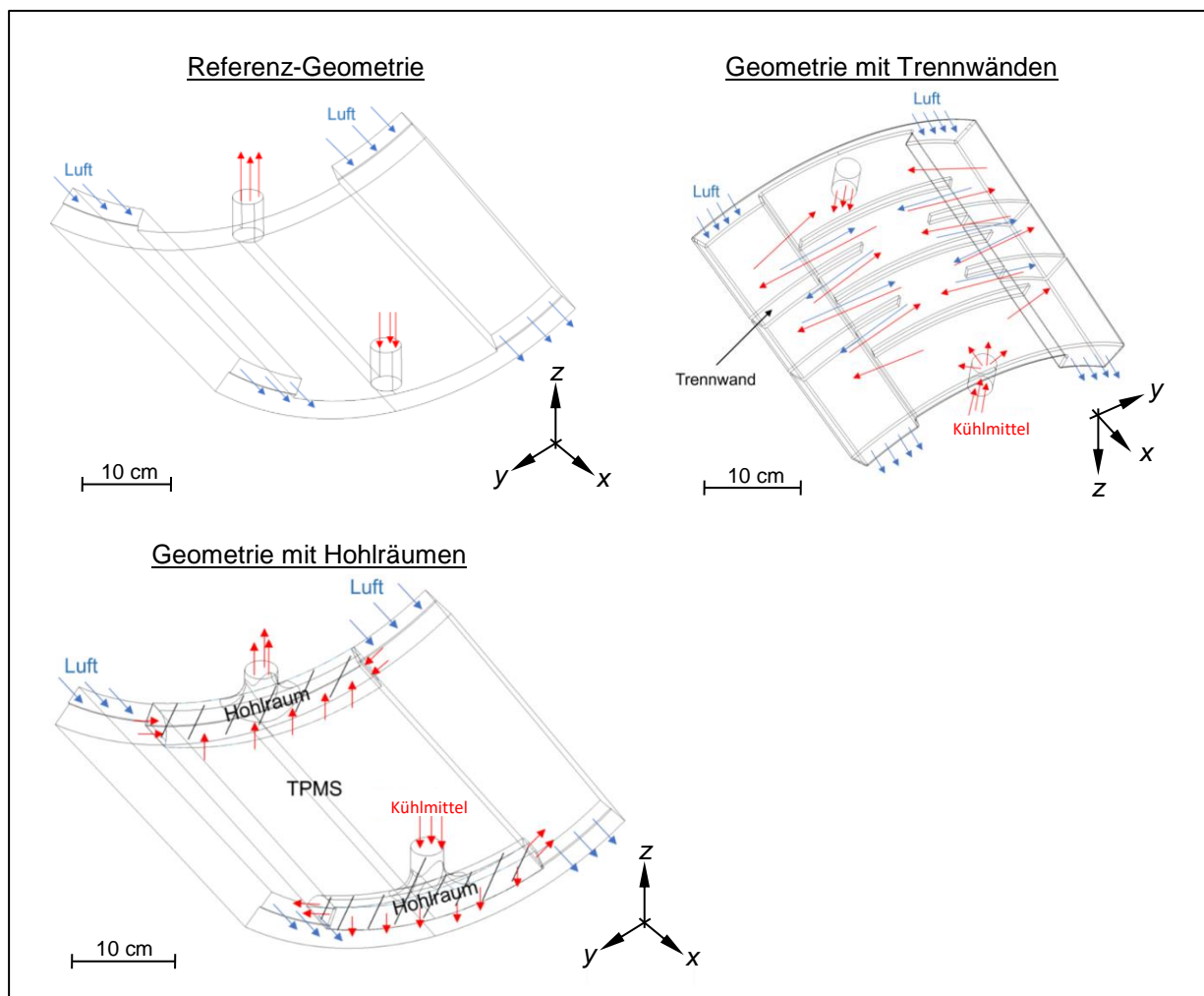


Abbildung 5: Mittels CFD hinsichtlich des Druckverlusts untersuchte Ein- und Auslassgeometrien für das mittlere Funktionssegment des Wärmetauschers

Dieses Modell war auf Basis der Ergebnisse der CFD-Strömungssimulation zu optimieren, indem im Geschwindigkeitsprofil Stauzonen identifiziert und anschließend reduziert wurden. Somit wurde eine vollständige Durchströmung des Wärmetauschers und eine Gegenstromkonfiguration erzielt. Für einen guten Wärmeaustausch war der Druckverlust an den Ein- und Auslässen zu verringern. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wurde für alle Simulationen eine SchoenG-Geometrie mit einer Zellgröße von $s_z = 20$ mm verwendet. Die Ergebnisse des Geschwindigkeitsprofils für das heiße Fluid (Wasser-Glykol-Kühlmittel-Gemisch) sind in Abbildung 6 gezeigt. Es sind jeweils die maximale Strömungsgeschwindigkeit u_{max} und die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit u_{avrg} für den Wärmetauscher dargestellt.

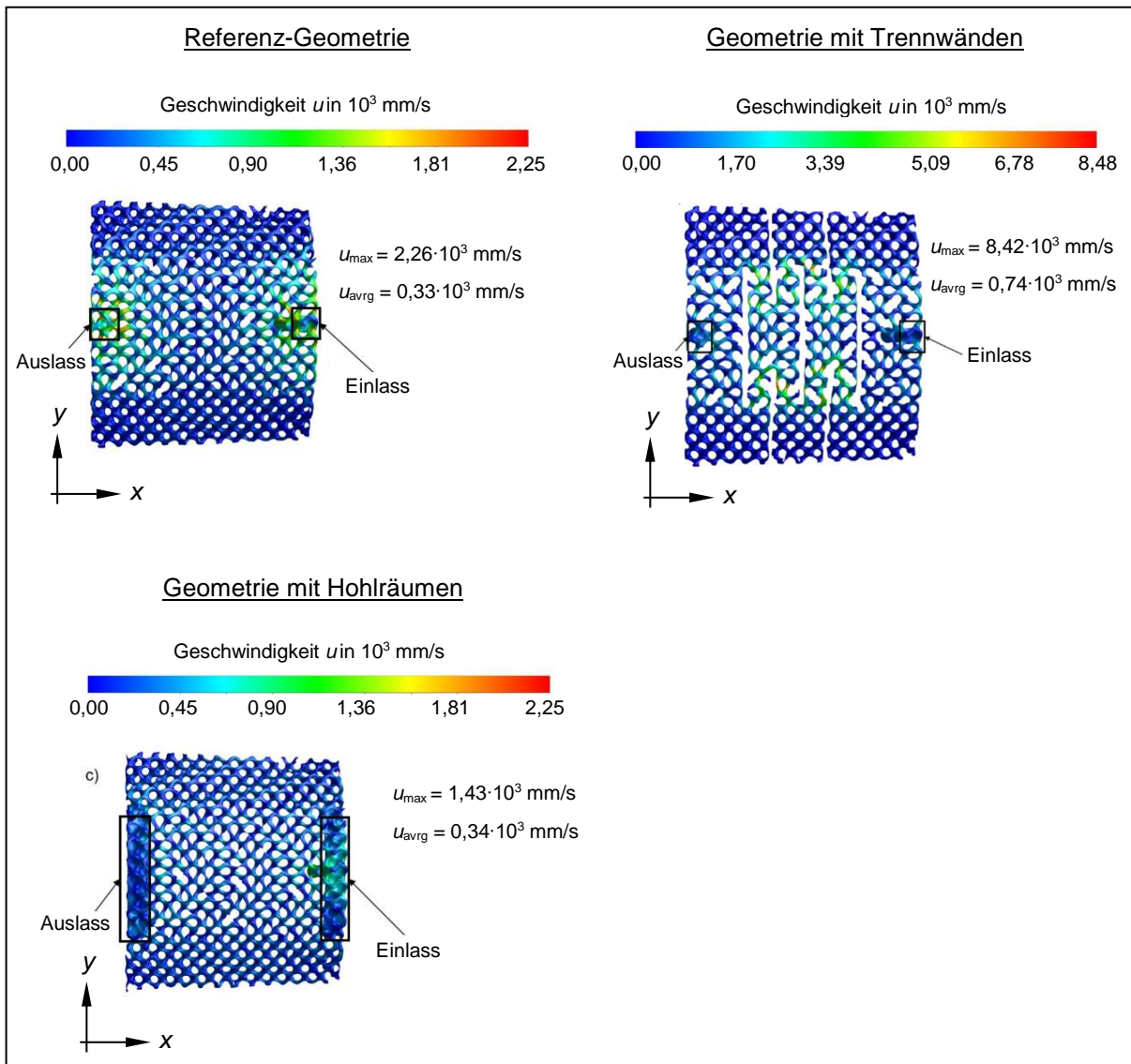


Abbildung 6: Resultierende Geschwindigkeitsprofile aus der CFD-Simulation für die unterschiedlichen Einlass- und Auslassgeometrien des mittleren Wärmetauscher-Funktionssegments

Gemäß Abbildung 6 zeigte sich für die Referenz-Geometrie eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung des Kühlmittels. Im Umkreis des Fluid-Einlasses und Fluid-Auslasses stieg die Geschwindigkeit lokal an, während in den seitlichen Kanälen keine Strömung vorlag. Die durchschnittliche Geschwindigkeit über das gesamte Volumen des Wärmetauscher-Funktionssegments lag bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $u_{\text{avg}} = 0,33 \cdot 10^3$ mm/s, die maximale Strömungsgeschwindigkeit betrug $u_{\text{max}} = 2,26 \cdot 10^3$ mm/s. Für die Wärmetauscher-Geometrie mit Hohlräumen ergab sich eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit von $u_{\text{avg}} = 0,34 \cdot 10^3$ mm/s und eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von $u_{\text{max}} = 1,43 \cdot 10^3$ mm/s. Es lag eine gleichmäßige Verteilung über den gesamten Wärmetauscher vor. Für die Geometrie mit den Trennwänden resultierte eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $u_{\text{avg}} = 0,74 \cdot 10^3$ mm/s. Durch die Trennwände wurde der Strömungsquerschnitt jedoch lokal reduziert, sodass in diesem Bereich eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von $u_{\text{max}} = 8,42 \cdot 10^3$ mm/s resultierte.

In Tabelle 5 sind die CFD-Simulationsergebnisse für den Druckverlust zwischen dem Fluid-Einlass und dem Fluid-Auslass der Wärmetauscher-Geometrien dargestellt. Dabei wurde analog zu Abbildung 6 das heiße Fluid (Wasser-Glykol-Kältemittel) für die Auswertung genutzt.

Tabelle 5: Ergebnisse der CFD-Simulation der drei Wärmetauscher-Designkonzepte

Wärmetauscher-Variante	Druckverlust
	Δp_h in MPa
Referenz-Geometrie	$6,562 \cdot 10^{-3}$
Geometrie mit Hohlräumen	$1,630 \cdot 10^{-3}$
Geometrie mit Trennwänden	$167,7 \cdot 10^{-3}$

Für die Referenz-Geometrie lag für das heiße Fluid ein Druckverlust von $\Delta p_h = 6,562 \cdot 10^{-3}$ MPa vor. Durch eine unterhalb des Designraums angebrachte Hohlkammer ergab sich schließlich ein Druckverlust von $\Delta p_h = 1.630,3 \cdot 10^{-3}$ MPa. Es war kein Gradient zwischen den Einström- und Ausström-Zonen und der TPMS-Struktur erkennbar. Daraus ergab sich, dass der Druckverlust aus der TPMS-Struktur selbst resultierte. Bei der Verwendung von Trennwänden in der Geometrie ergab sich ein Druckverlust von $\Delta p_h = 167,7 \cdot 10^{-3}$ MPa, da lokal der Strömungsquerschnitt reduziert wird. Dies resultiert in einem Druckgradienten, wodurch sich der gesamte Druckverlust erhöht.

STIMPSON ET AL. (2016) untersuchten experimentell den Druckverlust für Kanalstrukturen, welche durch den PBF/LB-M-Prozess hergestellt wurden. Hierbei wurde mit abnehmendem hydraulischem Durchmesser ein Anstieg des Reibungsfaktors beobachtet. Dies ließ sich durch das steigende Verhältnis von Oberflächenrauheit zu hydraulischem Durchmesser erklären. Der höhere Reibungsfaktor resultierte wiederum in einem erhöhten Druckabfall. In der Materialmodellierung des Wärmetauschers wurde die Wandrauheit nicht berücksichtigt. Mit steigender Rauheit der gefertigten TPMS-Struktur wurde eine Zunahme des Druckverlusts erwartet.

Zu beachten ist außerdem, dass für die Untersuchung die Zellgröße der TPMS-Struktur auf $s_z = 20$ mm erhöht wurde, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Folglich ist für TPMS-Strukturen mit einer geringeren Zellgröße eine Zunahme des Druckverlustes zu erwarten. Darüber hinaus kommt es für eine Reduzierung des Kanalquerschnitts bei gleichbleibendem Volumenstrom zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeit.

Zusätzlich zu den thermischen Vorstudien an den TPMS-Strukturen und dem vorläufigen Wärmetauscher-Designkonzept wurde auch eine mechanische Bewertung des Wärmetauschers durchgeführt. Zur Reduzierung der Rechenzeiten wurden die mechanischen Eigenschaften der TPMS-Füllstrukturtypen homogenisiert. Die Homogenisierung erfolgte für ein RVE mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 10$ mm³. Auf das RVE wurden Verschiebungen in die jeweiligen Koordinatenrichtungen als Dirichlet-Randbedingung aufgeprägt. Anschließend wurde das diskretisierte Gleichungssystem der Elastostatik mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) gelöst. Aus dem Ergebnis wurde der elastische Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung abgeleitet. Es resultierte eine anisotrope Steifigkeitsmatrix.

Für den Wärmetauscher waren zudem die Randbedingungen für die FEM-Simulation zu definieren. Die Lagerung ergab sich aus der Einbausituation im Flugzeug. Die Befestigung erfolgte mittels insgesamt acht Senkkopfschrauben am Flugzeugrumpf, welche nicht explizit simuliert wurden. Stattdessen wurden die Durchgangsbohrungen im Wärmetauscher als fixierte Lagerung definiert. Dadurch wurde an dieser Position keine Verschiebung in die x-, y- und z-Richtung zugelassen. Abbildung 7 veranschaulicht die Position der Senkbohrungen am vorderen und hinteren Wärmetauscher-Funktionssegment.

Die drei Wärmetauscher-Funktionssegmente sollten durch Anschraubblaschen miteinander verbunden werden. Diese wurden als Verbund simuliert, wodurch kein Abheben oder Gleiten der Strukturen in der y-z-Ebene zugelassen wurde. Der Wärmetauscher sollte am Flugzeugrumpf auf zwei seitlichen Auflageflächen aufliegen, welche in der Simulation als starres Auflager modelliert wurden.

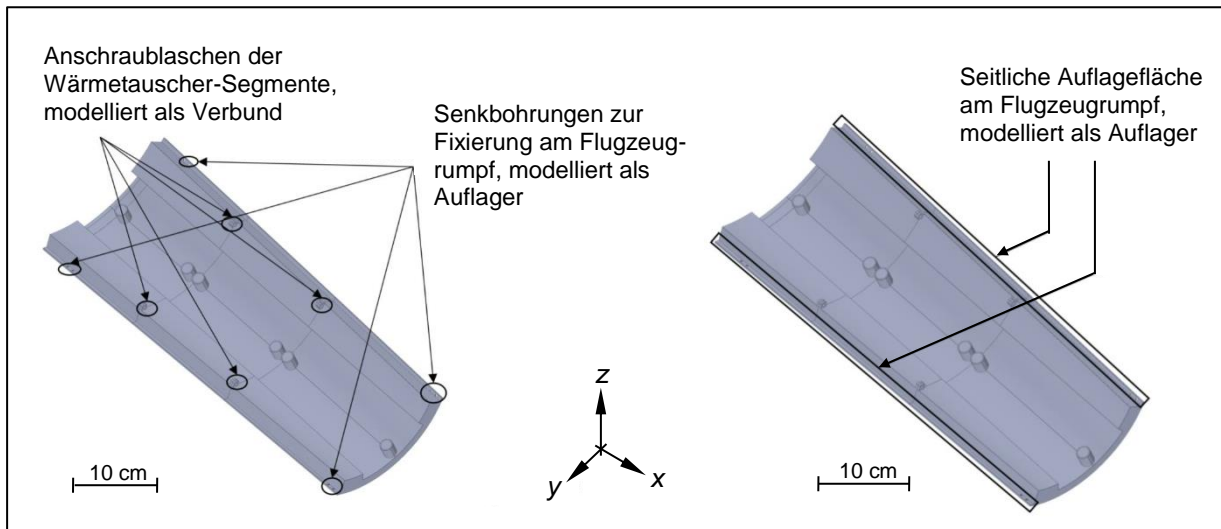


Abbildung 7: Darstellung der mechanischen Randbedingungen in der strukturmekanischen FEM-Analyse des ganzheitlichen Wärmetauschers

Die Lastrandbedingungen wurden als Beschleunigungen in die jeweilige Koordinatenrichtung aufgeprägt. Diese werden durch Multiplikation aus den Extrema der Lastvielfachen anhand der Anforderungsliste und der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ermittelt. Es ergaben sich die folgenden Beschleunigungen: $a_x = -88,3 \text{ m/s}^2$, $a_y = -29,4 \text{ m/s}^2$ und $a_z = 73,6 \text{ m/s}^2$.

Die maximale Vergleichsspannung trat jeweils an den Anschraubpunkten auf, die die Verbindung des Wärmetauschers zum Flugzeugrumpf ermöglichten. Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch die simulierte Vergleichsspannung σ_v im Bereich der Anschraubpunkte für ein einzelnes Wärmetauscher-Funktionssegment aus dem Aluminium-Werkstoff AlSi10Mg.

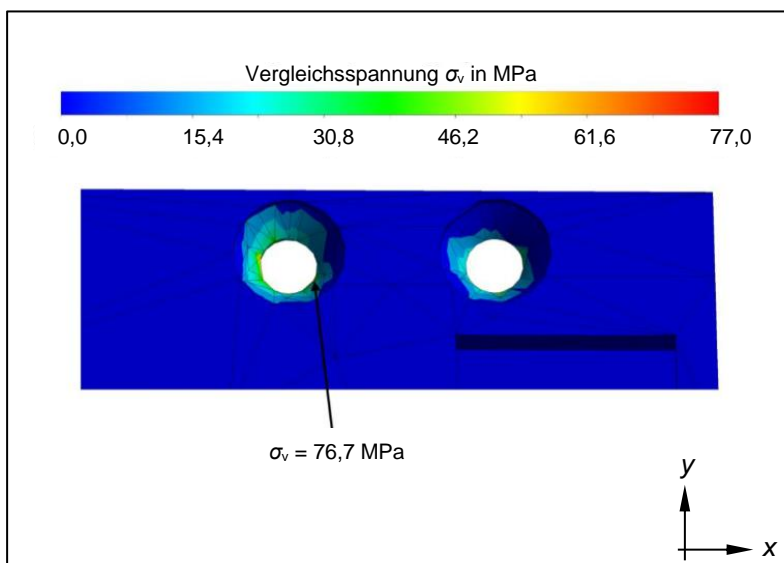


Abbildung 8: Vergleichsspannung für den Werkstoff AlSi10Mg an den definierten Senkbohrungen zur Fixierung des Wärmetauschers am Flugzeugrumpf, exemplarisch gezeigt für ein Wärmetauscher-Funktionssegment

Der dort auftretende maximale Spannungswert ergab sich zu $\sigma_v = 76,7$ MPa und liegt damit unter der werkstoffspezifischen Streckgrenze $R_{p0,2} = 230$ MPa. Demzufolge ergab sich ein Sicherheitsfaktor $SF = 3,0$ und der mechanische Sicherheitsnachweis wurde erbracht.

Auf Basis der vorläufigen strukturmechanischen Ergebnisse wurde die Werkstoffwahl nicht eingeschränkt. Daher wurden als signifikante Parameter bei der Wärmetauscher-Auslegung lediglich die Wärmeleitfähigkeit und die Massenanforderungen berücksichtigt. Aufgrund der minimalen Dichte für AlSi10Mg von $\bar{\rho}_{\text{AlSi10Mg}} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ g/mm³ wurde diese Legierung für die weiteren Untersuchung verwendet. Zusätzlich verfügt der Werkstoff AlSi10Mg im Vergleich zu den anderen Werkstoffen über die höchste Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{AlSi10Mg}} = 103 \cdot 10^{-3}$ W/(mm·K), wie in Tabelle 2 gezeigt wird.

Aufgrund von begrenzten Berechnungsressourcen war eine ganzheitliche CFD-Analyse zur Ermittlung des strömungsmechanischen Verhaltens für das gesamte Wärmetauscher-System (maximal $84,8 \times 324,9 \times 336,0$ mm³) nicht möglich. Die Integration der dünnwandigen SchwarzD-TPMS-Strukturen in das Wärmetauscher-System resultierte in einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden, die durch die zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht numerisch gelöst werden konnten.

2.4 Fertigungsgerechte Gestaltung des topologieoptimierten Designs (AP 1.4)

Die Fertigungsrestriktionen für den PBF-LB/M-Prozess wurden sukzessive in den Design-Iterationen des Wärmetauschers berücksichtigt. Hierbei wurden die experimentell ermittelten Grenzwerte für den Werkstoff AlSi10Mg nach LIPPERT (2018) eingehalten. Für den Wärmetauscher wurden im Rahmen des Projekts drei unterschiedliche Designvarianten abgeleitet. Diese wurden hinsichtlich der Überhangwinkel und der minimalen Wandstärken überprüft. Die drei Design-Varianten können durch die nachfolgend aufgeführten Anpassungen zur Beeinflussung des Strömungsverhaltens unterschieden werden:

- 45°-Trennwände ohne TPMS-Füllstruktur,
- 45°-Trennwände mit TPMS-Füllstruktur (siehe Abbildung 9) und
- flache Trennwände.

Die Wärmetauscher wurden innerhalb eines parametrisierten Modells unter Verwendung eines impliziten Design-Ansatzes erstellt. Der implizite Design-Ansatz zeichnet sich durch eine mathematische Beschreibung der Geometrien aus, wodurch insbesondere dünnwandige und komplexe Strukturen mit einer hohen Detailgenauigkeit modelliert werden können. Die Trennwände zur Beeinflussung des Strömungsverhaltens wurden mit einer Wandstärke von 3,0 mm realisiert. Dies ermöglicht einen gleichmäßigen Querschnittsübergang zu den Außenflächen des Wärmetauschers, wodurch die Auftretenswahrscheinlichkeit von Überhitzungen während der Bauteilfertigung reduziert wird.

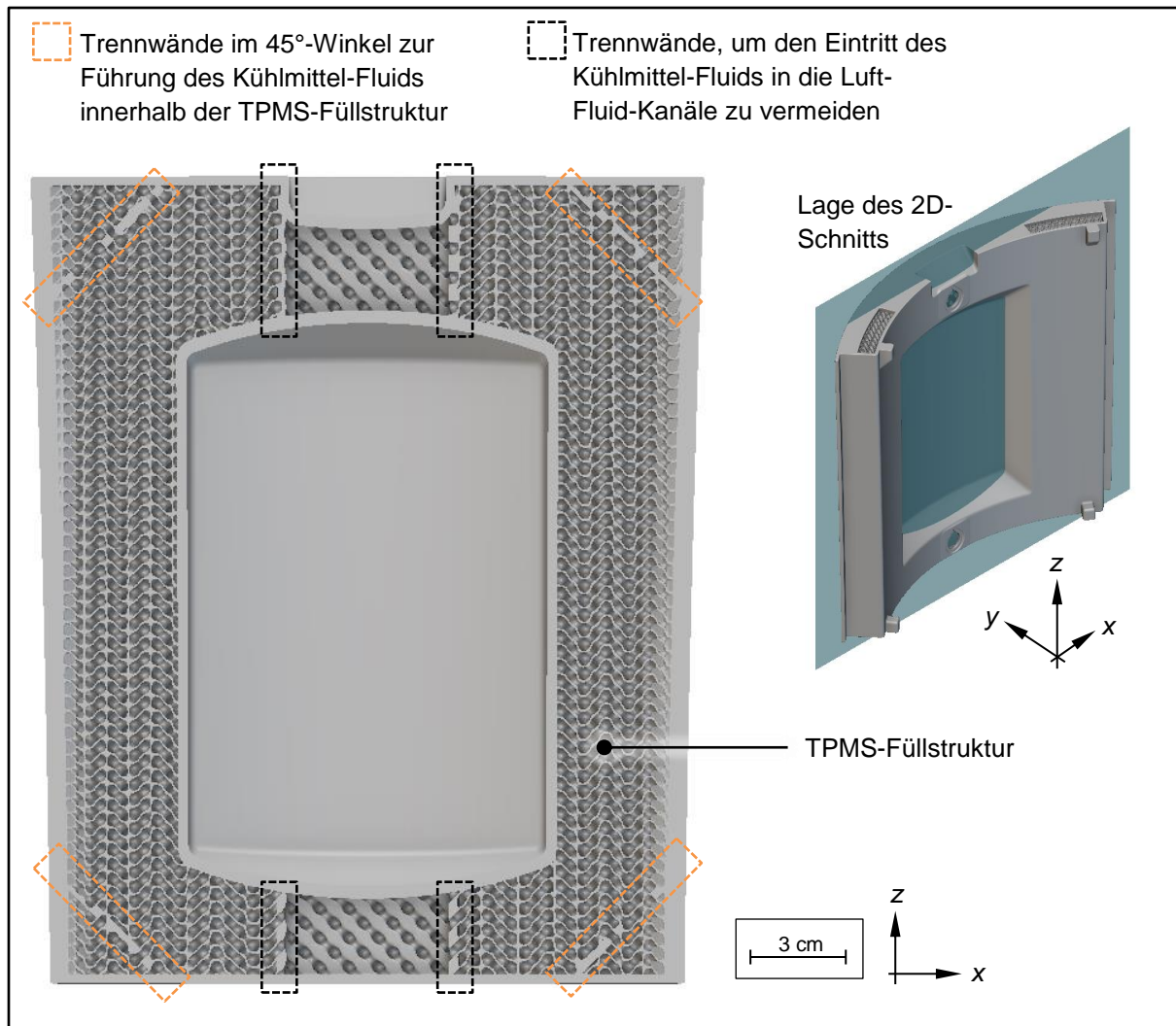


Abbildung 9: Ausgewählte Design-Variante des Wärmetauschers mit den 45°-Trennwänden und der Abstützung durch die integrierten TPMS-Füllstrukturen; Veranschaulichung exemplarisch für das mittlere Wärmetauscher-Segment in einem 2D-Schnitt

Für die Fertigung des Demonstrators (siehe AP 3.1) wurde die Designvariante „45°-Trennwände mit TPMS-Füllstruktur“ (siehe Abbildung 9) ausgewählt. Die unterhalb der Trennwand implementierte TPMS-Füllstruktur diente als Stützkonstruktion, wodurch die Fertigbarkeit verbessert wurde. Zusätzlich begünstigte die Trennwand die Pulverentfernung nach der Fertigung mittels PBF-LB/M. Während des Betriebs des Wärmetauschers wurden dadurch Strömungszonen mit verringerten Strömungsgeschwindigkeiten und damit einem reduzierten Wärmeaustausch in den Eckbereichen infolge der 45°-Trennwände vermieden. Dies verringerte allerdings auch die realisierbare Oberfläche A_{rea} zur Wärmeabführung.

Um die einzelnen Wärmetauscher-Segmente miteinander zu verbinden, wurden Vollmaterial-Quader an den Segmenten vorgesehen. Diese wurden mit einer Stützkonstruktion im 45°-Winkel gestützt, um die Fertigbarkeit sicherzustellen. Darüber hinaus wurde die Fertigbarkeit der Öffnungen für den Fluid-Einlass und -Auslass durch die Anwendung einer 45°-Tropfenform realisiert. Dies ist in Abbildung 10 für das mittlere Wärmetauscher-Segment exemplarisch dargestellt.

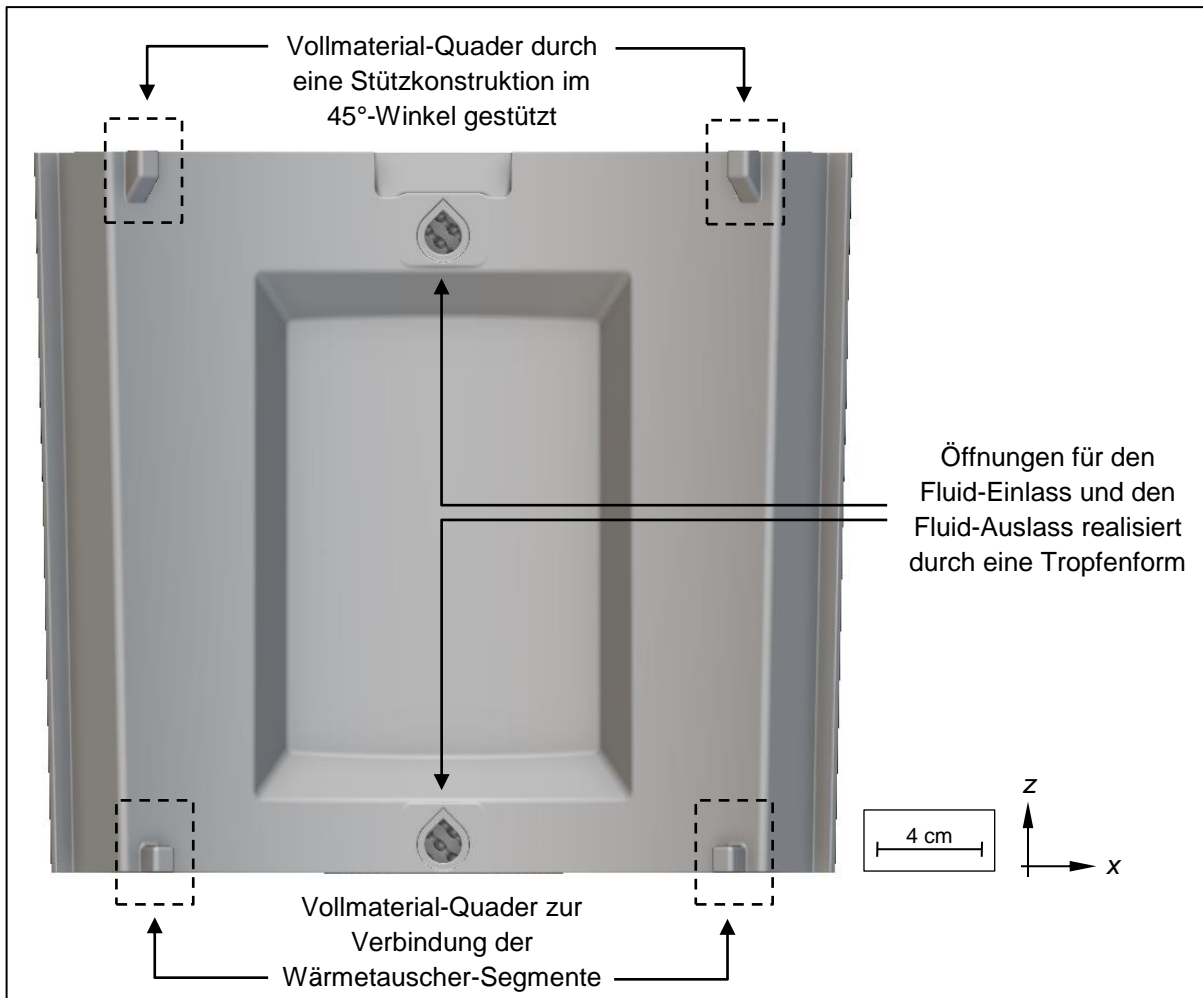


Abbildung 10: Veranschaulichung der Tropfenform für den Fluid-Einlass bzw. -Auslass und der implementierten Vollmaterial-Quader zur Verbindung der Wärmetauscher-Segmente

Die Kombination von großen geometrischen Dimensionen der drei Wärmetauscher-Segmente (max. $84,8 \times 324,9 \times 336,0 \text{ mm}^3$) mit den verwendeten dünnwandigen TPMS-Füllstrukturen führte zu einem hohen Rechenaufwand und Dateigrößen bei dem Export der Geometrien in das Standard-Tessellation-Language-Format (STL-Format). Um die STL-Daten auf PBF-LB/M-Anlagen verarbeiten zu können, mussten diese auf eine Dateigröße $< 1 \text{ GB}$ je Segment komprimiert werden. Mittels eines Reduktionsansatzes wurde die Bauteilgeometrie nur an den Stellen durch kleine Dreiecke diskretisiert, wo es die Komplexität der Füllstrukturen erforderte. Dadurch wurden Datengrößen im Bereich von $711 - 823 \text{ MB}$ je Segment erzielt, welche keine signifikanten Verluste der Modellgenauigkeit beinhalteten und für die weitere Fertigung auf einer PBF-LB/M-Anlage geeignet waren.

2.5 Herstellung von Funktionsmustern und Probekörpern mittels Additiver

Fertigung (AP 2.1)

In diesem Abschnitt werden die gefertigten Proben für die Studie zur Fertigbarkeit von TPMS-Strukturen, für die Parameterstudie zur Reduzierung von Porosität und für die Untersuchung

des Ermüdungsverhaltens infolge von Schrumpflinien-Kerben vorgestellt. Zusätzlich werden die durch einen Fertigungsdienstleister gefertigten TPMS-Probekörper gezeigt.

Proben für die Fertigbarkeits-Studie von TPMS-Strukturen

Für die Untersuchung der Fertigbarkeit von TPMS-Strukturen wurde ein Versuchsplan für die Werkstoffe Inconel718 und AlSi10Mg abgeleitet. Basierend auf den Ergebnissen der Arbeiten von MA ET AL. (2020) wurde eine möglichst hohe Zellgröße angestrebt, um den Druckverlust im Wärmetauscher so gering wie möglich zu halten. In Abhängigkeit der gewählten Zellgröße entstanden Überhanglängen \ddot{U}_L in den TPMS-Strukturen. Gemäß LIPPERT (2018) wurde mit dem Werkstoff AlSi10Mg eine maximale akzeptable selbsttragende Überhanglänge $\ddot{U}_L \leq 3,0$ mm experimentell erzielt. Die minimal fertigbare Wandstärke lag bei $t_{w,min} = 0,4$ mm. Tabelle 6 führt die untersuchten TPMS-Probekörper auf, wobei die fertigungskritischen Wandstärken und Überhanglängen farblich hervorgehoben sind.

Tabelle 6: Hinsichtlich der Fertigbarkeit untersuchte TPMS-Strukturen in der Konstruktionssoftware; Variation der Zellgröße und der Wandstärke für die TPMS-Strukturen vom Typ SchwarzD, SchoenG und SplitP

TPMS-Struktur	Zellgröße	Durchschnittliche Wandstärke	Minimale Wandstärke	Überhanglänge
	s_z in mm	t_w in mm	$t_{w,min}$ in mm	\ddot{U}_L in mm
SchwarzD	5,0	1,0	0,7	2,2
SchwarzD	10,0	1,0	0,6	2,6
SchwarzD	10,0	1,5	1,0	2,8
SchwarzD	10,0	2,0	1,4	1,1
SchoenG	5,0	1,0	0,7	1,8
SchoenG	10,0	2,0	1,4	3,5
SplitP	10,0	1,0	0,4	2,7
SplitP	10,0	1,5	0,6	2,3
SplitP	10,0	2,0	0,8	2,2
SplitP	15,0	1,0	0,4	3,3
SplitP	15,0	1,5	0,6	3,2
SplitP	15,0	2,0	0,8	3,1

Die Fertigung der Probekörper aus dem Werkstoff Inconel718 erfolgte auf der PBF-LB/M-Anlage EOS M400-1. Der Prozess wurde mittels der anlageninternen Prozessüberwachung in Form einer optischen Tomographie (OT) aufgezeichnet. Als Messwerte wurde die Wärmestrahlung einer Schicht erfasst, welche in Grauwerten dargestellt wird. Dabei korreliert ein hoher Grauwert mit einer hohen Wärmeemission und ein niedriger Grauwert mit einer geringen Wärmeemission. Folglich war es möglich, Überhitzungen während des Baujobs zu identifizieren und zu lokalisieren.

Ein Fertigungsabbruch trat auf der Höhe von $z = 9,48$ mm im Bereich des Vollmaterialsockels auf. Als Begründung wurden Probleme mit der Gaszufuhr genannt. Eine Fortsetzung des Baujobs erfolgte nach einer doppelten Belichtung der für den Abbruch verantwortlichen Schicht. Das zugehörige Integral-OT-Bild aus Abbildung 11 zeigt einen signifikanten Wärmeeintrag. Ein weiterer Prozessabbruch erfolgte auf der Schichthöhe $z = 45,16$ mm im Bereich des Übergangs der TPMS-Struktur zum Vollmaterial. Der Grund war eine Kollision des Beschichters mit dem Bauteil. Durch einen manuellen Eingriff konnte der Baujob nach der Kollision mit einem Versatz von einer Schichtdicke ($= 0,04$ mm) von der abgebrochenen Schicht aus neugestartet werden. In der OT-Prozessüberwachung ist daher ein starker Sprung der Wärmeemission über alle Bauteile hinweg zu erkennen. In der Abbildung 11 sind die aufgezeichneten Integral-OT-Bilder und die Auswirkungen des Prozessabbruchs anhand des SplitP-Prüfkörpers dargestellt. Wie durch die zwei Rechtecke (blau bei einer Höhe $z = 9,48$ mm und rot bei $z = 45,16$ mm) exemplarisch aufgezeigt wird, entstand an allen Bauteilen eine sichtbare Kerbe infolge der zwei Prozessabbrüche.

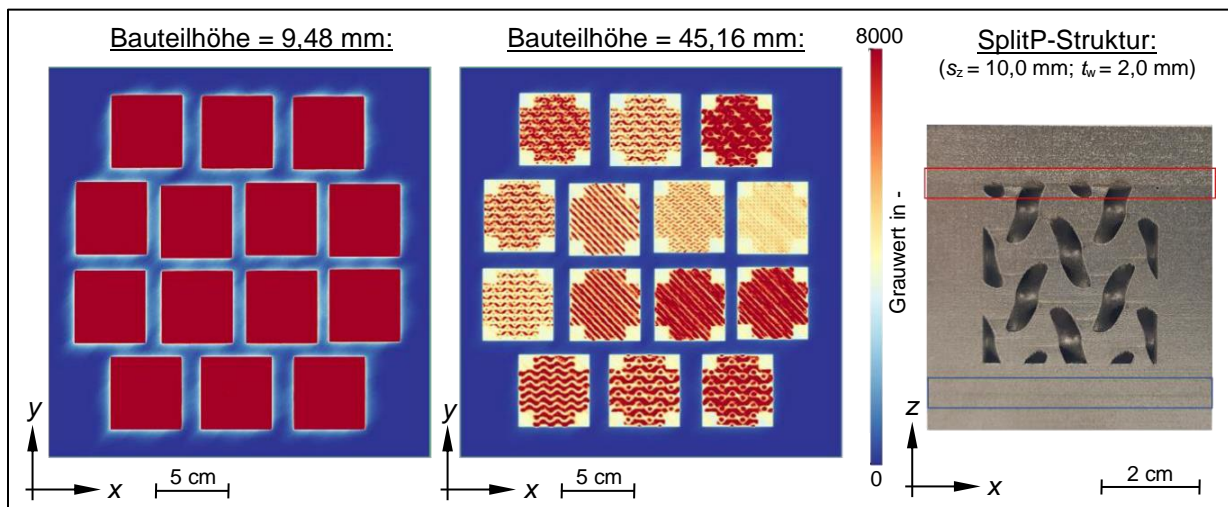


Abbildung 11: OT-Signal der gefertigten TPMS-Strukturen (Werkstoff: Inconel718)

Die Probekörper aus dem Werkstoff AlSi10Mg wurden auf der PBF-LB/M-Anlage SLM Realizer 250 gefertigt. In einem ersten Fertigungsauftrag ereignete sich auf der Schichthöhe $z = 14,00$ mm ein Prozessabbruch durch eine Kollision des Beschichters mit einem Bauteil. Durch den 15 mm hohen Vollmaterialsockel des Prüfkörpers wurde viel Wärmeenergie in die Bauplatte eingebracht. Infolgedessen verformte sich die Bauplatte plastisch. In einem zweiten, angepassten Fertigungsauftrag wurden die Probekörper verkleinert und ohne Sockel mit einer Größe von $40 \times 40 \times 40$ mm³ gestaltet. Es erfolgte eine fehlerfreie Fertigung der Prüfkörper, wie in Abbildung 12 zu erkennen ist. Durch das Fehlen des Sockels wurden die Prüfkörper zur weiteren Untersuchung, wie z. B. Leakage-Tests und Computer-Tomographie-Scans (CT-Scans), mit der Bauplatte zugeschnitten.

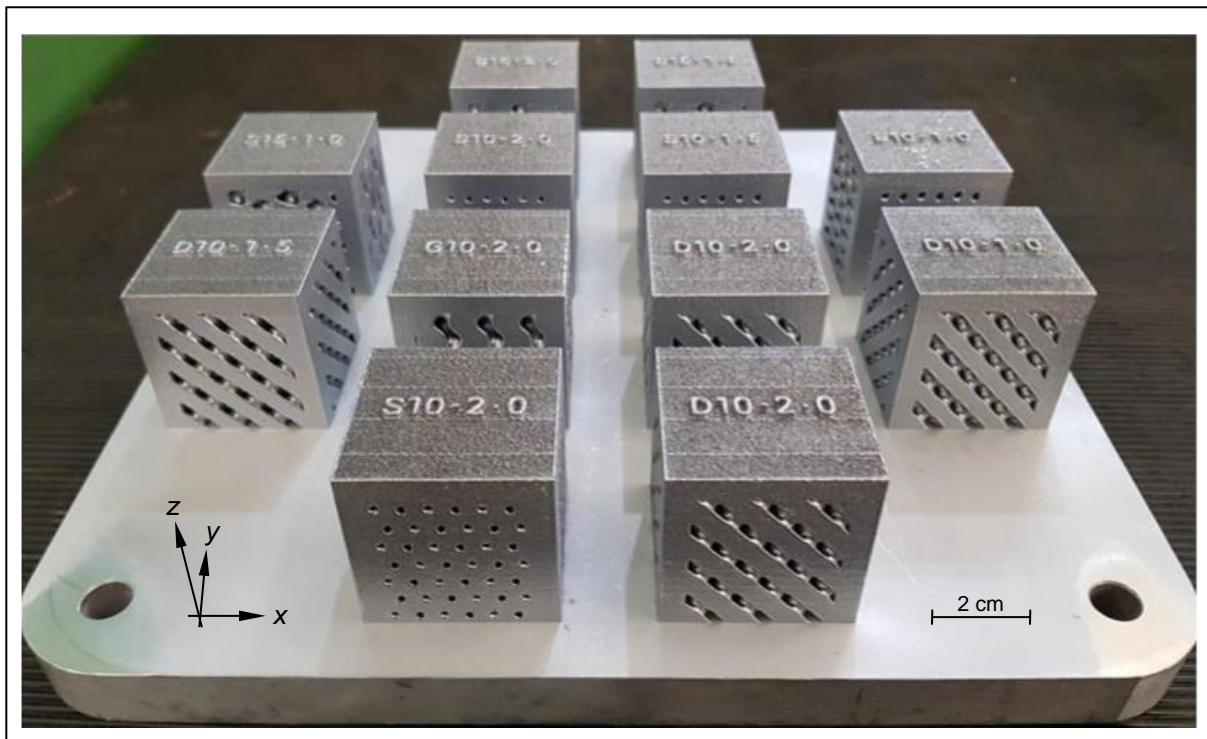


Abbildung 12: Erfolgreich gefertigte TPMS-Strukturen (Werkstoff: AlSi10Mg)

Proben für die Laserstromstärke-Porositäts-Studie

Aufgrund der erhöhten Porosität im Randbereich der SplitP-Probekörper (Zellgröße $s_z = 15,0$ mm und Wandstärke $t_w = 1,0$ mm) wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der die Laserstromstärke im Infill- und Kontur-Bereich um jeweils ± 10 % und ± 20 % ausgehend von der Laserstromstärke $P_L = 3500$ mA in einem teil-faktoriellen Versuchsplan variiert wurde. Die Scangeschwindigkeit und der Hatchabstand wurden zu $v_s = 1000$ mm/s und $h_s = 0,13$ mm definiert. Der gefertigte Baujob ist in Abbildung 13 dargestellt.

Die drei markierten Prüfkörper 3500mA_2_1, 3850mA_1 und 4200mA_2 mittig im vorderen Bereich der Bauplattform besaßen eine glänzende Oberfläche. Da die Abweichung der Prüfkörper von der Soll-Geometrie erst in der Deckschicht der Prüfkörper auftrat, konnten diese für die weitere Untersuchung verwendet werden. Die Ursache für den Glanz-Effekt lag in einem Defekt bei der Pulverzufuhr, wodurch zu wenig Pulver auf der Bauplattform aufgetragen wurde.

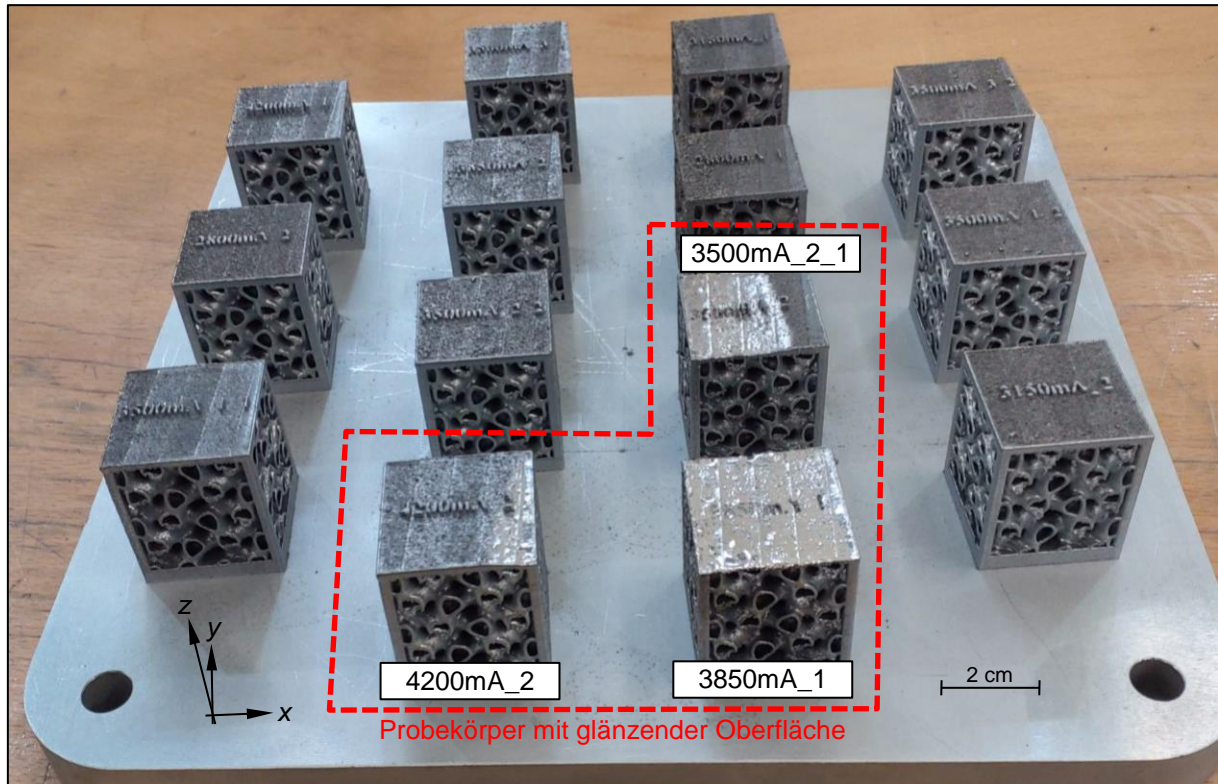


Abbildung 13: SplitP-Probekörper zur Untersuchung der Porosität (Werkstoff: AlSi10Mg) unter Angabe der Probekörper, welche aufgrund einer fehlerhaften Pulverzufuhr eine glänzende Oberfläche zeigen

Fertigbarkeitsuntersuchung des Fluid-Einlasses

Zusätzlich wurden mit der ausgewählten TPMS-Struktur nach der Fertigbarkeitsuntersuchung (siehe AP 2.1) und der Topologieoptimierung (siehe AP 1.3) repräsentative Bauteile für die Untersuchung der Fertigbarkeit im Fluid-Einlass additiv hergestellt. Die Wärmetauscher-Segmente wurden mit dem in der Parameterstudie identifizierten Parametersatz für die geringste Porosität gefertigt. Für jede der im weiteren Projektverlauf zu untersuchenden Fügeverbindungen (Kleben, Schweißen, Schraubverbindung) erfolgte die Fertigung eines einzelnen Probekörpers. Dieser besaß eine Breite $b = 60$ mm und eine Höhe $h = 86$ mm, wobei die unteren 6 mm als Sockel zur Bauteilanbindung an die Bauplatte dienten (siehe Abbildung 14). Zusätzlich zu den drei Varianten erfolgte die Fertigung eines weiteren Bauteils mit seitlich geschlossener TPMS-Struktur des Kühlmittel-Kanals. Im Bereich des Fluid-Einlasses wurde der entsprechende Luftkanal von der Füllstruktur jeweils geschlossen.

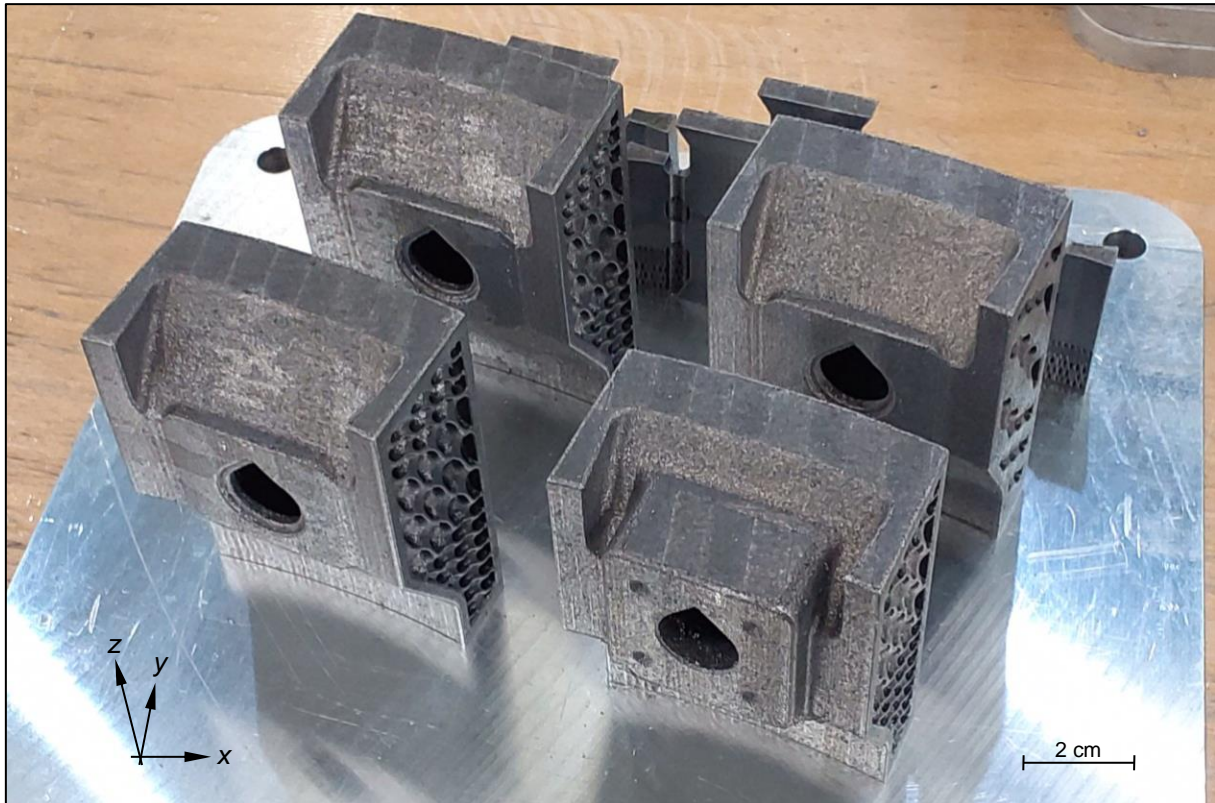


Abbildung 14: Probekörper zur Untersuchung des Fluid-Einlasses (Werkstoff: AISi10Mg)

Zusätzlich wurden drei Stutzen für die Untersuchung der Fügeverfahren mit spanenden Verfahren gefertigt. Die Stutzen wurden aus dem Werkstoff AlMg4,5Mn hergestellt. Diese sind in Abbildung 15 dargestellt.

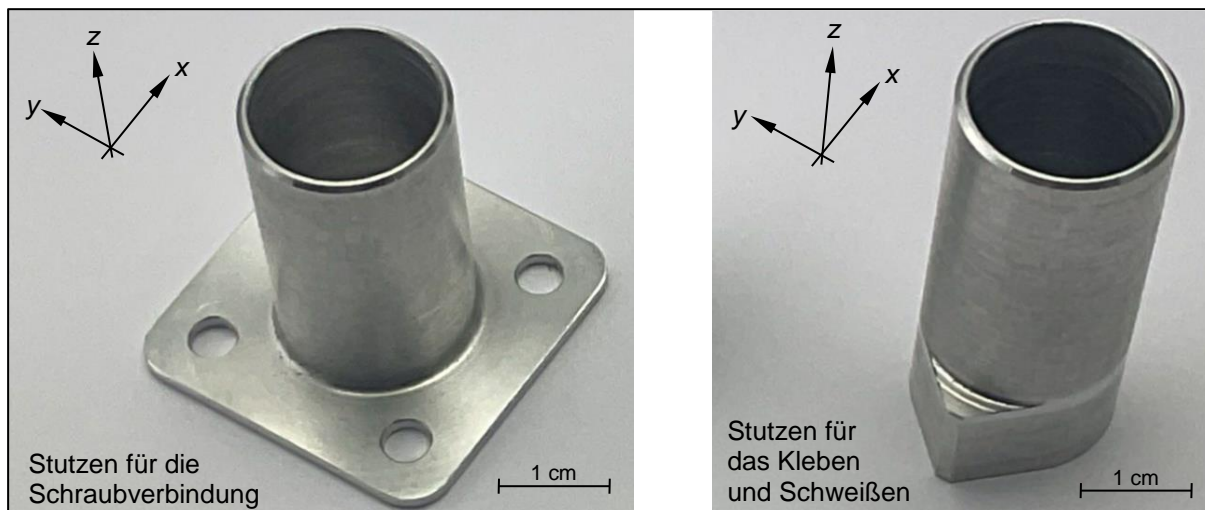


Abbildung 15: Stutzen für die Fluid-Einlass-Fügeverbindung (Werkstoff: AlMg4,5Mn)

Proben für die Ermüdungsversuche

Nach GOETZ ET AL. (2022) treten bei Bauteilen mit strukturellen Übergängen sogenannte Schrupflinien auf. Diese Schrupflinien äußern sich als Kerben an der Bauteil-Außenfläche, wobei in den Untersuchungen eine maximale Kerbtiefe $t_{\text{Kerbe}} = 0,15 \text{ mm}$ gemessen wurde. Wärmetauscher-Füllstrukturen besitzen eine Vielzahl an strukturellen Übergängen, weshalb ein erhöhtes Risiko zur Ausbildung von Schrupflinien und der damit einhergehenden Reduzierung der Maßhaltigkeit und Lebensdauer besteht. Aus diesem Grund wurden Probekörper nach DIN EN 6072 mit einer standardisierten Schrupflinien-Kerbe versehen (siehe Abbildung 16). Die Kerbtiefe wurde zwischen $t_{\text{Kerbe}} = 0,0 - 0,3 \text{ mm}$ in einer Abstufung von $0,1 \text{ mm}$ variiert. Die Probekörper wurden aus dem Werkstoff Inconel718 gefertigt, um diese anschließend hinsichtlich der resultierenden Ermüdungseigenschaften zu untersuchen (siehe AP 2.4).

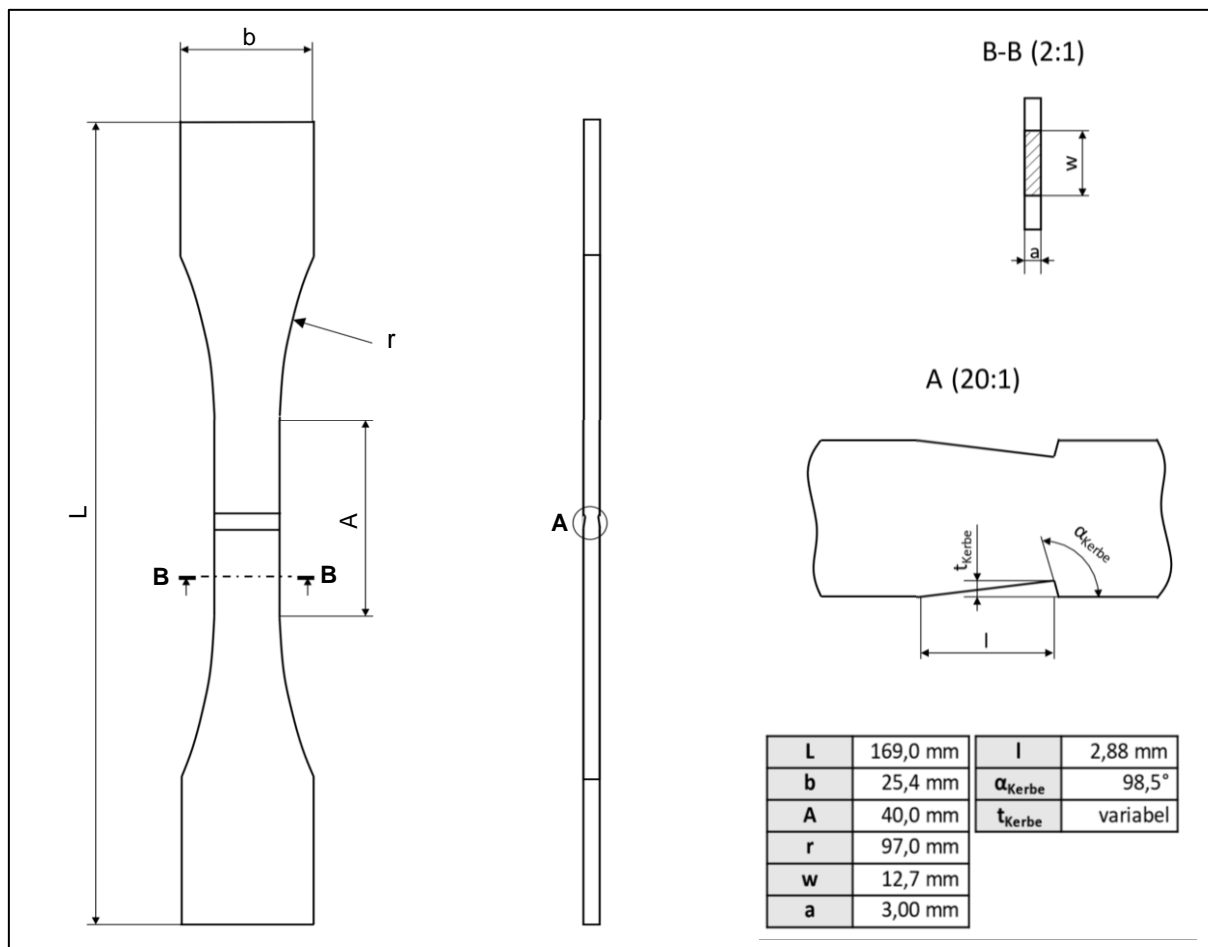


Abbildung 16: Gekerbter Probekörper für die Ermüdungsversuche (Werkstoff: Inconel718)

Extern gefertigte TPMS-Strukturen

Die Fertigung des ganzheitlichen Wärmetauschers (siehe AP 3.1) wurde aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten bei dem Unternehmen Materialise GmbH durchgeführt. Für die externe Fertigung war es notwendig, die Fertigbarkeit und Qualität der in den Wärmetauscher integrierten SchwarzD-TPMS-Strukturen (siehe AP 1.1) zu prüfen. Aus diesem Grund wurde die Fertigung von sechs ausgewählten Probekörpern (siehe Abbildung 11) bei Materialise GmbH in Auftrag gegeben. In Abbildung 17 ist einer der gefertigten Probekörper dargestellt, welcher nach dem Fertigungsprozess mithilfe des Abrasiv-Trennschneiders AbrasiMatic 300 (Buehler, ITW Test & Measurement GmbH European Headquarters, Deutschland) geteilt wurde.

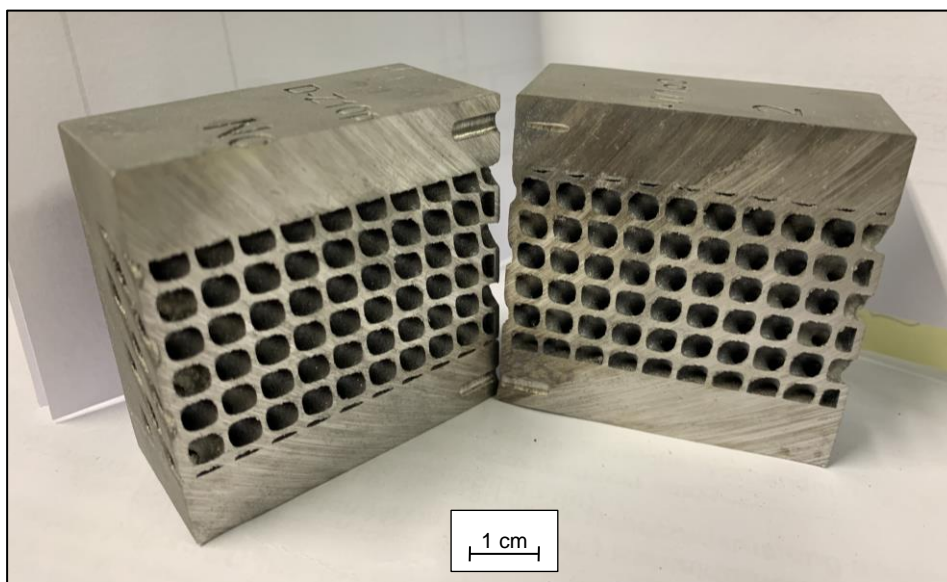


Abbildung 17: Darstellung eines extern gefertigten Probekörpers mit einer implementierten SchwarzD-TPMS-Füllstruktur; 2D-Schnitt im 0°-Winkel zur Bewertung der Fertigungsqualität

2.6 Herstellung von Funktionsmustern und Probekörpern mittels Additiver

Fertigung und Fügen (AP 2.2)

Die Untersuchung von miteinander zu fügenden additiv gefertigten Bauteilen erfolgte für Probekörper, die aus dem Werkstoff AlSi10Mg gefertigt wurden. Es erfolgte keine Nachbehandlung nach dem PBF-LB/M-Prozess. Die fertigungsbedingte Anisotropie wurde berücksichtigt, indem die Probekörper parallel ($\hat{=}$ liegend) und senkrecht zur Bauplattform ($\hat{=}$ stehend) gefertigt wurden. Alle Schweißversuche wurden mit Konfigurationen der additiv gefertigten AlSi10Mg-Probekörper durchgeführt. Um die Ergebnisse einordnen und Vergleiche anstellen zu können, wurden auch nichtgeschweißte Bauteile aller Konfigurationen untersucht. Tabelle 7 listet alle untersuchten Probekörper. Je Einstellung wurden drei identische Probekörper gefertigt, um eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Tabelle 7: Versuchsplan zur Untersuchung der Fügeverbindung bei Additiv-Bauteilen

Fügeverfahren	AlSi10Mg (liegend)	AlSi10Mg (stehend)
Rührreibschweißen (FSW)	Probekörper 1 Probekörper 2 Probekörper 3	Probekörper 4 Probekörper 5 Probekörper 6
Laserstrahlschweißen (LBW)	Probekörper 7 Probekörper 8 Probekörper 9	Probekörper 10 Probekörper 11 Probekörper 12
Keine Schweißung (Ref)	Probekörper 13 Probekörper 14 Probekörper 15	Probekörper 16 Probekörper 17 Probekörper 18

Zunächst wurden plattenartige Proben (siehe Abbildung 18) hergestellt, um in einem späteren Schritt die Prüfkörper in Anlehnung an DIN EN ISO 4136 herauszuarbeiten. Aus dieser Norm sowie den Vorgaben des *iwb* ergab sich eine resultierende Bauteillänge $L = 100$ mm und eine Breite $b = 18$ mm. Die Dimensionen der additiv gefertigten Platten-Probekörper betragen $200 \times 150 \times 4$ mm³ ($b \times h \times d$) sowie $150 \times 200 \times 4$ mm³ ($b \times h \times d$), sodass eine ausreichend hohe Anzahl an Probekörpern mit einer stehenden und liegenden Orientierung gefertigt und für weitere Bearbeitungsschritte zur Verfügung gestellt werden konnten.

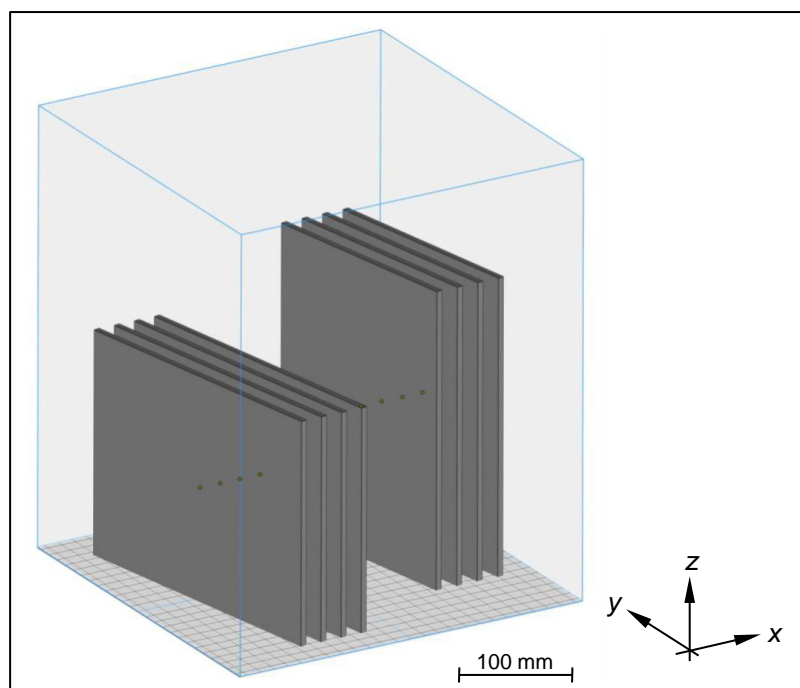


Abbildung 18: Platten für die Fügeversuche (Werkstoff: AlSi10Mg)

Alle Fügevorgänge mittels FSW wurden an dem 5-Achs-Bearbeitungszentrum MCH 250 (Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH, Deutschland) durchgeführt. Für die Schweißvorgänge wurde ein zweiteiliges Werkzeug verwendet, welches aus einem Schweißstift und einer dazugehörigen Schulter bestand. Als Ausgangspunkt für ein geeignetes Prozessfenster und eine optimale Werkzeugkonfiguration wurden Erfahrungswerte aus früheren Untersuchungen am *iwb* sowie externen Veröffentlichungen gewählt. Auf deren Grundlage wurde die Pinlänge $l_p = 3,75$ mm eingestellt. Die anderen Parameter wurden wie folgt definiert:

- Verweilzeit = 3 s
- Drehzahl = 2400 U/min
- Vorschubgeschwindigkeit = 60 mm/min
- Eintauchtiefe = 0,1 mm

Die mittels LBW erzeugten Schweißnähte entstanden an einer Laseranlage bestehend aus einem Multimode-Faserlaser, einer Strahlführung durch Lichtleitfasern, einer Laseroptik, einem Robotersystem und einer unbewegten Aufspannplatte. Bei der Laseranlage war ein Ytterbium-Faserlaser YLR-8000-R (IPG Laser GmbH, Deutschland) installiert. Die Optik konnte mittels eines sechssachsigen Robotersystems KR 60HA (KUKA Roboter GmbH, Deutschland) im Raum bewegt werden. Als Grundlage zur Bestimmung geeigneter Prozessparameter dienten die Untersuchungen von MÄKIKANGAS ET AL. (2019), bei denen eine ähnliche experimentelle Anordnung verwendet wurde. Für die Fertigung wurden die nachfolgend aufgeführten Prozessparameter genutzt:

- Leistung = 3100 W
- Vorschubgeschwindigkeit = 1200 mm/min
- Verweilzeit = 0,2 s
- Anstellwinkel = 15°

Die Ergebnisse der Schweißungen sind in Abbildung 19 veranschaulicht. Alle gefertigten FSW-Schweißnähte zeichneten sich durch ähnlich gute Nahtqualitäten aus. Die additiv gefertigten Probekörper aus dem Werkstoff AISi10Mg zeigten dagegen für das LBW eine durchgehend gleichmäßige, durchgebrochene Naht. Diese Beobachtung stimmte mit den Ergebnissen von MÄKIKANGAS ET AL. (2019) überein.

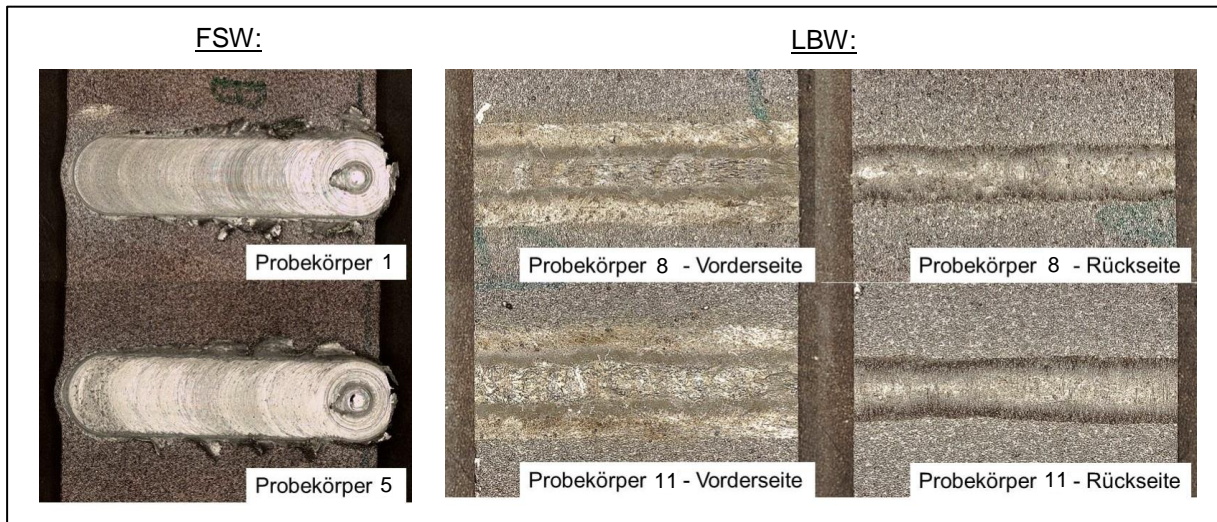


Abbildung 19: Schweißnähte auf den additiv gefertigten Bauteilen mittels FSW und LBW

Nach der Schweißung erfolgten Zugprüfungen quer zu den Schweißnähten in Anlehnung an DIN EN ISO 4136 (siehe AP 2.4). Dazu wurden mittig aus den vorliegenden Probekörpern jeweils Zugproben herausgefräst. Eine Oberflächennachbehandlung erfolgte nicht.

2.7 Strömungsoptimierte Nachbearbeitung der Bauteile (AP 2.3)

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität in den inneren Kanälen der TPMS-Strukturen wurde das Nachbearbeitungsverfahren Hirtisieren (RENA Technologies GmbH, Deutschland) angewendet. Dieses Verfahren wurde nur für ausgewählte Prüfkörper ausgeführt, da als Prozessanforderung eine Mindestwandstärke $t_{w,min} = 1,20$ mm genannt wurde. Während der Nachbearbeitung erfolgt nach Unternehmensangaben ein Materialabtrag von 0,2 – 0,3 mm. Demnach können bei zu geringen Wandstärken Löcher in der TPMS-Struktur entstehen. Um diese Grenze für dünnwandigere Strukturen zu testen, wurde auch ein SplitP-Prüfkörper unterhalb der Mindestwandstärke behandelt. In Tabelle 8 sind die Prüfkörper gelistet, die durch das Hirtisieren nachbearbeitet wurden.

Tabelle 8: TPMS-Probekörper für die Nachbearbeitung mittels Hirtisieren

TPMS-Struktur	Zellgröße s_z in mm	Durchschnittliche Wandstärke t_w in mm	Minimale Wandstärke $t_{w,min}$ in mm	Überhanglänge \ddot{U}_L in mm
SchwarzD	10,0	2,0	1,4	1,1
SplitP	10,0	2,0	0,8	2,2

Nach der Nachbearbeitung zeigte sich eine polierte Oberfläche. Die Oberflächenrauheit wurde bereichsweise um bis zu 60 % reduziert. In Bereichen mit einer erhöhten Anzahl an Poren im Konturbereich der Probekörper erhöhte sich die Oberflächenrauheit allerdings, da Poren durch den Materialabtrag freigelegt wurden.

2.8 Analyse der Fertigungsverfahren und verschiedenen Materialien (AP 2.4)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der mittels CT untersuchten TPMS-Probekörper vorgestellt, welche im Rahmen der Fertigbarkeitsuntersuchung entstanden. Zudem werden die Ergebnisse der Parameterstudie zur Reduzierung der Porosität und die Ermüdungsversuche an den gekerbten Probekörpern präsentiert. Abschließend folgen die Untersuchungen zur Gefügestruktur und den mechanischen Eigenschaften von FSW- und LBW-geschweißten Additiv-Proben.

CT-Scans von TPMS-Strukturen

Zur Erfassung der Maßhaltigkeit und Porosität der Prüfkörper-Innenstruktur wurde ein CT-Scan durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Röntgenabsorptionskoeffizienten der untersuchten Prüfkörperwerkstoffe Inconel718 und AlSi10Mg wurden individuell angepasste Parametrisierungen vorgenommen. Für den Werkstoff Inconel718 war eine höhere Spannung und Stromstärke nötig, um eine Durchdringung der Strahlung zu gewährleisten. Infolgedessen entstand eine niedrigere Auflösung. Zur Vorfilterung von niederenergetischen Strahlungen der Röntgenquelle wurde ein Kupfer-Filter verwendet. Der CT-Scan wurde für jeden Zelltyp der Prüfkörper mit der dünnsten Wandstärke und der größten Zellgröße durchgeführt, da diese für die Wärmetauscher-Anwendung besonders relevant waren.

Zur Quantifizierung der Maßhaltigkeit erfolgte ein Soll-Ist-Vergleich des CT-Scans mit dem dazugehörigen Konstruktionsmodell. Hierfür wurde eine Registrierung des CT-Modells an das Konstruktionsmodell in Form einer Best-Fit-Ausrichtungsoptimierung durchgeführt.

Die Porosität wurde mittels eines Deep-Learning-Modells (DL-Modells) in der Software *Dragonfly* quantifiziert. Es wurde für jedes eingescannte Bauteil eine manuelle Segmentierung von drei Slices des Prüfkörpers in die Bereiche Luft, Festkörper und Pore vorgenommen. Die manuell segmentierten Schichten wurden als Trainingsdaten einer DL-Netzwerk-Architektur übergeben und mit diesem ein neuronales Netzwerk trainiert. Als Resultat lag nach dem Training ein DL-Modell vor, welches mit einer Genauigkeit von mindestens 99,4 % Poren in TPMS-Prüfkörpern klassifizieren konnte. Eine ausführliche Erklärung zur Segmentierung mittels DL ist den Ausarbeitungen von GALEA ET AL. (2021) zu entnehmen.

An den Prüfkörpern aus Inconel718 wurden aufgrund des hohen Röntgenabsorptionskoeffizienten des Werkstoffs und der damit verbundenen schlechten Durchdringung keine weiteren Aufnahmen erzeugt. Um eine Durchdringung zu ermöglichen, wurde im Vergleich zu den Proben aus AlSi10Mg eine höhere Leistung eingestellt. Durch die erhöhte Leistung

entstanden vermehrt Streustrahlungen und Artefakte. Aufgrund dieser aufgetretenen Effekte war eine Auswertung nicht möglich. Deshalb werden nachfolgend die Ergebnisse der Prüfkörper aus dem Werkstoff AISi10Mg vorgestellt, für die eine Auswertung möglich war.

Die Ergebnisse zur Maßhaltigkeit sind in Tabelle 9 für die vermessenen Bauteile aus dem Werkstoff AISi10Mg dargestellt. Bei allen Bauteilen war eine zu hohe Wandstärke zu beobachten. Insbesondere der Prüfkörper SplitP (Zellgröße $s_z = 15,0$ mm und Wandstärke $t_w = 1,0$ mm) wies eine relative Abweichung von 122 % zur Soll-Wandstärke von 0,40 mm auf. Nach dem Hirtisiervorgang (nH) zeigte sich beim SchwarzD-Prüfkörper mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und Wandstärke $t_w = 2,0$ mm ein Materialabtrag von 0,5 mm. Bei dem SplitP-Probekörper mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 2,0$ mm wurde eine Abtragung von 0,3 mm ermittelt. Aus den zu massiv gefertigten Wänden resultierte bei allen Bauteilen eine Reduzierung der effektiven Kühlkanal-Abmessungen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Wandstärkenmessung für die TPMS-Probekörper aus AISi10Mg

TPMS-Struktur	Durchschnittliche Ist-Wandstärke	Durchschnittliche Soll-Wandstärke
	$t_{w,ist}$ in mm	$t_{w,soll}$ in mm
SplitP ($s_z = 15,0$ mm und $t_w = 1,0$ mm)	0,9	0,4
SplitP ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm) vH	1,6	1,0
SplitP ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm) nH	1,4	1,0
SchoenG ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm)	1,9	1,4
SchwarzD ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 1,0$ mm)	1,1	0,6
SchwarzD ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm) vH	1,8	1,4
SchwarzD ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm) nH	1,3	1,4

Die Porosität verringerte sich bei dem SplitP-Probekörper mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 2,0$ mm nach dem Hirtisieren (nH) im Vergleich zu vor dem Hirtisieren (vH) um 9,2 %. Der SchwarzD-Probekörper mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 2,0$ mm zeigte eine Erhöhung der Porosität um 1,2 %. Zusätzlich erhöhte sich bei dieser Variante die maximale Porengröße von $38 \cdot 10^{-3}$ mm³ auf $43 \cdot 10^{-3}$ mm³, womit diese Struktur die im Vergleich größten Poren besaß. Neben der erhöhten Porengröße waren bei der hirtisierten SchwarzD-TPMS-Struktur mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 2,0$ mm geöffnete Poren im Konturbereich zu erkennen.

Konfokal-Mikroskop-Aufnahmen

Die Auswertung der Oberflächenrauheit erfolgte gemäß DIN EN ISO 4288 mit einem Konfokal-Mikroskop. Es wurde der SchwarzD-Prüfkörper mit einer Zellgröße $s_z = 10,0$ mm und einer Wandstärke $t_w = 1,0$ mm mittels der Mehrfachlinienrauheit-Funktion vermessen und die Oberflächentopographie bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

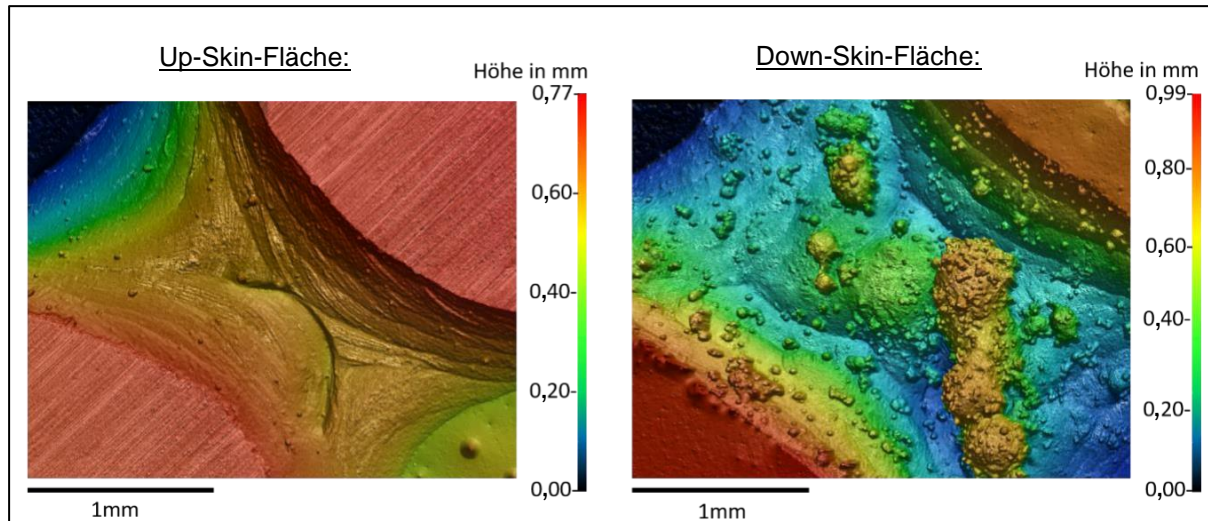


Abbildung 20: Optisch vermessene SchwarzD-Struktur ($s_z = 10,0$ mm und $t_w = 2,0$ mm)

Im Vergleich zum Datenblatt für den Werkstoff AISi10Mg der EOS GmbH (2014) mit Rauheitswerten von $Ra = 6 - 10$ μm sind an den Down-Skin-Flächen aller Prüfkörper deutlich höhere Rauheitswerte festzustellen. Für die Up-Skin-Flächen wurden hingegen Rauheitswerte im Bereich des Referenzwertes des Werkstoffdatenblatts ermittelt. Die Rauheitswerte der Up-Skin-Flächen sind auf den Treppenstufeneffekt beim PBF-LB/M-Prozess zurückzuführen.

Parameterstudie zur Laserstromstärken-Porositäts-Wechselwirkung

Zur Analyse der Porosität wurde bei der Vermessung der TPMS-Probekörper analog zum Vorgehen vorgegangen, welches für die Fertigbarkeitsuntersuchung angewandt wurde. Für die Regressionsanalyse wurde ein quadratisches Modell mit Wechselwirkungen verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt. Die zwei Belichtungsbereiche Infill und Kontur besaßen einen unterschiedlich stark ausgeprägten Einfluss auf die Porosität. Durch die Variation der Laserstromstärke in der Kontur ließ sich eine geringere Porosität erreichen als durch die Variation des Infill-Bereichs. Auch bei einer zu geringen bzw. zu hohen Laserstromstärke nahm die Porosität unabhängig vom Belichtungsbereich zu. Gemäß der Regressionsanalyse betrug die optimale Laserstromstärke für den Infill-Bereich $P_{L,\text{Infill}} = 3733$ mA und für die Kontur $P_{L,\text{Kontur}} = 3350$ mA. Für das Regressionsmodell wurde ein Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,90$ und ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß $R^2_{\text{adj}} = 0,87$ ermittelt, wodurch eine hohe Modellgüte bestätigt wird.

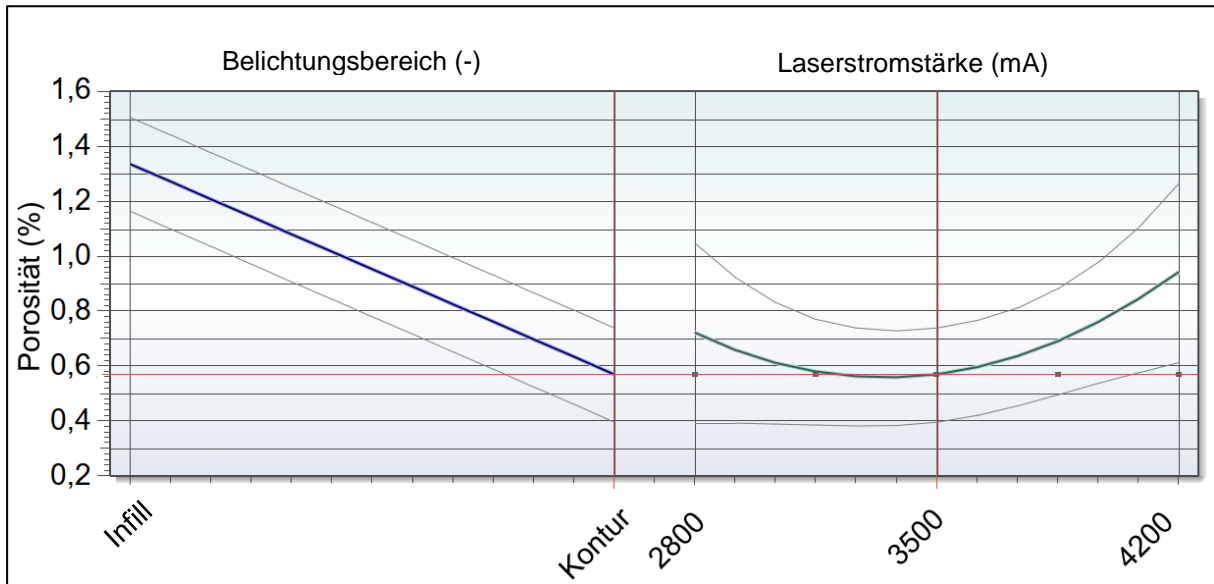


Abbildung 21: Kurvendiagramm zur Visualisierung der Abhängigkeit der resultierenden Porosität von der Laserstromstärke und dem Belichtungsbereich

Ermüdungsverhalten bei gekerbten Prüfkörpern

Zur Ermittlung der Bauteillebensdauer wurde der servo-hydraulische Ermüdungsprüfrahmen Instron 8032 mit der Steuerung Instron 8800 Digital Control verwendet. Dieser ermöglichte die Aufbringung einer maximalen Last von $100 \cdot 10^3$ N unter dynamischer Beanspruchung sowie eine maximale Prüffrequenz $f = 20$ Hz, welche abhängig von der Steifigkeit und der Masse des Prüfkörpers ist. Die Kraftaufbringung auf die Probe wurde durch eine Kraftmessdose gesteuert, welche die Kraft mit einer Frequenz von $f = 10 \cdot 10^3$ Hz aufzeichnete und die Hydraulik regelte. Die Kraftmessdose wurde auf eine Genauigkeit von ± 100 N kalibriert. Der erste Testlauf jeder Prüfkörperkerbtiefe wurde zunächst mit einer Prüffrequenz $f = 18$ Hz gestartet. Aufgrund eines zu beobachtenden Flatters wurde die Frequenz zunächst auf $f = 14$ Hz und dann weiter auf $f = 12$ Hz reduziert, sodass der festgestellte Flutter-Effekt nicht mehr vorhanden war.

Mithilfe eines MATLAB-Skripts nach BROWAEYS (2022) wurde in einer linearen Regression eine Hüllfunktion mit einer Standardabweichung $\sigma = 1$ berechnet. Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Abbildung 22 dargestellt. Infolge der eingebrachten Kerben ergab sich im Vergleich zum Referenzzustand bei einer Kerbtiefe $t_{\text{Kerbe}} = 241 \cdot 10^{-3}$ mm eine mittlere Reduzierung der Lebensdauer um 68 %. Die Ergebnisse wurden im Journal of Manufacturing Processes von GOETZ ET AL. (2024) veröffentlicht.

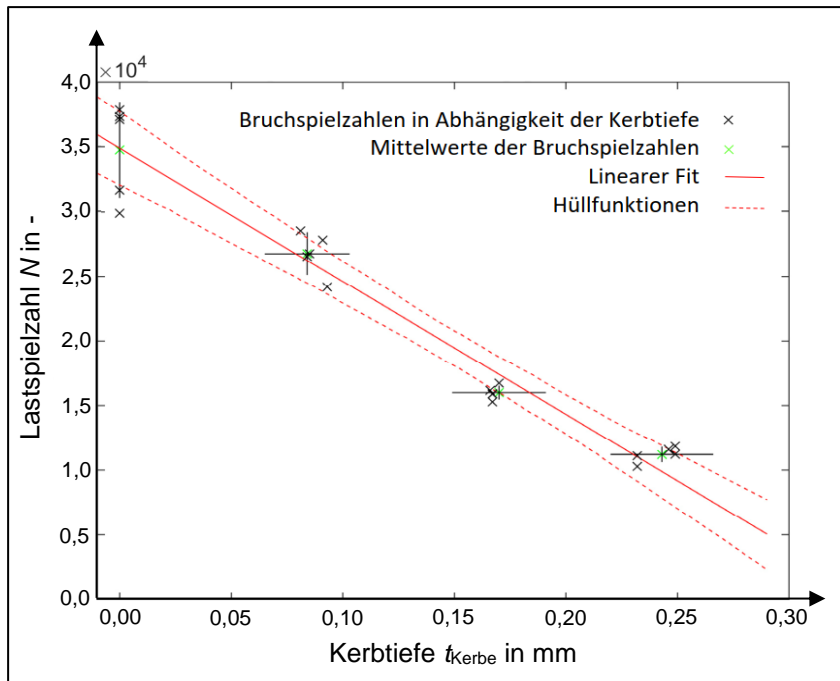


Abbildung 22: Einfluss der Schrumpflinien-Kerbtiefe auf die resultierende Lastspielzahl

Untersuchungen von FSW- und LBW-geschweißten Additiv-Proben

Zur Analyse der additiv gefertigten Probekörper (Werkstoff: AlSi10Mg) wurde das Gefüge mithilfe des Mikroskops MM-40 (Nikon Metrology GmbH, Deutschland) und der Software OmniMet (Buehler, ITW Test & Measurement GmbH European Headquarters, Deutschland) aufgezeichnet und ausgewertet. Das 3D-Profilometer VR-3100 (Keyence GmbH, Deutschland) wurde verwendet, um die Querschliffe großflächig zu dokumentieren und in einer Sichtprüfung das Gefüge im Bereich der Grundwerkstoffe wie auch den Bereichen der Schweißnähte auf ihre Beschaffenheit zu untersuchen.

Ein Querschliff eines mittels FSW bearbeiteten Additivteils wird in Abbildung 23 gezeigt. Während die sichtbaren Körner im Grundwerkstoff (GW) gut zu erkennen waren, nahm deren Größe in der thermomechanisch beeinflussten Zone (TMZ) mit sinkendem Abstand zur Schweißnahtmitte ab. Im Umfeld des Nuggets war eine Kornverfeinerung erkennbar. Das Erscheinungsbild ähnelte optisch teilweise dem des Referenzmaterials. Das asymmetrische Charakterbild des FSW wurde an einem heller gefärbtem Gefügebereich deutlich, der sich von der Gleichlaufseite (engl.: advancing side, AS) in die Nahtmitte hineinzog. In der Schweißnaht waren erheblich weniger und kleiner ausfallende Defekte als im Grundwerkstoff erkennbar.

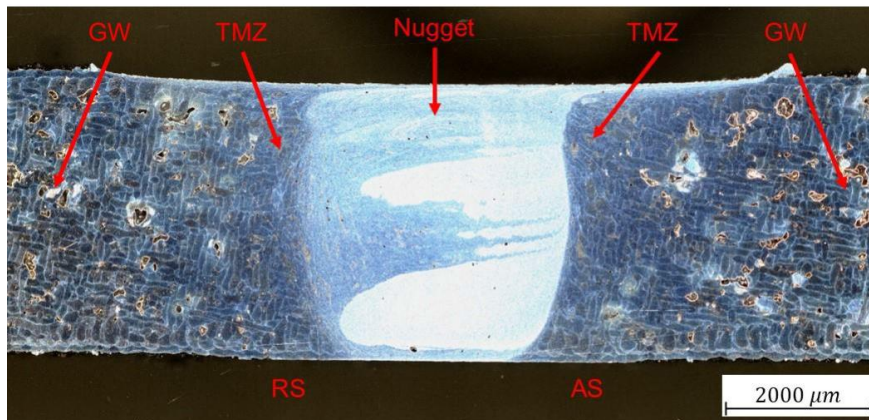


Abbildung 23: Gefüge im Bereich einer FSW-Schweißnaht

Das Erscheinungsbild einer LBW-Naht im additiv gefertigten Werkstoff wird in Abbildung 24 deutlich. Der Übergang zwischen dem GW und dem Gefüge erfolgte nicht fließend, sondern vielmehr abrupt. Die Wärmeeinflusszone (WEZ) fiel sehr schmal aus. Durch den Schweißprozess erfuhr das in der Schmelzzone (SZ) liegende Metall eine deutlich erkennbare Kornverfeinerung. Gleichzeitig war eine Zunahme und ein Wachstum von Poren im Bereich der Schweißnaht deutlich. Eine mögliche Ursache hierfür könnten in der Schmelze gelöste Gase gewesen sein, die bei der Abkühlung des aufgeschmolzenen Materials eingeschlossen wurden (BEHLER ET AL., 1987).

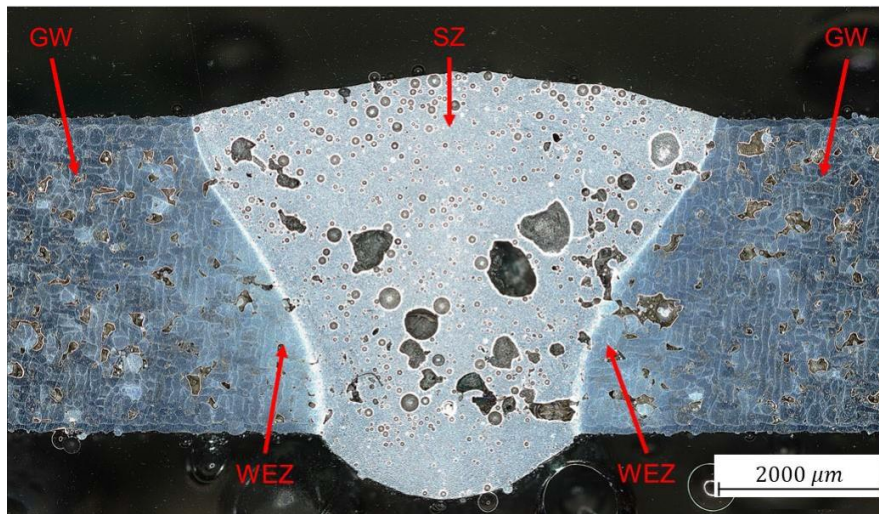


Abbildung 24: Gefüge im Bereich einer LBW-Schweißnaht

Die Probekörper (siehe AP 2.2) wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 4136 im Querkzugversuch auf mechanische Kennwerte geprüft. Dazu wurde das Prüfgerät Z050 (ZwickRoell GmbH & CO. KG, Deutschland) verwendet. Alle Versuche erfolgten bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1 bei langsam und stetig steigender Beanspruchung (weggesteuerte Versuchsführung) und einer Prüfgeschwindigkeit von $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Das Ergebnis der mechanischen Prüfung ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der mechanischen Zugprüfung für die FSW- und LBW-Proben

Probekörper-Nr.	1	4	7	10	13	16
	2	5	8	11	14	17
	3	6	9	12	15	18
Werkstoff	Liegend	Stehend	Liegend	Stehend	Liegend	Stehend
Fügeverfahren	FSW	FSW	LBW	LBW	Ref	Ref
E-Modul in 10 ³ MPa	16,6	14,7	15,3	14,7	16,7	14,9
	16,4	15,3	15,8	14,9	16,1	14,9
	16,6	15,2	16,7	14,9	16,8	14,9
Dehngrenze in MPa	95	95	97	98	105	89
	101	96	101	96	97	89
	102	102	101	97	96	91
Zugfestigkeit in MPa	272	202	193	182	338	243
	257	207	202	269	324	240
	240	192	167	159	346	242
Gleichmaßdehnung in %	1,36	1,01	0,89	0,81	2,05	1,23
	1,14	0,87	0,82	0,79	1,88	1,17
	0,97	0,74	0,66	0,74	1,83	1,23

Die ermittelten Größen der E-Module und Dehngrenzen wichen nur geringfügig voneinander ab. Größere Abweichungen bestanden bei den Zugfestigkeiten und Werten der Gleichmaßdehnung, wobei Proben des Referenzzustands höhere Werte erreichten. Nachfolgend sind wesentliche allgemeingültige Erkenntnisse bezüglich des Fügens der additiven Probekörper zusammengefasst:

- Beim FSW liegen im Vergleich zum LBW im Zugversuch höhere Spannungen und Längungen vor.
- Für Bauteile, deren Aufbaurichtung orthogonal zur Längsachse verläuft, ist das FSW besser geeignet als das LBW.
- Für Bauteile, deren Aufbaurichtung parallel zur Längsachse verläuft, ist das FSW besser geeignet als das LBW.

Die Zugprüfung zeigte bei Bauteilen des Referenzwerkstoffes größere Längungen sowie höhere anliegende Spannungen bis zum Versagen als bei Additivteilen.

Extern gefertigte TPMS-Probekörper

Die durch das Unternehmen Materialise GmbH (Deutschland) gefertigten Probekörper (siehe AP 2.1) wurden auf Pulverrückstände untersucht. Eine vollständige Pulverentfernung nach der Fertigung der Bauteile war notwendig, damit während des Wärmetauscher-Betriebs keine Metallpartikel den Wankelmotor des Flugzeugs oder andere Anbaubauteile verschleifen. Die Ermittlung von Pulverresten innerhalb der Probekörper wurde durch eine Sichtprüfung nachgewiesen.

Der Schnitt erfolgte im 0°-Winkel (siehe Abbildung 17) und 45°-Winkel (siehe Abbildung 25) mit dem Abrasiv-Trennschneider AbrasiMatic 300 (Buehler, ITW Test & Measurement GmbH European Headquarters, Deutschland) und der Trennscheibe 103012P, welche für Aluminiumlegierungen geeignet ist. Der Schnitt wurde mit einem gepulsten Modus und einem Vorschub von 0,6 mm/s in das Bauteil eingebracht.

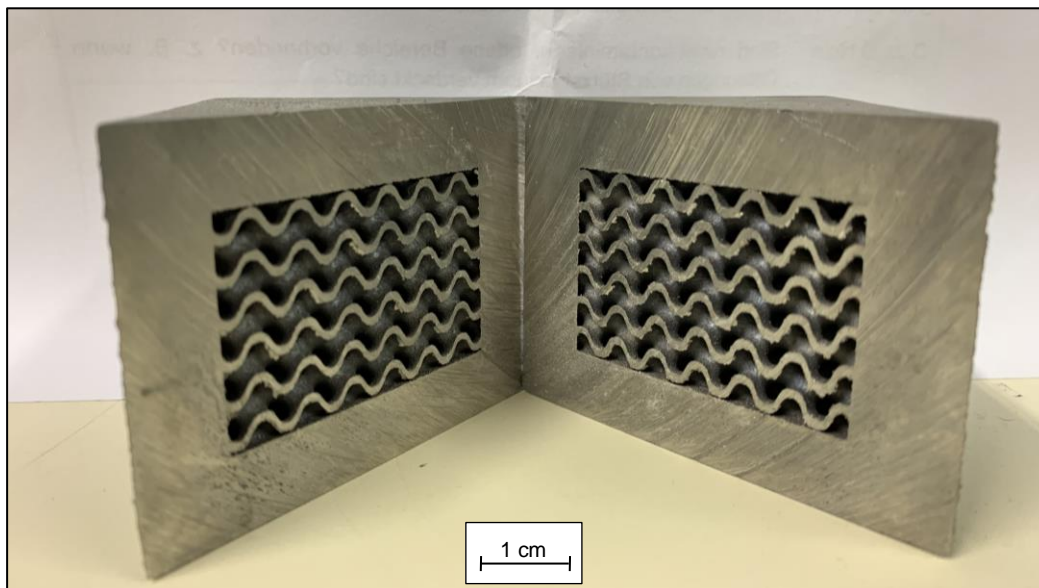


Abbildung 25: Darstellung eines extern gefertigten Probekörpers mit einer implementierten SchwarzD-TPMS-Füllstruktur; 2D-Schnitt im 45°-Winkel für die Bewertung der Fertigungsqualität

Für die Schnitte im 0°-Winkel und 45°-Winkel wurden jeweils keine Pulverrückstände innerhalb der Strukturen identifiziert. Zusätzlich dazu wurden keine Fehlstellen, z. B. Risse oder Löcher, in den TPMS-Füllstrukturen detektiert.

2.9 Qualitätssicherung des Fertigungsprozesses (AP 2.5)

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Dichtigkeitsprüfungen an den TPMS-Prüfkörpern und an dem gefügten Fluid-Einlass (siehe AP 2.1) präsentiert. Zudem werden die Ergebnisse aus der Prüfung der Fügeverbindung von dem Fluid-Stutzen und dem Fluid-Einlass vorgestellt.

Dichtigkeitsprüfung an TPMS-Prüfkörpern

Die Arbeit von PENG ET AL. (2019) zeigte, dass sich eine Dichtigkeitsprüfung für die vorzeitige Identifikation von Wärmetauscher-Prüfkörpern eignet, bei denen die Funktionalität der Fluidtrennung nicht erfüllt wird. Der Versuchsaufbau für die Dichtigkeitsprüfung ist in Abbildung 26 dargestellt. Zur Durchführung wurde Wasser druckbehaftet über einen Schlauch und einer Trichter-Verbindung in die TPMS-Struktur eingeleitet. Um eine Dichtigkeit zwischen der Verbindung des Trichters und der TPMS-Struktur zu gewährleisten, wurden Flachdichtungen eingesetzt.

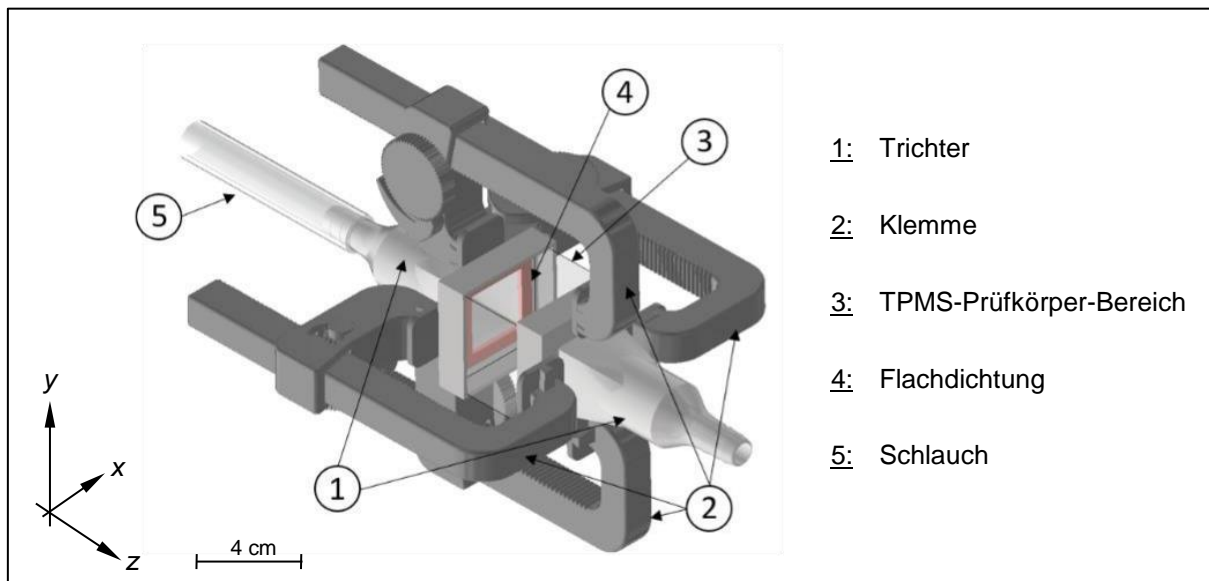


Abbildung 26: Versuchsaufbau für die Dichtigkeitsprüfung

Zur Auswertung der Dichtigkeitsprüfung wurde ermittelt, ob aus den seitlichen Kanälen der Prüfkörper Wassertropfen austreten. In der ersten Testreihe wurde von jedem Zelltyp und jeder Zellgröße der Prüfkörper mit der dünnsten Wandstärke getestet. Alle Prüfkörper bestanden den wasserdruckbehafteten Dichtigkeitstest. Infolgedessen wurden auch die restlichen TPMS-Prüfkörper mit jeweils größeren Wandstärken als dicht eingestuft.

Prüfung der Dichtigkeit und Fügeverbindung für den Fluid-Einlass

Um das heiße Fluid (Wasser-Glykol-Gemisch) in den Wärmetauscher einzuleiten, wurde aus fertigungstechnischen Gründen ein spanend gefertigter Stutzen genutzt, welcher an den Fluid-Einlass gefügt wurde. Die Bauteile sind in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt. Für die Fügeverbindung wurden sowohl eine Klebeverbindung als auch eine Schraubverbindung untersucht. Eine LBW-Fügeverbindung wurde aufgrund der hohen finanziellen Kosten zur Parameterfindung, welche sich durch den notwendigen experimentellen Aufwand ergeben hätten, nicht weiter verfolgt.

Die ursprünglich gefertigten Prüfkörper wiesen im Bereich der Fügeverbindung eine geringe Maßhaltigkeit auf, wodurch der Stutzen nicht in die vorgesehene Fügeposition eingesetzt werden konnte. Dieses Maß wurde durch eine spanende Fräsbearbeitung korrigiert, indem der tropfenförmige Bereich des Fluid-Einlasses mit einer Toleranz von +0,1 mm relativ zu der maximalen Stutzen-Abmessung nachbearbeitet wurde. Nachfolgend werden die untersuchten Fügeverbindungen zwischen dem Stutzen und dem Fluid-Einlass, die Klebeverbindung und die Schraubverbindung, vorgestellt.

Die Fügeverbindung erfolgte mit dem Klebstoff DELO-DUOPOX® SJ8665 (DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, Deutschland) und einer Dosierpistole zur Aufnahme einer Doppelkartusche. Dies gewährleistete eine präzise und gleichmäßige Vermischung der zwei Komponenten des Klebstoffs. Vor dem Aufbringen des Klebstoffs wurden die Fügeoberflächen mit Isopropanol gereinigt und anschließend mit Schleifpapier aufgeraut, um eine bessere Benetzung des Klebstoffs zu ermöglichen. Sowohl die Oberfläche des Fluid-Einlasses als auch die Oberfläche des Stutzens wurden jeweils mit dem Klebstoff benetzt und die Bauteile anschließend gefügt. Um die Verbindung während des Aushärtungsprozesses in der vorgesehenen Position zu halten, wurden die Bauteile mit einer Schraubzwinde und einem Holzstück geklemmt. Die Aushärtung bis zur Endfestigkeit dauert bei Raumtemperatur nach Angaben des Herstellers etwa sieben Tage, weshalb die Klemme nach acht Tagen entfernt wurde.

Für die Schraubverbindung wurden M4-Gewindebohrungen nach der Bauteilfertigung spanend eingebracht. Dadurch konnten eine hohe Qualität und die exakte Positionierung der Gewindebohrungen sichergestellt werden. Zwischen dem Stutzen und dem Fluid-Einlass wurde zur Abdichtung der Fügeverbindung eine individuell gefertigte Silikondichtung, die durch den Projektpartner ADV zur Verfügung gestellt wurde, verwendet. Diese Silikondichtung besaß die gleiche Geometrie wie die Grundplatte des Stutzens und ermöglichte eine optimale Passform. Mithilfe von vier M4-Innensechskantschrauben wurde der Stutzen fest verschraubt. Es wurden zusätzlich Unterlegscheiben ISO 7092-4-300 HV angewendet. Der gefügte Stutzen für die Schraubverbindung ist in Abbildung 27 dargestellt.

Die Bewertung der Fügeverbindungen erfolgte hinsichtlich zweier Aspekte: Einerseits lag der Fokus auf der Dichtigkeit der Verbindungen, da diese für die Anwendung eine grundlegende Anforderung darstellt. Andererseits war die mechanische Belastbarkeit der Fügeverbindung ein wichtiges Kriterium, um die Belastungen im Flugbetrieb und die Notlandelasten (siehe Anforderungsliste aus AP 1.1) aufnehmen zu können.

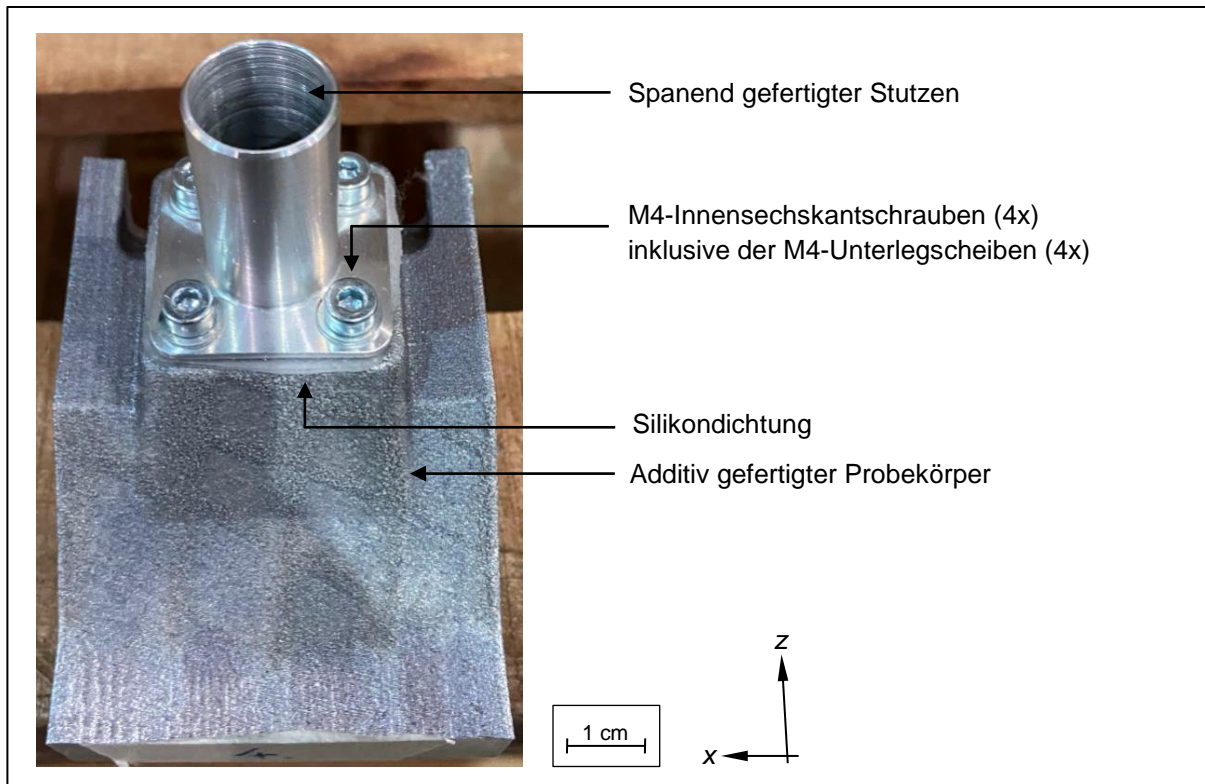


Abbildung 27: Darstellung der Schraubverbindung zwischen dem mittels PBF-LB/M additiv gefertigten Fluid-Einlass-Probekörper und dem spanend gefertigten Stutzen

Für die Dichtigkeitsprüfung wurde ein experimenteller Aufbau entworfen, welcher in Abbildung 28 dargestellt ist. Es wurden eine Abdeckung zum Verschluss der Struktur und ein Trichter zum Wasser-Abfluss konstruiert, welche jeweils an den offenen Seiten des Probekörpers angebracht wurden.

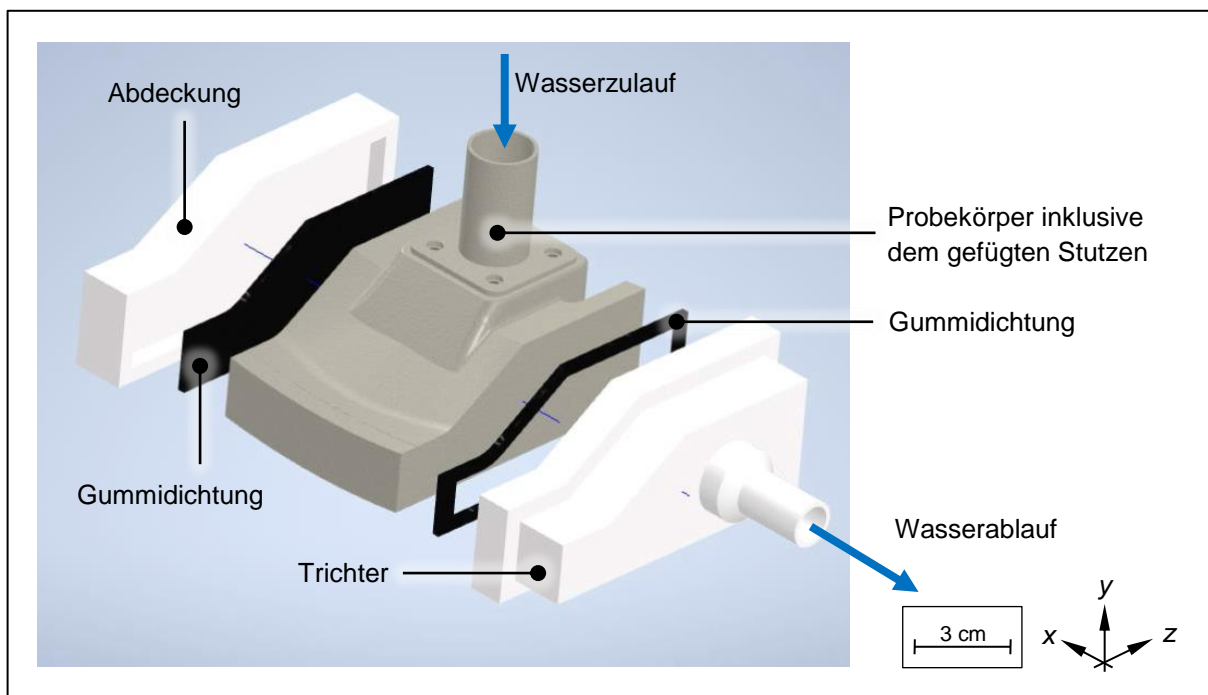


Abbildung 28: Schematische Darstellung der verwendeten Komponenten für die Dichtigkeitsprüfung der Fügeverbindung zwischen dem Fluid-Einlass-Probekörper und dem spanend gefertigten Stutzen

Um die Dichtigkeit zwischen den Bauteilen sicherzustellen, wurde zwischen der Abdeckung, dem Trichter und dem Fluid-Einlass-Prüfkörper jeweils eine Gummidichtung eingelegt. Die Abdeckung und der Trichter wurden aus dem Kunstharz Formlabs White 2 Resin (Formlabs GmbH, Deutschland) mithilfe des selektiven Lasersinterns additiv gefertigt. Die Prüfungen wurden je Prüfkörper zwei Mal nacheinander für jeweils eine Minute wiederholt.

Bei der Klebeverbindung wurden keine Wassertropfen während des Experiments festgestellt, sodass der Prüfkörper die Dichtigkeitsprüfung bestand. Die Schraubverbindung zeigte im Bereich der Silikondichtung sichtbare Wassertropfen auf der Außenfläche des Prüfkörpers. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Silikondichtung infolge der Schraubverbindung gequetscht und damit eine Durchlässigkeit für das Wasser begünstigt wurde. Auf Basis der Erkenntnisse wurde die Schraubverbindung im Gegensatz zur Klebeverbindung nicht für den Einsatz im Wärmetauscher empfohlen.

Die Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit der zwei Fügeverbindungen erfolgte unter Zugbelastung. Um den Prüfkörper in eine Zugprüfmaschine einspannen zu können, wurde eine Vorrichtung konstruiert, welche in Abbildung 29 dargestellt ist.

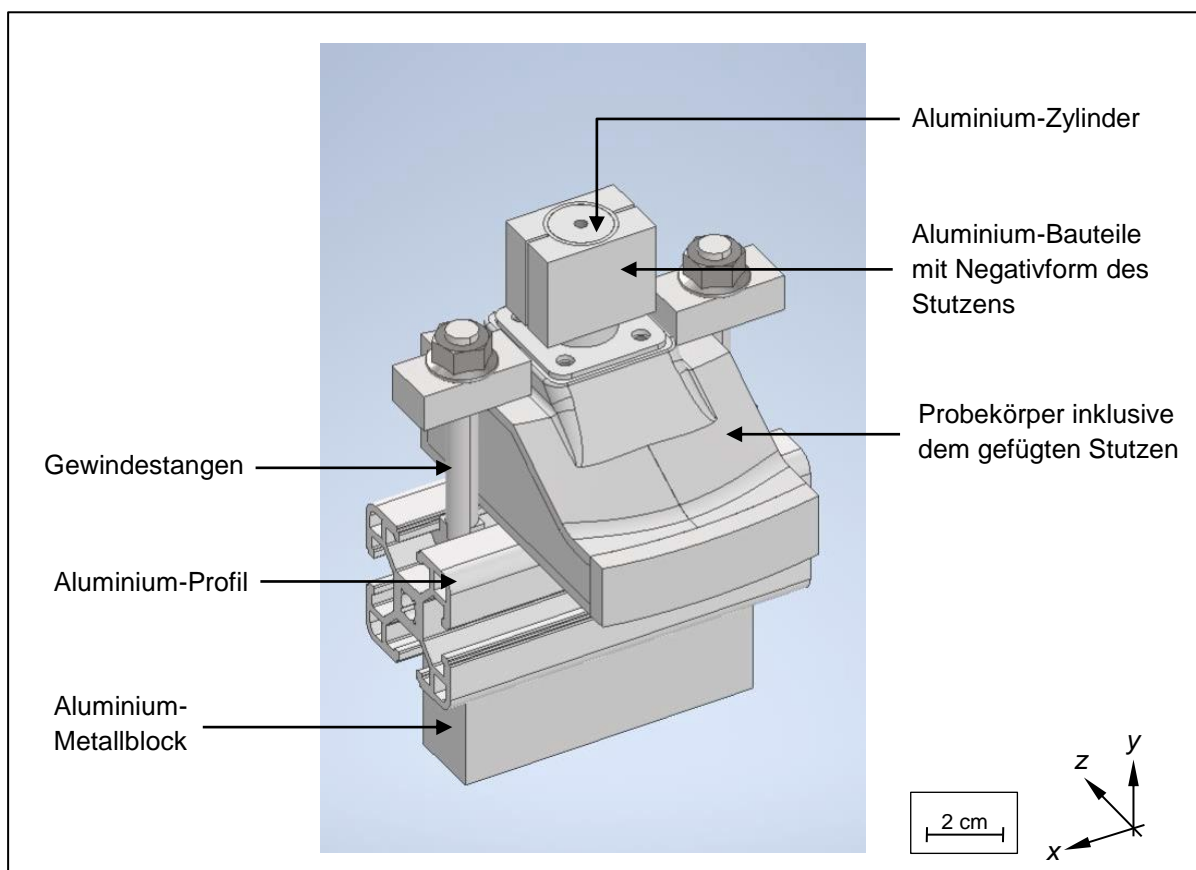


Abbildung 29: Schematische Darstellung der Komponenten für die Prüfung der mechanischen Belastbarkeit der entsprechenden Fügeverbindung zwischen dem Fluid-Einlass-Probekörper und dem spanend gefertigten Stutzen

Die Vorrichtung bestand aus einem Aluminium-Profil ($40 \times 40 \times 100 \text{ mm}^3$), das auf einem spanend bearbeiteten Aluminium-Metallblock aufgeschraubt wurde. Auf dem Aluminium-Profil wurde der Probekörper mithilfe von zwei Gewindestangen und zwei Aluminium-Blechen fixiert. Der Stutzen wurde durch zwei zerspannte Aluminium-Profile, welche die Negativform des Stutzens besaßen, umgeben. Damit der Stutzen in der Einspannung nicht gequetscht wird, wurde in den Stutzen während der mechanischen Prüfung ein spanend bearbeiteter Aluminium-Zylinder eingesetzt.

Für die Zugprüfung wurde die Zugprüfmaschine vom Typ Z050 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Deutschland) mit einer $50 \cdot 10^3 \text{ N}$ -Kraftmessdose verwendet. Die pneumatischen Spannbacken wurden mit einer Kraft von $20 \cdot 10^3 \text{ N}$ vorgespannt und anhand der Prüfnorm DIN EN ISO 6892-1 der Versuch mit einer Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ durchgeführt. Um einen stabilen Belastungszustand vor der Prüfung zu erreichen, wurde der Aufbau mit einer Vorkraft von 20 N initial belastet. Die Dehnung wurde anhand des Traversenwegs ermittelt.

Für die Klebeverbindung wurde eine vorhandene Fügefläche $A_{\text{Kleben}} = 64,0 \text{ mm}^2$ ermittelt. Die maximale Zugspannung während der Zugprüfung betrug $\sigma_{\text{max,Kleben}} = 22,8 \text{ MPa}$. Dies führte zu einer maximal ertragbaren Kraft $F_{\text{max,Kleben}} = 1461,0 \text{ N}$ vor dem Versagen der Fügestelle. Für die Schraubverbindung wurde die vorhandene Fügefläche aus den Querschnitten der vier verwendeten M4-Schrauben zu $A_{\text{Schrauben}} = 50,2 \text{ mm}^2$ ermittelt. Während der Prüfung begann der Prüfkörper bei einer Spannung $\sigma_{\text{Schrauben}} = 101,5 \text{ MPa}$ und einer Dehnung von $2,1 \%$ zu rutschen. Es konnte keine weitere Last aufgenommen werden. Es resultierte eine maximale Zugkraft $F_{\text{max,Schrauben}} = 5093,9 \text{ N}$ für die Schraubverbindung. In Abbildung 30 sind die Ergebnisse bis zu einer Dehnung von $1,0 \%$ dargestellt.

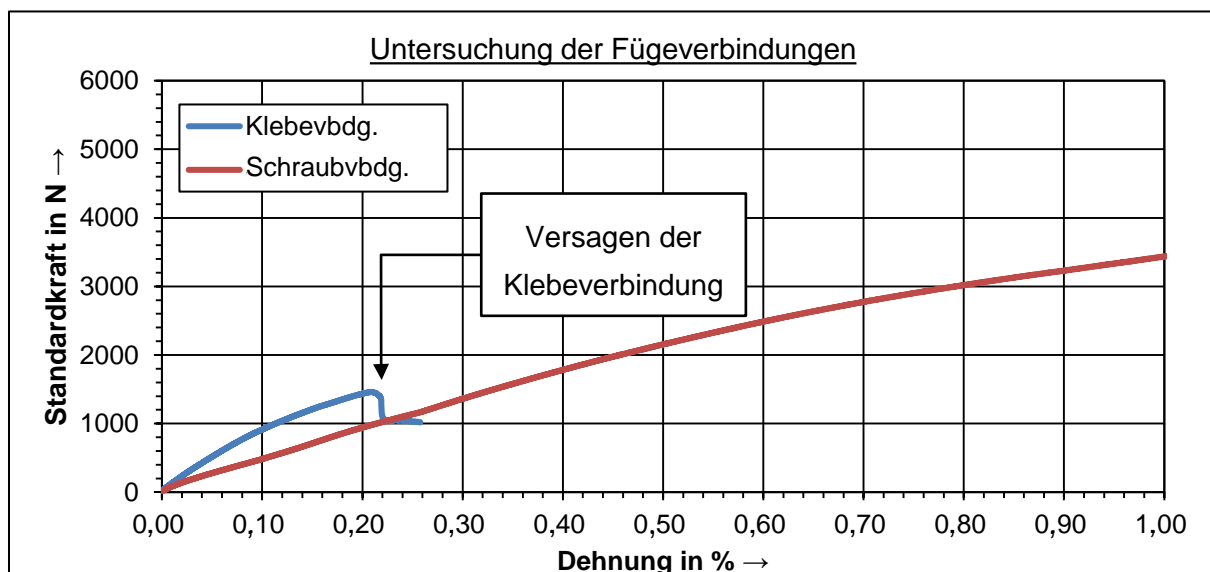


Abbildung 30: Ergebnisse der mechanischen Zugprüfung für die Klebeverbindung und Schraubverbindung zwischen dem Fluid-Einlass-Probekörper und dem spanend gefertigten Stutzen bis zu einer Dehnung von $1,00 \%$

Unter Berücksichtigung der in der Anforderungsliste (siehe AP 1.1) definierten Lastvielfachen für den Flugbetrieb und die Notlandung wurde eine kritische Kraft $F_{\text{krit}} = 118,6 \text{ N}$ ermittelt, welcher die Fügeverbindung standhalten muss. Es wurden die Kühlmittelmasse im Fluid-Schlauch und die Eigenmasse des Schlauchs berücksichtigt.

Für die Klebeverbindung wurde die relevante Kraft aus dem Verhältnis der tatsächlich maximal ertragbaren Spannung $\sigma_{\text{max,Kleben}}$ und der Soll-Spannung $\sigma_{\text{soll,Kleben}}$ gemäß des Datenblatts des Herstellers sowie dem Fügequerschnitt zu

$$F_{\text{Kleben}} = \sigma_{\text{max,Kleben}} / \sigma_{\text{soll,Kleben}} * \sigma_{\text{Zugscherfestigkeit,Kleben}} * A_{\text{Kleben}} \\ = 22,8 \text{ MPa} / 46,0 \text{ MPa} * 32,0 \text{ MPa} * 64,0 \text{ mm}^2 = 1016,3 \text{ N}$$

ermittelt. Somit resultierte für die Klebeverbindung an dem Fluid-Einlass ein Sicherheitsfaktor $SF_{\text{Kleben}} = 1016,3 \text{ N} / 118,6 \text{ N} = 8,6$. Folglich konnten die Lastvielfachen während des Flugs durch die Klebeverbindung aufgenommen werden.

Die Schraubenverbindung besaß vergleichsweise eine deutlich höhere Lastaufnahme, woraus ebenfalls ein höherer Sicherheitsfaktor $SF_{\text{Schrauben}} = 5093,9 \text{ N} / 118,6 \text{ N} = 42,9$ resultierte. Hingegen zeigte die Dichtigkeitsprüfung bei der Schraubverbindung eine Durchlässigkeit für die vorhandene Silikondichtung. Die Schraubverbindung erforderte zudem einen höheren Werkstoffeinsatz während des PBF-LB/M-Prozesses, um entsprechend Material für die Gewindebohrungen zur Verfügung zu haben. Dies resultierte in einer Massenzunahme im Vergleich zur Klebeverbindung. Zusätzlich erforderte die Schraubenverbindung einen höheren Nachbearbeitungsaufwand, weil die Gewindebohrungen nach dem PBF-LB/M-Prozess in den Wärmetauscher eingebracht werden mussten (WITTEL ET AL. 2021, S. 103). Die Klebung ermöglichte die Verbindung sehr dünner Fügeile, wobei die Klebefläche nicht von außen zugänglich sein musste (NIEMANN ET AL. 2019, S. 229).

Für die Fertigung des Wärmetauschers (siehe AP 3.1) wurde aufgrund der erzielten Ergebnisse die Klebe-Fügeverbindung als geeignet gewählt.

2.10 Fertigung von Demonstratorbauteilen (AP 3.1)

Aufgrund der hohen Umrüstungskosten für die bestehende PBF-LB/M-Anlage EOS M400-1 wurde als kostengünstigere Alternative die Fertigung der drei Wärmetauscher-Segmente bei dem externen Dienstleister Materialise GmbH gewählt (siehe bewilligte Mittelumwidmung vom 06.04.2023). Für die Fertigung wurden dem Unternehmen die fertigungsgerechten Designs in einem STL-Dateiformat mit einer Dateigröße $< 1 \text{ GB}$ je Wärmetauscher-Segment übergeben. Die Fertigung mittels PBF-LB/M erfolgte aus dem Aluminium-Werkstoff AlSi10Mg mit einer Schichtstärke von $0,06 \text{ mm}$ und sogenannten Performance-Einstellungen. Nach der Fertigung wurde eine Pulverentfernung durchgeführt und die Oberfläche der drei Wärmetauscher-Segmente korundgestrahlt, um angehaftete Pulverpartikel zu entfernen.

Zwei der drei Wärmetauscher-Segmente wurden zunächst mit Beschädigungen angeliefert, welche infolge des Versands der Bauteile erfolgten. Daher wurden diese erneut gefertigt und versendet. Die defekten Wärmetauscher-Segmente konnten aufgrund des Einsatzes in einem sicherheitskritischen Umfeld, dem Forschungsflugzeug, nicht verwendet werden und dienen zukünftig als Demonstratoren für das Forschungsprojekt. In Abbildung 31 ist das vordere Wärmetauscher-Segment mit einem $\frac{3}{4}$ -Schnitt exemplarisch gezeigt.

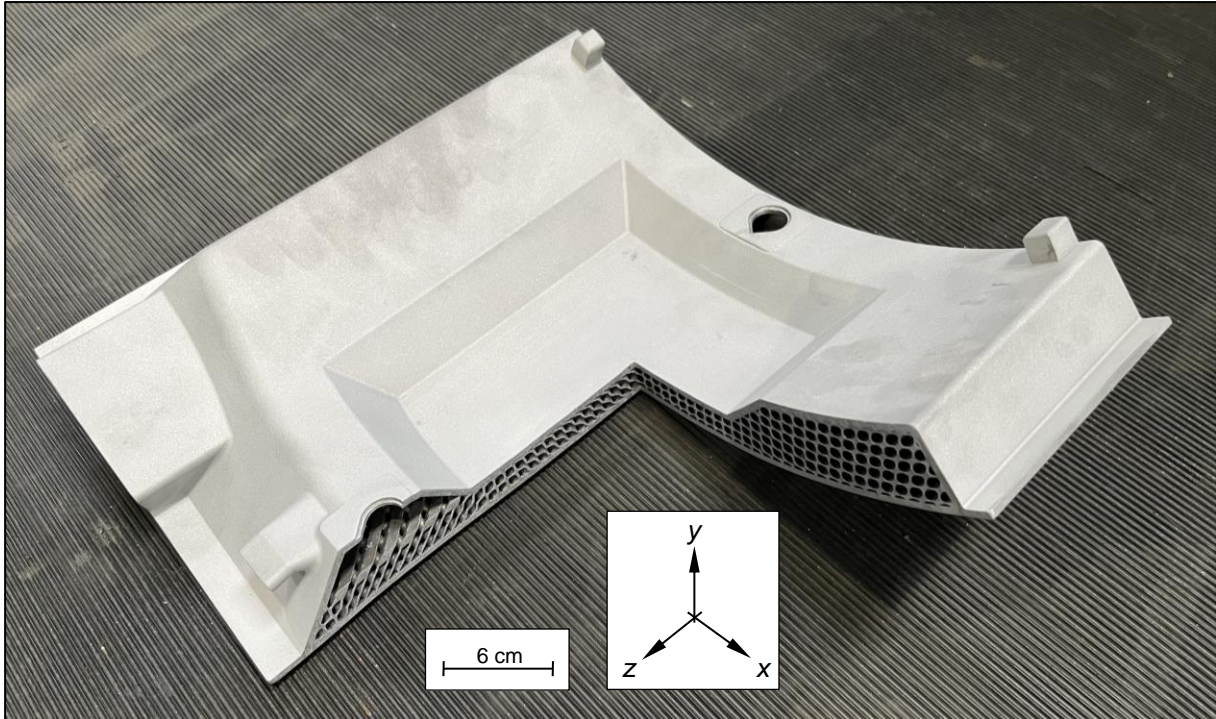


Abbildung 31: Extern durch den Fertigungsdienstleister Materialise GmbH gefertigtes vorderes Wärmetauscher-Segment; Einbringung eines $\frac{3}{4}$ -Schnitts zur Veranschaulichung der integrierten SchwarzD-TPMS-Füllstrukturen

Nach der Fertigung mittels PBF-LB/M wurden die einzelnen Wärmetauscher-Segmente spanend nachbearbeitet, um die Durchgangs- und Gewindebohrungen zur Verschraubung der einzelnen Segmente herzustellen. In Abbildung 32 sind die drei Wärmetauscher-Segmente in dem zusammengebauten Zustand veranschaulicht.

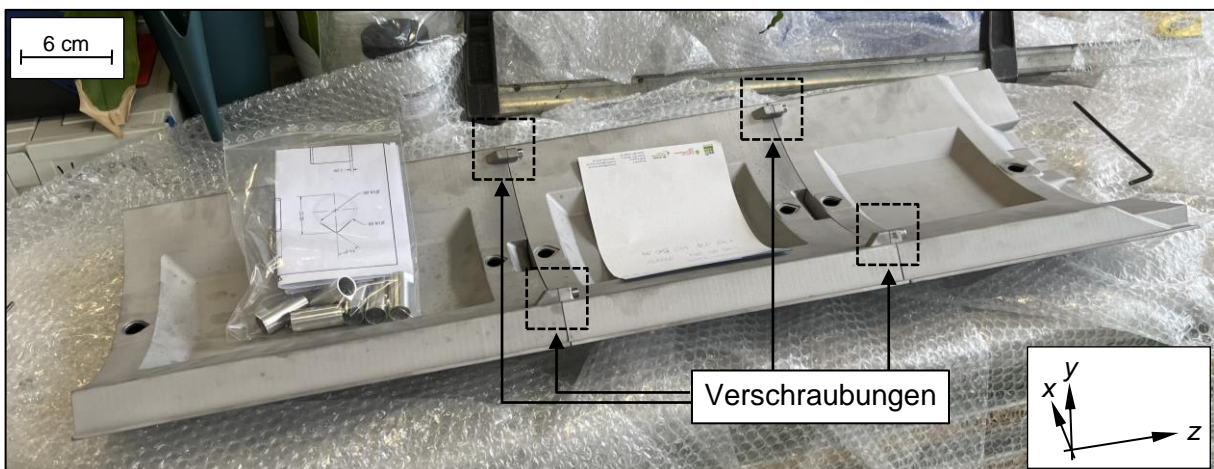


Abbildung 32: Zusammenbau der drei extern gefertigten Wärmetauscher-Segmente

Um die Umgebungsluft (kaltes Fluid) in die aufeinanderfolgenden Wärmetauscher-Segmente zu überführen, wurden Steck-Verbindungselemente konstruiert. Diese wurden in den Luftkanal eingelegt. Die Fertigung dieser faserverstärkten Kunststoff-Verbindungselemente erfolgte durch den Projektpartner ADV. Der Werkstoff hält Temperaturen $> 100\text{ °C}$ stand.

Die Klebe-Fügeverbindung zwischen dem spanend gefertigten Stutzen und den einzelnen Wärmetauscher-Segmenten erfolgte analog zu dem Vorgehen für den Fluid-Einlass-Probekörper (siehe AP 2.5). Das fertiggestellte vordere Wärmetauscher-Segment ist in Abbildung 33 dargestellt.

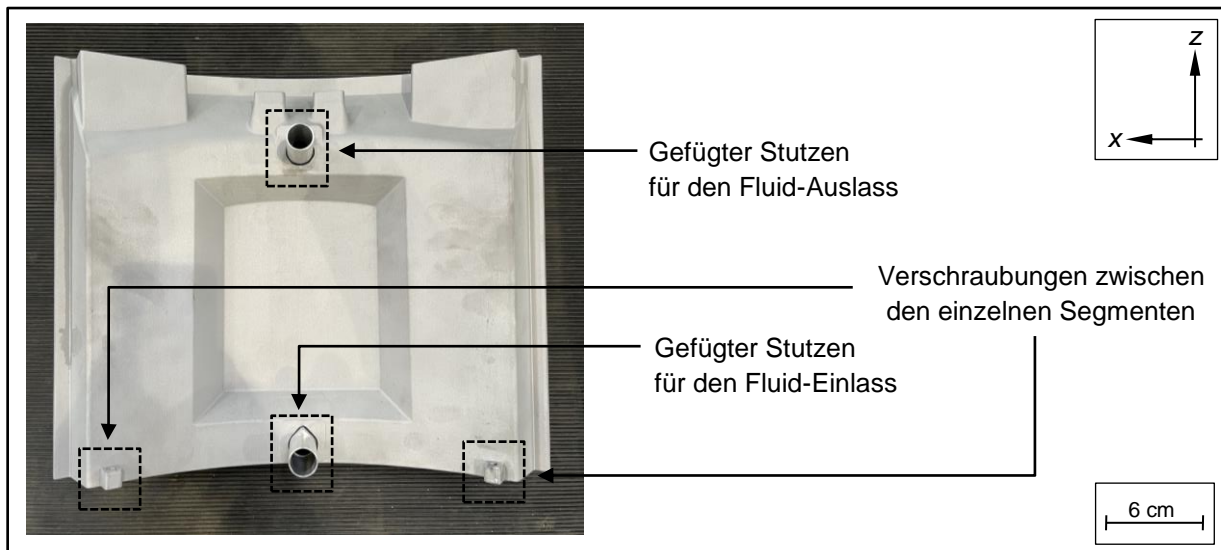


Abbildung 33: Fertiggestelltes vorderes Wärmetauscher-Segment mit den gefügten Stutzen und den eingebrachten Bohrungen für die Verschraubung mit den anderen Segmenten

Die Gesamtmasse des Wärmetauschers betrug $m_{\text{ges}} = 9,20\text{ kg}$. Diese setzte sich aus den einzelnen Wärmetauscher-Segmenten zusammen, die jeweils eine Masse $m_{\text{vorne}} = 2,95\text{ kg}$ (vorderes Segment), $m_{\text{mitte}} = 2,90\text{ kg}$ (mittleres Segment) und $m_{\text{hinten}} = 3,35\text{ kg}$ (hinteres Segment) besaßen. Um die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers zu erhöhen, sollte dieser im Gegenstrom betrieben werden. Hierfür musste der Einlass des Kühlmittels an dem unteren Stutzen und der Auslass des Kühlmittels an dem oberen Stutzen des jeweiligen Wärmetauscher-Segments erfolgen. Dadurch strömte das Kühlmittel entlang der positiven z-Koordinate, während die dem Wärmetauscher zugeführte Luft entgegen der z-Richtung einzuleiten war.

Alle drei Wärmetauscher-Segmente wurden sowohl für die experimentelle Validierung (siehe AP 3.2) als auch zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und der Umweltfreundlichkeit (siehe APs 4.1 und 4.2) an den Projektpartner ADV übergeben.

2.11 Praxisversuche im Testflugzeug (AP 3.2)

Die gefertigten Wärmetauscher-Segmente (siehe AP 3.1) sollten zur experimentellen Validierung in das Plugin-Hybrid-Forschungsflugzeug der ADV eingebaut werden. Vor der Erprobung im Testflug sollte der Wärmetauscher auf dem Labor-Prüfstand getestet werden. Hierfür wurde ein Prüfstand-Konzept zusammen mit der ADV definiert, welches anhand eines der sechs extern gefertigten Prüfkörper (siehe AP 2.1) erprobt wurde. Der Aufbau zur Aufnahme des repräsentativen Prüfkörpers ist in Abbildung 34 veranschaulicht.

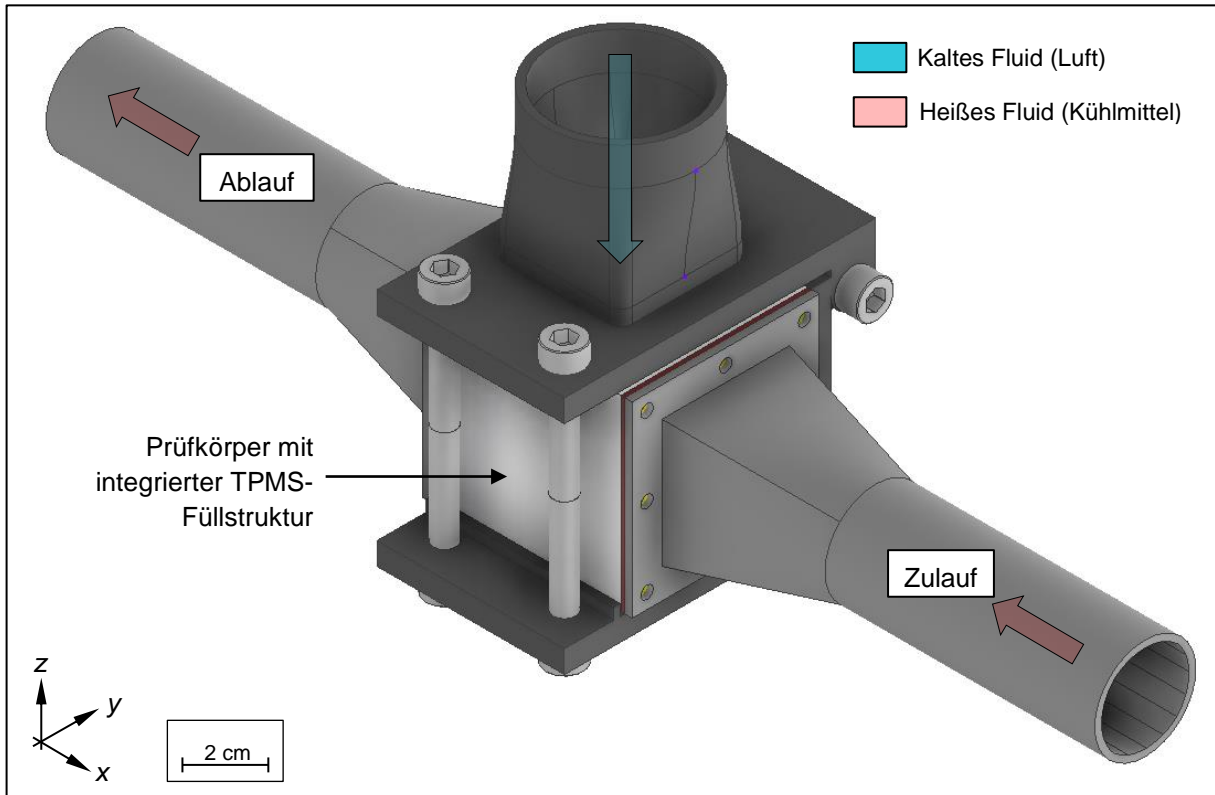


Abbildung 34: Experimenteller Aufbau für einen Prüfstand bei der ADV zur Messung der abgeführten Wärmeleistung durch die gewählte SchwarzD-TPMS-Füllstruktur

In dem experimentellen Aufbau konnte ein Prüfkörper mit den geometrischen Abmessungen von $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ und einer integrierten TPMS-Füllstruktur eingelegt werden. Über die trichterförmige Komponente erfolgte die Zufuhr des heißen Fluids (Wasser-Glykol-Kühlmittel), welches aus dem Wankelmotor ausgeleitet wird. Um einen Austritt des heißen Fluids (Kühlmittel) zu vermeiden, wurde zwischen dem Zulauf- und Ablauf-Trichter und dem Prüfkörper jeweils eine Dichtung platziert. Die Trichter wurden mithilfe von acht M3-Schrauben je Seite über die Gewindebohrungen im Prüfkörper befestigt. Über den verbleibenden Zulauf erfolgte die Zufuhr des kalten Fluids (Luft) in den Prüfkörper, der nach Angaben der ADV mit einem Gebläse angeströmt wurde.

Die spanende Nachbearbeitung der Prüfkörper und der Zusammenbau des experimentellen Aufbaus gemäß Abbildung 34 erfolgten am *iwb*. Der Aufbau wurde für die weiteren Untersuchungen an die ADV übergeben.

Die Temperaturmessung erfolgte vor dem Zulauf bzw. nach dem Ablauf des heißen Fluids (Kühlmittel) mithilfe eines Temperatursensors. Zusätzlich sollte auch vor dem Zulauf des kalten Fluids (Luft) die Temperatur durch einen geeigneten Sensor ermittelt werden. Der Durchfluss des heißen Fluids (Kühlmittel) war vor dem Zulauf durch einen geeigneten Sensor zu bestimmen. Der resultierende Druckverlust Δp im heißen Fluid (Kühlmittel) infolge der Durchströmung der TPMS-Füllstruktur konnte nach Angaben des Projektpartners ADV über Leistungsschwankungen der Wasserpumpe bestimmt werden, die das Kühlmittel durch den Wankelmotor und die TPMS-Füllstruktur förderte. Die experimentell ermittelten Zielgrößen, die Temperatur und der Druckverlust, sollten mit den numerisch bestimmten Werten aus der CFD-Analyse (siehe AP 1.3) verglichen werden.

Aus der CFD-Analyse der TPMS-Füllstrukturen war bereits bekannt, dass die zu erwartenden Temperaturunterschiede zwischen dem Zulauf und dem Ablauf sehr gering ($\Delta T < 0,4$ K) sind. Insofern wurde vorgeschlagen, für den experimentellen Aufbau präzise Temperatursensoren mit einer geringen Messunsicherheit zu verwenden. Die Auswahl, die Bestellung und der Einbau der Temperatur- und Durchflusssensoren erfolgte analog zur experimentellen Validierung des Wärmetauschers durch die ADV.

2.12 Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens (AP 4.1)

Die Fertigung der drei Wärmetauscher-Segmente wurde wegen der hohen Umrüstungskosten für den Materialwechsel einer bestehenden Anlage durch den Dienstleister Materialise GmbH durchgeführt. Die Kosten für die PBF-LB/M-Fertigung der Wärmetauscher-Segmente sind zusammen mit den Bauteil-Volumina nachfolgend aufgeführt:

- vorderes Wärmetauscher-Segment ($V_{\text{vorne}} = 977,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$) für 4.400,00 € netto
- mittleres Wärmetauscher-Segment ($V_{\text{mitte}} = 995,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$) für 3.900,00 € netto
- hinteres Wärmetauscher-Segment ($V_{\text{hinten}} = 1.138,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$) für 4.600,00€ netto

Die Preisschwankungen zwischen den einzelnen Wärmetauscher-Segmenten wurden auf die variierende geometrische Bauteilkomplexität und den Materialverbrauch während des Fertigungsprozesses zurückgeführt. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosten wurde seitens Materialise GmbH nicht zur Verfügung gestellt. Für die Fertigung des Wärmetauschers ergab sich eine Gesamtsumme in Höhe von 12.900,00 € netto. Diese Summe stellte die Referenz für eine In-house-Fertigung des Wärmetauschers dar.

Die nachfolgende Hochrechnung erfolgte unter der Annahme einer PBF-LB/M-Anlage, welche mit 1.600 Betriebsstunden/Jahr ausgelastet wird. In den Stundensätzen für die Anlagen (siehe Tabelle 11) wurde eine lineare Abschreibung der Anschaffungskosten über sieben Jahre berücksichtigt. In Tabelle 11 sind die einzelnen Kostenpositionen für die Abschätzung einer Wärmetauscher-in-House-Fertigung zusammengefasst.

Tabelle 11: Eingangsdaten für die Abschätzung der Wärmetauscher-Fertigungskosten

	Kostenposition	Formelzeichen	Wert	Einheit
Personal	Werkstattmitarbeitende/r	K_{WM}	70,00	€/h
Anlagen	EOS M400-1	K_{M400}	130,00	€/h
	Strahlanlage	K_{Strahl}	5,00	€/h
	Entpulverungssystem	$K_{Entpulverung}$	5,00	€/h
Material	AlSi10Mg-Werkstoffpulver	$K_{AlSi10Mg}$	65,00	€/kg
	Sonstiger Verbrauch	$K_{Sonstiges,AM}$	600,00	€

Für das Wärmetauscher-Gesamtvolumen $V_{ges} = 3.111,5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ ließ sich unter der Annahme von Standard-Prozessparametern für den Aluminium-Werkstoff AlSi10Mg und eine Single-Laser-PBF-LB/M-Anlage eine mittlere Fertigungszeit je Schicht $t_n = 92,6 \text{ s}$ bestimmen. Für eine repräsentative Beschichtungszeit von $t_B = 14,0 \text{ s}$ ergab sich eine Gesamtzeit von $t_{ges,L1} = t_n + t_B = 106,6 \text{ s}$ bzw. $t_{ges,L4} = t_n / 4 + t_B = 37,6 \text{ s}$ für eine Single-Laser-Anlage (z. B. die EOS M400-1) bzw. eine Quad-Laser-Anlage (z. B. die EOS M400-4). Für den Wärmetauscher wurde unter Berücksichtigung eines Dosier-Faktors von 1,50 und eines Sicherheitsfaktors von 1,25 ein AlSi10Mg-Materialverbrauch $m_{AlSi10Mg} = 12,65 \text{ kg}$ berechnet. Mithilfe der folgenden Gleichung wurden die Kosten K_{ges} für eine Single- und Quad-Laser-Anlage ermittelt. Hierbei wurden die Kostenpositionen mit dem benötigten zeitlichen Aufwand für die Durchführung einer Tätigkeit verrechnet.

$$K_{ges} = 8h \cdot K_{WM} + t_{ges,L1} \cdot K_{M400} + m_{AlSi10Mg} \cdot K_{AlSi10Mg} + 2h \cdot K_{WM} + 8h \cdot K_{Entpulverung} + 4h \cdot (K_{WM} + K_{Strahl}) + K_{Sonstiges,AM}$$

Im Vergleich zu einer externen Fertigung in Höhe von 12.900,00 € netto (siehe Referenz von Materialise GmbH) wären die Kosten für eine In-House-Fertigung mit einer Single-Laser-Anlage $K_{ges,L1} = 24.225,47 \text{ €}$ aufgrund der 2,84-fach höheren Fertigungszeit deutlich erhöht. Die Fertigungskosten für eine Quad-Laser-Anlage liegen hingegen bei $K_{ges,L4} = 10.180,45 \text{ €}$.

Es sei angemerkt, dass sich diese Kosten unter der Annahme einer Serienfertigung der Wärmetauscher bzw. einer kontinuierlichen Auslastung der PBF-LB/M-Anlagen von etwa 1.600 Betriebsstunden/Jahr ergeben. Sofern eine Quad-Laser-Anlage (z. B. die EOS M400-4) vorhanden, aber nicht auf den Aluminium-Werkstoff AlSi10Mg gerüstet ist, lohnt sich die Umrüstung und In-house-Fertigung ab acht Wärmetauschern:

$$K_{\text{Umrüstung}} / (K_{\text{Fertigung,extern}} - K_{\text{ges,L4}}) = 19.349,74 \text{ €} / 2.719,55 \text{ €} = 7,12 \text{ Bauteile}$$

Die Fertigung mit anderen Verfahren als dem PBF-LB/M-Prozess ist aufgrund der hohen Bauteilkomplexität der innenliegenden TPMS-Füllstrukturen und der Bauteilabmessungen (max. 84,8 × 324,9 × 336,0 mm³) technologisch nicht umsetzbar. Andere additive Verfahren, wie z. B. die draht- und lichtbogenbasierte additive Fertigung oder das Elektronenstrahlschmelzen, sind entweder in der geometrischen Auflösung der dünnwandigen und kleinen Geometriemerkmale oder im verfügbaren Bauraum eingeschränkt.

Über die Kostenkalkulation des reinen PBF-LB/M-Prozesses hinaus sind für eine ganzheitliche Bewertung die Kunstharz-Verbindungselemente zwischen den Wärmetauscher-Segmenten und die Fertigung der Aluminium-Stützen für den Fluid-Einlass/-Auslass in den Gesamtkosten zu berücksichtigen. Zusätzlich fallen weitere Nachbearbeitungsschritte an, wie z. B. das Bohren der Gewinde für die Verschraubung oder die Herstellung der Klebeverbindung. Die Kostenpositionen hierfür sind in Tabelle 12 gelistet.

Tabelle 12: Eingangsdaten für die Abschätzung der Wärmetauscher-Fertigstellung

	Kostenposition	Formelzeichen	Wert	Einheit
Personal	Werkstattmitarbeitende/r	K_{WM}	70,00	€/h
Anlagen	Fräsmaschine	$K_{\text{Fräs}}$	55,00	€/h
	Ständerbohrmaschine	K_{Bohren}	5,00	€/h
Material	Rohmaterial AlMg4,5Mn	$K_{\text{AlMg4,5Mn}}$	12,30	€/kg
	Klebstoff DELO SJ8665	$K_{\text{Klebstoff}}$	50,00	€/kg
	Sonstiger Verbrauch	$K_{\text{Sonstiges,NB}}$	100,00	€

Unter Berücksichtigung dieser Kostenpositionen erweitern sich die Kosten für den finalen Wärmetauscher K_{final} gemäß der nachfolgenden Beziehung:

$$K_{\text{final}} = K_{\text{ges}} + \underbrace{6h \cdot (K_{\text{WM}} + K_{\text{Bohren}})}_{\text{Gewindebohrung}} + \underbrace{8h \cdot (K_{\text{WM}} + K_{\text{Fräs}}) + 5\text{kg} \cdot K_{\text{AlMg4,5Mn}} + K_{\text{Sonstiges,NB}}}_{\text{Spanende Fertigung des Stützens}} + \underbrace{4h \cdot K_{\text{WM}} + 1\text{kg} \cdot K_{\text{Klebstoff}}}_{\text{Klebung}} = K_{\text{ges}} + 1.942,50\text{€}$$

Insgesamt ergab sich für eine In-house-Fertigung des Wärmetauschers mit einer Quad-Laser-PBF-LB/M-Anlage und der Nachbearbeitung sowie dem Fügeprozess zur Verbindung des Stutzens mit den Segmenten eine finale Gesamtsumme $K_{\text{final}} = 12.121,95 \text{ €}$.

2.13 Analyse und Bewertung der Umweltfreundlichkeit des Verfahrens (AP 4.2)

Aufgrund der geometrischen Komplexität und der großen Abmessungen der Wärmetauscher-Segmente war der PBF-LB/M-Prozess die einzige Möglichkeit zur Fertigung der Strukturen. Da die Fertigung des Wärmetauschers durch das Unternehmen Materialise GmbH erfolgte, konnte die Umweltfreundlichkeit des Fertigungsprozesses nur auf Basis von allgemeinen Annahmen abgeschätzt werden. Als Berechnungsgrundlage diente das Modell von PRIARONE ET AL. (2018) für den Pulverwerkstoff AlSi10Mg.

Unter der Annahme eines Bauteilsockels mit einer Höhe von 3 mm für das Abtrennen der Bauteile ließ sich die Gesamtmasse $m_{\text{ges}} = 8,64 \text{ kg}$ des Wärmetauschers bestimmen. Nach der Fertigung musste lediglich der Bereich für die Aufnahme der Fluidstutzen und die Gewindebohrungen für die Verschraubung der Wärmetauscher-Segmente nachbearbeitet werden. Dies entsprach einer Masse von etwa $m_{\text{NB}} = 0,20 \text{ kg}$. Die Stützkonstruktion, welche der integrierten TPMS-Füllstruktur entspricht, verblieb in dem Wärmetauscher, sodass keine Nachbearbeitung anfiel. Die Masse für das AlSi10Mg-Rohmaterial $m_{\text{Rohmaterial}} = 9,28 \text{ kg}$ wurde gemäß LAVERY ET AL. (2013) mit einem Faktor 1,05 aus der Masse des verbrauchten Pulvers zu $m_{\text{AlSi10Mg}} = m_{\text{ges}} + m_{\text{NB}} = 8,84 \text{ kg}$ bestimmt.

Unter der Berücksichtigung der in PRIARONE ET AL. (2018) genannten Energieverbräuche und CO₂-Emissionen für die Pulverherstellung, die Fertigung mittels PBF-LB/M und die spanende Nachbearbeitung ergab sich ein akkumulierter Energieverbrauch von $VB_E = 16.328,3 \text{ MJ}$ und eine akkumulierte CO₂-Emission von $VB_{\text{CO}_2} = 1.844,5 \text{ kg}$ für den gesamten Wärmetauscher. Dies wird in Abbildung 35 veranschaulicht.

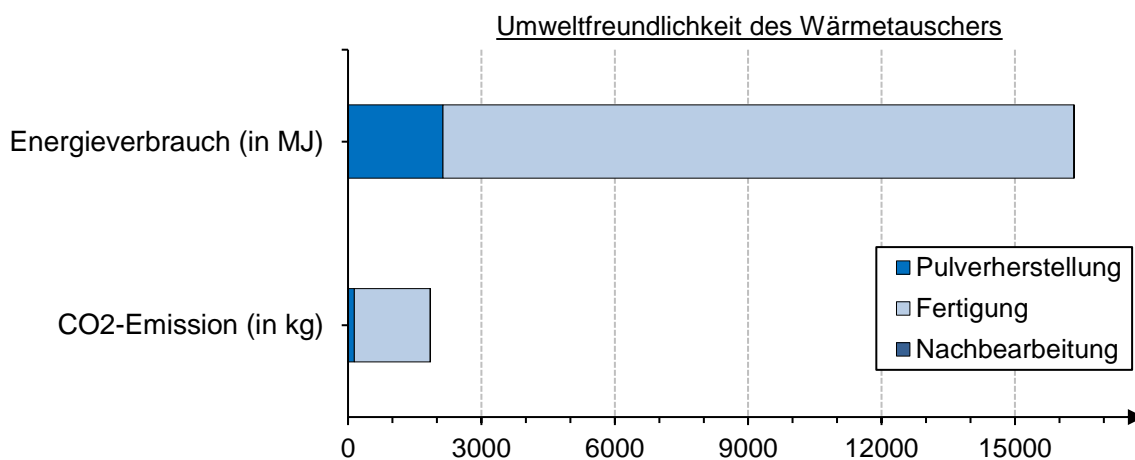


Abbildung 35: Benötigter Energieverbrauch und ausgestoßene CO₂-Emission für die Additive Fertigung des Wärmetauschers aus dem Pulverwerkstoff AlSi10Mg

3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Verwertbarkeit der Projektergebnisse in Bezug auf die wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Verwertbarkeit sowie Veröffentlichungen, Vorträge und Studienarbeiten dargelegt.

3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Verwertbarkeit

Durch das Projekt wurde eine Methodik zur thermischen und fertigungsgerechten Auslegung von additiv hergestellten Wärmetauscher-Systemen entwickelt, die in vielfältigen Branchen angewendet werden kann. Die projektbegleitende Integration eines Demonstrator-Bauteils in das Hybrid-Flugzeug der ADV hat die zeitnahe Verwertung der Ergebnisse sichergestellt. Insofern hat dieses Projekt die Fertigbarkeit eines mittels PBF-LB/M gefertigten Wärmetauschers unter Anforderungen der Luft- und Raumfahrtbranche aufgezeigt.

Nach Projektabschluss eröffnen sich für das *iwb* Möglichkeiten, weiterführende Vorhaben mit Unternehmen der Luft- und Raumfahrtbranche umzusetzen und das Prozessverständnis im Bereich der Additiven Fertigung kontinuierlich zu erweitern. Die erarbeiteten Erkenntnisse können weiterhin dazu genutzt werden, um das Potenzial der TPMS-Füllstrukturen für andere Anwendungsfelder zu untersuchen. Zudem wurde die Vorreiterrolle der Technischen Universität München in der Forschungslandschaft weiter gestärkt.

3.2 Veröffentlichungen, Vorträge, Messen und studentische Arbeiten

Studierende und Promovierende erhielten im Rahmen der Projektarbeit technologische Einblicke in die Additive Fertigung und wurden in diesen Technologien ausgebildet. Dies steigerte das Interesse für ingenieurwissenschaftliche Disziplinen und hat die zukünftige Ausbildung hochqualifizierter Ingenieurinnen und Ingenieure für die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie sichergestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt wurden den Studierenden in Lehrveranstaltungen, z. B. der Ringvorlesung Additive Fertigung oder dem Praktikum Additive Fertigung, zugänglich gemacht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens entstanden fünf studentische Arbeiten.

Aufgrund der Corona-Pandemie war der wissenschaftliche Austausch lange Zeit nicht möglich. Daher konnten die Erkenntnisse nicht wie geplant auf nationalen sowie internationalen Konferenzen veröffentlicht werden. Alternativ wurden die Inhalte und Erkenntnisse des Forschungsprojekts AMPHEA auf diversen Veranstaltungen vorgestellt und diskutiert:

- Advanced Manufacturing Technology Conference (AMTC), 12. – 14.10.2021, Aachen
- Luftfahrtmesse AERO, 29.04.2022, Friedrichshafen (Online)
- Formnext, 15. – 18.11.2022, Frankfurt
- Advanced Manufacturing Technology Conference (AMTC), 11. – 12.10.2022, München
- Formnext, 07. – 10.11.2023, Frankfurt

Der hohe wissenschaftliche Anspruch des Vorhabens führte zudem zu einer Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in einem Journal:

- Dominik Goetz, Johannes Diller, Karoline Achatz, Michael F. Zaeh: Shrink line impact on the fatigue resistance of Inconel 718 parts manufactured by powder bed fusion of metals using a laser beam, Journal of Manufacturing Processes 115, 2024, S. 481 – 490, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.02.030

Darüber hinaus fließen die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt AMPHEA in aktuelle Forschungsarbeiten ein. Diese Arbeiten werden in Zukunft auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt.

A Literaturverzeichnis

BEHLER ET AL. 1987

Behler, K.; Sokolowski, W.; Beyer, E.: Porenbildung beim Laserstrahlschweißen. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser/Optoelektronik in der Technik / Laser/Optoelectronics in Engineering. Vorträge des 8. Internationalen Kongresses / Proceedings of the 8th International Congress Laser 87 Optoelektronik. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 1987, S. 529–532. ISBN: 978-3-642-83174-4.

BENDSOØE & KIKUCHI 1988

Bendsøe, M. P.; Kikuchi, N.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71 (1988), S. 197–224.

BROWAEYS 2022

Browaeys, J.: Linear fit with both uncertainties in x and in y. MATLAB Central File Exchange. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45711-linear-fit-with-both-uncertainties-in-x-and-in-y>, 29.03.2022.

DELO 2023

DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA: DELO-DUOPOX® SJ8665. https://www.delo.de/service-center/downloadbereich/downloads/datasheet/DELO-DUOPOX_SJ8665_TIDB-de.pdf?show=1&type=5001&cHash=39489453a92d624c4dafb22f7ea499a5, abgerufen am 07.07.2023.

DIN EN 6072

DIN EN 6072: Luft- und Raumfahrt – Metallische Werkstoffe – Prüfverfahren - Ermüdungstest mit konstanter Amplitude; Deutsche und Englische Fassung EN 6072:2010. Berlin: Beuth 2011.

DIN EN ISO 4288

DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren. Berlin: Beuth 1998.

DIN EN ISO 6892-1

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

FEMMER ET AL. 2015

Femmer, T.; Kuehne, A. J.; Wessling, M.: Estimation of the structure dependent performance of 3-D rapid prototyped membranes. Chemical Engineering Journal 273 (2015), S. 438–445.

FIEGER ET AL. 2018

Fieger, T. V.; Sattler, M.F.; Witt, G.: Developing laser beam welding parameters for the assembly of steel SLM parts for the automotive industry, *Rapid Prototyping Journal*, 24 (2018) 8, S. 1288–1295.

GALEA ET AL. 2021

Galea, R.-R.; Diosan, L.; Andreica, A.; Popa, L.; Manole, S.; Bálint, Z.: Region-of-Interest-Based Cardiac Image Segmentation with Deep Learning. *Applied Sciences* 11 (2021) 4, S. 1965.

GERSTLER & ERNO 2017

Gerstler, W. D.; Erno, D.: Introduction of an Additively Manufactured Multi-Furcating Heat Exchanger, 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE (2017), S. 624–633.

GOETZ ET AL. 2022

D. Goetz; D. Wolf; M. Lehmann; M. F. Zaeh: A novel approach for the quantitative characterization of shrink lines in the powder bed fusion of metals using a laser beam, *Procedia CIRP*, vol. 111, S. 832–837, 2022, 12th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2022].

GOETZ ET AL. 2024

D. Goetz; J. Diller; K. Achatz; M. F. Zaeh: Shrink line impact on the fatigue resistance of Inconel 718 parts manufactured by powder bed fusion of metals using a laser beam, *Journal of Manufacturing Processes* 115 (2024), S. 481–490.

HANSJOSTEN ET AL. 2018

Hansjosten, E.; Wenka, A.; Hensel, A.; Benzinger, W.; Klumpp, M.; Dittmeyer, R.: Custom-designed 3D-printed metallic fluid guiding elements for enhanced heat transfer at low pressure drop. *Chemical Engineering & Processing* 130 (2017), S. 119–126.

KLAHN ET AL. 2017

Klahn, C.; Omidvarkarjan, D.; Meboldt, M.: Evolution of Design Guidelines for Additive Manufacturing-Highlighting Achievements and Open Issues by Revisiting an Early SLM Aircraft Bracket. In: *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications*. Springer, Cham, (2017). S. 3–13.

LAVERY ET AL. 2013

Lavery, N.; Jarvis, D. J.; Brown, S.G.R.; Adkins, N.; Wilson, B.: Life cycle assessment of sponge nickel produced by gas atomisation for use in industrial hydrogenation catalysis applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (2013). S. 362–376.

LIPPERT 2018

Lippert, R. B.: Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen. (Dissertation) Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (2018).

LIU ET AL. 2018

Liu, J.; Gaynor, A. T.; Chen, S.; Kang, Z.; Suresh, K.; Takezawa, A.: Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57 (2018) 6, S. 2457–2483.

MA ET AL. 2020

Ma, S.; Tang, Q.; Han, X.; Feng, Q.; Song, J.; Setchi, R.; Liu, Y.; Liu, Y.; Goulas, Athanasios; Engström, Daniel S.; Tse, Yau Yau; Zhen, Ni: Manufacturability, Mechanical Properties, Mass-Transport Properties and Biocompatibility of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Porous Scaffolds Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials & Design* 195 (2020), 109034.

MÄKIKANGAS ET AL. 2019

Mäkikangas, J.; Rautio, T.; Mustakangas, A.; Mäntyjärvi, K.: Laser welding of AlSi10Mg aluminium-based alloy produced by Selective Laser Melting (SLM). *Procedia Manufacturing* 36 (2019), S. 88–94.

NIEMANN ET AL. 2019

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.; Stahl, K.: *Maschinenelemente 1. Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen* / Gustav Niemann, Hans Winter, Bernd-Robert Höhn, Karsten Stahl. Fifth edition. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2019. ISBN: 978-3-662-55481-4.

PENG ET AL. 2019

Peng, H.; Gao, F.; Hu, W.: Design, Modeling and Characterization on Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers with Additive Manufacturing. 2019.

PRIARONE ET AL. 2018

Priarone, P. C.; Lunetto, V.; Atzeni, E.; Salmi, A.: Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability, *Procedia CIRP*, vol. 78, 2018, S. 85–90, 6th CIRP Global Web Conference “Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era”.

SIGMUND & MAUTE 2013

Sigmund, O. und Maute, K.: Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48 (2013) 6, S. 1031–1055

STIMPSON ET AL. 2016

Stimpson, C. K.; Snyder, J. C.; Thole, K. A.; Mongillo, D.: Roughness Effects on Flow and Heat Transfer for Additively Manufactured Channels. *Journal of Turbomachinery* 138 (2016) 5. 051008.

WITS ET AL. 2015

Wits, W. W.; Becker, J. M. J.: Laser beam welding of titanium additive manufactured parts, 3rd CIRP Global Web Conference (2015), *Procedia CIRP* 28, S. 70–75.

WITTEL ET AL. 2021

Wittel, H.; Spura, C.; Jannasch, D.: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*. 25. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg 2021. ISBN: 978-3-658-34159-6.

ZHANG ET AL. 2018

Zhang, X.; Keramati, H.; Arie, M.; Singer, F.; Tiwari, R.; Shooshtari, A.; Ohadi, M.: Recent developments in high temperature heat exchanges: a review. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 11 (2018), S. 1–14.

B Abkürzungsverzeichnis

ADV	AdvanTec GmbH
AP	Arbeitspaket
AS	Gleichlaufseite
CFD	Computational Fluid Dynamics
CT	Computer-Tomographie
DL	Deep Learning
EOS	EOS GmbH Electro Optical Systems
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSW	Rührreibschweißen
GW	Grundwerkstoff
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
LBW	Laserstrahlschweißen
nH	nach Hirtisiervorgang
OT	optische Tomographie
PBF-LB/M	pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl
RS	Gegenlaufseite
RVE	repräsentatives Volumenelement
STL	Standard Tessellation Language
SZ	Schweißzone
TMZ	thermomechanisch beeinflussten Zone
TPMS	Triply Periodic Minimal Surface
vH	vor Hirtisiervorgang
WEZ	Wärmeeinflusszone

C Formelzeichen

Arabische Schriftzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	mm^2	Oberfläche
d_h	mm	hydraulischer Durchmesser
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
h	mm	Höhe
h_s	mm	Hatchabstand
K	€	Kosten
l_p	mm	Pinlänge
m	kg	Masse
P_L	mA	Laserstromstärke
Q	kW	Wärmeleistung
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
Re	-	Reynolds-Zahl
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
SF	-	Sicherheitsfaktor
s_z	mm	Einheitszellengröße
t	s	Zeit
t_w	mm	Wandstärke einer TPMS-Struktur
T	K	Temperatur
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
U	$\text{W}/(\text{Km}^2)$	Wärmedurchgangskoeffizient
UA	W/K	Übertragungsfähigkeit
\ddot{U}_L	mm	Überhanglänge
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit
V	cm^3	Volumen

VB_E	MJ	Energieverbrauch
VB_{CO_2}	kg	CO ₂ -Emission
z	mm	Aufbaurichtung im PBF-LB/M-Prozess

Griechische Schriftzeichen

Δp	Pa	Druckverlust
ΔT	K	Temperaturunterschied
$\dot{\epsilon}$	1/s	Dehngeschwindigkeit
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
δ	g/cm ³	Dichte
σ	-	Standardabweichung
σ_v	N/mm ²	Vergleichsspannung von Mises

Indizes

adj	-	adjustiert
avrg	-	durchschnittlicher Wert
AlSi10Mg	-	Aluminium-Pulverwerkstoff für das PBF-LB/M
ben	-	benötigt
B	-	Beschichtung während des PBF-LB/M-Prozesses
Entpulverung	-	System für die Bauteil-Entpulverung
Fräs	-	Fräsmaschine
ges	-	gesamt
h	-	heiß
hinten	-	hinteres Wärmetauscher-Segment
Infill	-	Belichtungsbereich Infill
k	-	kalt
krit	-	kritischer Wert
Kerbe	-	Kerbe
Kleben	-	Klebe-Fügeverbindung

Kontur	-	Belichtungsbereich Kontur
L1	-	Single-Laser-PBF-LB/M-Anlage
L4	-	Quad-Laser-PBF-LB/M-Anlage
M400	-	PBF-LB/M-Anlage EOS M400-1 oder M400-4
max	-	maximaler Wert
mitte	-	mittleres Wärmetauscher-Segment
min	-	minimaler Wert
n	-	einzelne Schicht während des PBF-LB/M
rea	-	realisierbar
Schrauben	-	Schrauben-Fügeverbindung
soll	-	Soll-Wert laut Datenblatt
Strahl	-	Strahlanlage
Umrüstung	-	Umrüstung für Materialwechsel
vorne	-	vorderes Wärmetauscher-Segment
WM	-	Werkstattmitarbeitende/r
x	-	entlang der x-Koordinate
y	-	entlang der y-Koordinate
z	-	entlang der z-Koordinate
Zugscherfestigkeit	-	Zugscherfestigkeit

D Erklärung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimapolitik (BMWK) geförderten Projekts AMPHEA (Förderkennzeichen: 20Q1955B) erarbeitet. Wir danken dem BMWK und dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Unterstützung und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Der vorliegende Projekt-Abschlussbericht wurde von den nachfolgend aufgeführten Autoren verfasst. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken und Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.



Dominik Rauner (geb. Götz), M. Eng.

Abteilung Additive Fertigung

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Technische Universität München

Ort, Datum

Dominik Rauner



Michael F. Zäh, Prof. Dr.-Ing.

Ordinarius

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Technische Universität München

Ort, Datum

Michael F. Zäh