

Abschlussbericht vom 31.03.2026

zum IGF-Vorhaben Nr. 23161

Thema

L-Heat - Hydro-HIP flüssigkeitsbasiertes heißisostatisches Pressen für AM gefertigte Aluminiumbauteile

Berichtszeitraum

01.11.2023 bis 31.03.2026

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.
Wallstraße 58/59
10179 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

RWTH Aachen
Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme (ifas)
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Steinbachstraße 15
52074 Aachen

Platz für ein Logo

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Auswahl Thermofluid und Analyse des Wärmeübergangs (ifas).....	3
1.2	Arbeitspaket 2: PBF-LB/M-Probenentwicklung und Werkstoffcharakterisierung (ILT).....	4
1.3	Arbeitspaket 3: Entwicklung des Prüfstands (ifas).....	10
1.4	Arbeitspaket 4: L HIP-Prozessentwicklung (ifas)	23
1.5	Arbeitspaket 5: Messungen und Auswertung (ifas/ILT).....	24
2	Verwendung der Zuwendung	39
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	40
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	42
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	43
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	44
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	45
8	Literaturverzeichnis	47

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Auswahl Thermofluid und Analyse des Wärmeübergangs (ifas)

Arbeitspaket 1.1 Auswahl eines geeigneten Fluids

Für die Durchführung des Vorhabens „Flüssigkeitsbasierte Wärmenachbehandlung zur Mikrostrukturveränderung/-reparatur AM gefertigter Aluminiumwerkstoffe/-bauteile“ ist die Auswahl eines geeigneten Fluids für die Betriebsbedingungen notwendig. Unter Berücksichtigung der Temperatur und Druckanforderungen wurden verschiedene Fluide betrachtet und nach ihren Eigenschaften charakterisiert. Besonderes Augenmerk wurde auf Ester, Silikonöle und ionische Flüssigkeiten gelegt, da diese besonders temperaturbeständig sein. Die Auswahl ist initial auf das Silikonöl „HELISOL XLP“ gefallen, da dieses jedoch kommerziell nicht mehr erwerbbar ist wurde eine alternative gesucht. Die Auswahl ist schlussendlich auf die Wärmeträgerflüssigkeit *FRAGOL THERM Q-HTF* gefallen. Dabei handelt es sich um ein hydriertes Mineralöl, welches entsprechend synthetisch aus Erdöl hergestellt wird. Der Flammpunkt liegt bei 245°C und die Zündtemperatur bei 330 °C.

Arbeitspaket 1.2 Modellierung Druckaufbau

Die Modellierung des Druckaufbauprozesses wurde am Anfang des Projektes vorgesehen, um das benötigte Fluidvolumen zu bestimmen. Fluide können bei Drücken von bis zu 4000 bar nicht mehr als inkompressibel angenommen werden. Ebenfalls steigt mit steigender Temperatur das Kompressionsmodul der Fluide. Für eine genaue Modellierung des Druckaufbauprozesses ist der Kompressionsmodul des Fluides bei verschiedenen, den Betriebspunkten ähnlichen Temperaturen und Drücken notwendig. Diese Daten stehen allerdings weder von Herstellerseite zur Verfügung, noch können diese unter den benötigten Bedingungen zeitnah ermittelt werden. Daher wurde im projektbegleitenden Ausschuss entschieden dieses Arbeitspaket anzugehen, wenn die HIP-Prozessanlage aufgebaut ist.

Arbeitspaket 1.3 Modellierung Wärmeübergang Fluid-Bauteil

Für die Modellierung des Wärmeübergangs zwischen dem Fluid und dem Bauteil, also einem additiv gefertigten Probekörper ist der Übergangskoeffizient zwischen den beiden Komponenten notwendig. Dieser steht ebenfalls für das Fluid nicht zu Verfügung, weshalb hier ebenfalls mit Zustimmung des PbA zunächst auf eine Modellierung verzichtet wurde.

Arbeitspaket 1.4 Modellierung Wärmeübergang Fluid-Prozessgrenze

Für die Modellierung des Wärmeübergangs zwischen Fluid und Prozessgrenzen ist es notwendig die Prozessgrenzen der flüssigkeitsbasierten heißisostatischen Presse zu kennen. Darunter fallen beispielsweise das Heizkonzept sowie das Material und die Größe des Druckbehälters. Somit ist auch hier zunächst der Fokus auf die Konzeptionierung der L-HIP Versuchsanlage gelegt worden.

Arbeitspaket 1.5 Modellierung Wärmeverlustleistung

Für die Erstellung einer Abschätzung des Wärmeverlustes wurde ebenfalls wie in den APs zuvor verzichtet, da ohne AP 1.3 und 1.4 eine solche Abschätzung nur sehr ungenau getroffen werden kann.

1.2 Arbeitspaket 2: PBF-LB/M-Probenentwicklung und Werkstoffcharakterisierung (ILT)

Ziel des Arbeitspakets war die prozess- und werkstoffseitige Bereitstellung definierter und reproduzierbar gefertigter Prüfkörper aus der Aluminiumlegierung AlSi10Mg zur Bewertung des flüssigkeitsbasierten heißisostatischen Pressens (L-HIP). Hierzu wurden geeignete Verfahrensparameter für das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen von Metallen (PBF-LB/M) entwickelt und validiert, mit denen unterschiedliche relative Dichten ρ_{rel} und damit drei definierte Porositätsklassen eingestellt werden konnten. Die gemäß Förderantrag angestrebten Porositätsklassen (PK) waren wie folgt definiert:

- **PK99:** $99,0\% < \rho_{\text{rel}} < 99,5\%$
- **PK99,5:** $99,5\% < \rho_{\text{rel}} < 99,95\%$
- **PK99,95:** $\rho_{\text{rel}} \geq 99,95\%$

Die gezielte Herstellung von Prüfkörpern mit unterschiedlichen relativen Dichten und den daraus resultierenden Defektanteilen bildete die experimentelle Grundlage für die systematische Bewertung der Leistungsfähigkeit des L-HIP-Verfahrens. Untersucht wurde, in welchem Umfang innere Werkstoffdefekte in Abhängigkeit von der Ausgangsdichte und der Defektgröße durch die L-HIP-Behandlung reduziert beziehungsweise geschlossen werden können. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Behandlung auf die quasistatischen mechanischen Eigenschaften und das Ermüdungsverhalten der PBF-LB/M-gefertigten Prüfkörper untersucht.

Arbeitspaket 2.1 Pulvercharakterisierung

Das vom Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses Ecka Granules Germany GmbH/Kymera International als vorhabensbezogene Sachleistung der Wirtschaft bereitgestellte AlSi10Mg-Pulver mit einer nominalen Kornfraktion von +20/-63 μm wurde zu Beginn des Vorhabens am Fraunhofer ILT charakterisiert. Untersucht wurden die Fließfähigkeit (Lawinenwinkel), die Schüttdichte, die relative Feuchte, die Partikelgrößenverteilung sowie die chemische Zusammensetzung. Sämtliche ermittelten Kenngrößen lagen innerhalb der jeweils vorgegebenen Spezifikationsgrenzen. Die quantitativen Ergebnisse der physikalischen Pulvercharakterisierung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

- *Tabelle 1: Ermittelte Kennwerte zur physikalischen Charakterisierung des AlSi10Mg-Pulvers*

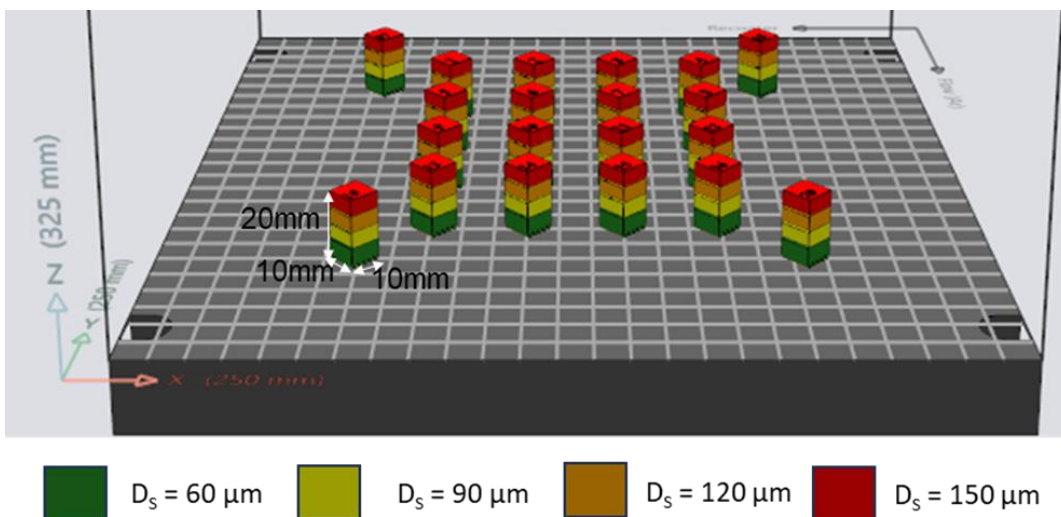
Kenngröße	Wert	Abweichung von Spezifikation
Lawinenwinkel [°]	$37,588 \pm 0,055$	nein
Schüttdichte [g/ml]	$1,480 \pm 0,015$	nein
Rel. Feuchtigkeit [%]	$0,006 \pm 0,0008$	nein
Partikelgrößenverteilung (volumenbezogen) [μm]	$D_{10} = 28,4$ $D_{50} = 40,4$ $D_{90} = 62,5$	nein

Die Ergebnisse der chemischen Analyse bestätigten ebenfalls die Einhaltung der für die Legierung AlSi10Mg vorgegebenen Werkstoffspezifikation.

Arbeitspaket 2.2 PBF-LB/M-Prozessentwicklung würfelförmiger Probekörper (Porositätsklassen)

Die Arbeiten zur PBF-LB/M-Prozessentwicklung wurden am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auf einer PBF-LB/M-Anlage des Typs EOS M290 durchgeführt. Durch die Verwendung einer industriell etablierten Anlagenplattform sollte der unmittelbare Transfer der erzielten Ergebnisse in die industrielle Anwendung gewährleistet werden. Abweichend von der Standardkonfiguration der EOS M290 verfügte die am ILT eingesetzte Anlage über eine BigSpot-Konfiguration, die das PBF-LB/M mit variablem Strahldurchmesser von $d_s = 0,09 - 1,00$ mm sowie einer maximalen Laserleistung von $P_{L,max} = 900$ W gegenüber 400W in der Standardausführung ermöglichte.

Die höhere verfügbare Laserleistung in Kombination mit dem variabel einstellbaren Laserstrahldurchmesser eröffnete einen erweiterten Prozessbereich für die Entwicklung hochproduktiver Verfahrensparameter zur Verarbeitung der Aluminiumlegierung AlSi10Mg im PBF-LB/M. Dies war insbesondere für den Untersuchung erhöhter Schichtdicken von $D_s > 100$ μm relevant, bei denen zur Gewährleistung einer stoffschlüssigen Anbindung größere Laserleistungen, in entsprechender Kombination mit Strahldurchmesser, Scangeschwindigkeit und Spurabstand zur Einstellung ausreichend großer Schmelzbaddiefen erforderlich sind. In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden vier Schichtdicken ($D_s = 60, 90, 120, 150$ μm) untersucht, wobei die Schichtdicke $D_s = 60$ μm dem industriellen Stand der Technik entspricht. Zur gleichzeitigen und effizienteren Untersuchung aller Schichtdicken innerhalb eines Fertigungsversuches, wurden 16 segmentierte, quaderförmige Probekörper mit den Abmessungen $L \times B \times H = 10 \times 10 \times 20$ mm³ hergestellt. Jeder Probekörper war jeweils in vier übereinander angeordnete Untersegmente identischer Geometrie mit unterschiedlicher Schichtdicke D_s unterteilt. Die Probengeometrie, die Reihenfolge der Schichtdickensegmente und die Anordnung der Probekörper auf der Bauplattform sind in [Abbildung 1](#) dargestellt. Zusätzlich wurden in den Randbereichen der Bauplattform Probekörper zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit ausgewählter Parameterkombinationen aus Vorversuchen angeordnet.



- *Abbildung 1: Anordnung der segmentierten Probekörper auf der Bauplattform der EOS M290. 16 Probekörper mit jeweils 4 Segmenten wurden als 4x4 Matrix im Zentrum der Bauplattform angeordnet. Zusätzliche Probekörper in den Randbereichen dienen der Überprüfung zur Reproduzierbarkeit ausgewählter Parameterkombinationen aus Vorversuchen.*

Für jede untersuchte Schichtdicke D_s wurden die für die Defektentstehung maßgeblichen Verfahrensparameter Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_s und Spurabstand Δy_s systematisch variiert. In den Initialversuchen wurde eine Bauplattformtemperatur von 200 °C eingestellt. Die hergestellten Probekörper wurden

anschließend metallographisch präpariert und hinsichtlich ihrer relativen Dichte, der Defektgrößenverteilung sowie der Sphärizitätsverteilung der Poren charakterisiert. Diese relevanten Defekt- und Strukturkennwerte waren insbesondere für die nachfolgende Bewertung des L-HIP-Verfahrens von Bedeutung. Die angewandten Charakterisierungsmethoden und die zugehörigen Ergebnisse sind im Arbeitspaket 5 in Abschnitt 1.5 dargestellt. Auf Grundlage der in Arbeitspaket 5.1 dargestellten Mikrostruktur- und Härteergebnisse wurde die Bauplattformtemperatur für die spätere Fertigung der mechanischen Prüfkörper auf 100 °C abgesenkt.

Die untersuchten Verfahrensparameterkombinationen wurden anhand der jeweils erreichten relativen Dichte den definierten Porositätsklassen zugeordnet. Darauf aufbauend erfolgte eine iterative Anpassung der Verfahrensparameter, um die angestrebten Porositätsklassen gezielte und reproduzierbare einstellen zu können. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden ausgewählte Parameterkombinationen in nachfolgenden, unabhängigen Fertigungsversuchen erneut zur Herstellung von Probekörpern eingesetzt.

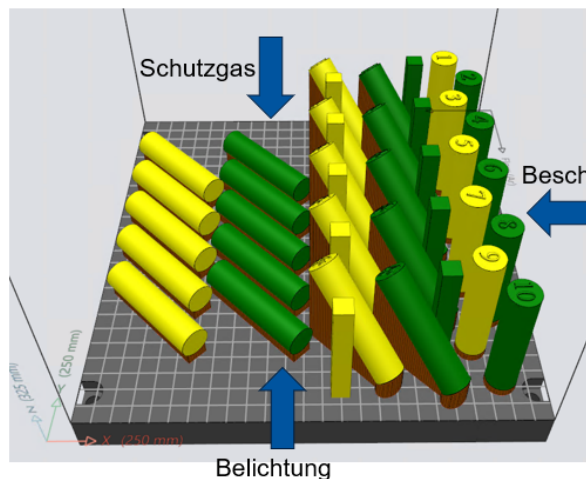
Arbeitspaket 2.3 Probenfertigung mit und ohne Werkstoffdefekten

Auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 2.2 und AP 5.1 wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss für die Fertigung der mechanischen Prüfkörper, sowie zur Quantifizierung des Einflusses der L-HIP-Nachbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften eine Schichtdicke von $D_s = 60 \mu\text{m}$ festgelegt. Bei dieser Schichtdicke konnten die vorgesehenen Porositätsklassen mit einer vergleichsweise geringen Streuung der relativen Dichte sowohl in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplattform als auch über mehrere unabhängige Fertigungsversuche hinweg reproduzierbar eingestellt werden. Bei größeren Schichtdicken wurden demgegenüber stärkere Schwankungen der relativen Dichte und der Defektgrößenverteilung festgestellt.

Vor diesem Hintergrund wurden die Prüfkörper für die nachfolgenden mechanischen Untersuchungen ausschließlich mit einer Schichtdicken von $D_s = 60 \mu\text{m}$ gefertigt, um eine belastbare werkstofftechnische Bewertung des Einflusses der L-HIP-Nachbehandlung zur Verdichtung bei hochproduktiven PBF-LB\M-Verfahrensparametern und auf mechanische Eigenschaften unter reproduzierbaren Ausgangsbedingungen im Projektverlauf zu ermöglichen.

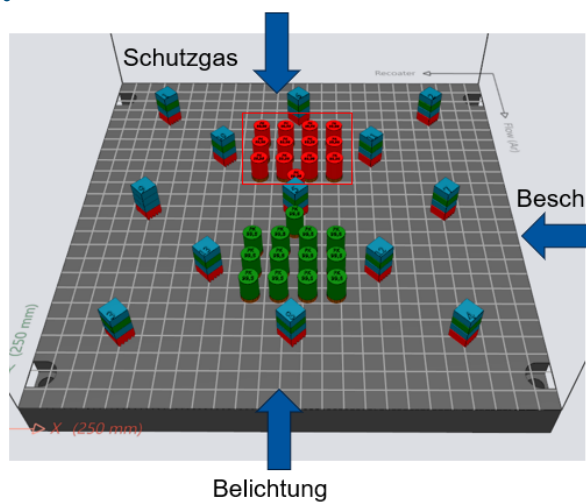
Aufgrund der gegenüber der ursprünglichen Planung notwendiger Anpassungen des eingeschränkten, technisch realisierbaren L-HIP-Prüfstandes an niedrigere Prozessdrücke bis 2500 bar und Temperaturen von 200 °C wurden zunächst Probekörper für Warmzug- und Spannungsrelaxationsversuche zur Bewertung des Verformungsvermögens von AlSi10Mg unter angepassten L-HIP-Bedingungen gefertigt. Diese ergänzenden mechanischen Untersuchungen wurden innerhalb des projektbegleitenden Ausschusses als erforderlich erachtet, um das temperaturabhängige Werkstoffverhalten unter den geänderten thermomechanischen Prozessbedingungen hinsichtlich der Warmfließgrenze sowie des zeitabhängigen Relaxationsverhaltens zu analysieren.

Für die Porositätsklassen PK99 und PK99,5 wurden hierfür jeweils zehn Zugproben hergestellt und anschließend bei einer Prüftemperatur von 200 °C geprüft. Darüber hinaus wurden für die Spannungsrelaxationsversuche jeweils 13 zylinderförmige Probekörper mit den für die Porositätsklasse PK99,95 und PK99,5 entwickelten Verfahrensparametern gefertigt. Zwölf zylindrische Probekörper der Porositätsklasse PK99,95 wurden zur weitführenden Untersuchung und Auswertung an den das Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses Airbus übergeben. Die Baujoblayouts für den Warmzug- und Spannungsrelaxationsversuch sind in [Abbildung 2](#) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.



- "PK99,5"
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_S = 2000 \text{ mm/s}$, $\Delta y_S = 100 \text{ mm/s}$)
→
5 Zugproben (vertikal) → "PK99,5_V"
5 Zugproben (horizontal) → "PK99,5_H"
5 Zugproben (45°) → nicht geprüft
5 Referenzproben → Dichteausswertung
- "PK99"
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_S = 2800 \text{ mm/s}$, $\Delta y_S = 100 \text{ mm/s}$)
→
5 Zugproben (vertikal) → "PK99_V"
5 Zugproben (horizontal) → "PK99_H"
5 Zugproben (45°) → nicht geprüft
5 Referenzproben → Dichteausswertung

■ Vorheiztemperatur: $T_V = 200^\circ \text{ C}$, Werkstoffzustand: as built, Zugprobe: B5x25 (mechanisch abgedreht)



- "PK99,95"
($P_L = 375 \text{ W}$, $v_S = 1500 \text{ mm/s}$, $\Delta y_S = 120 \text{ mm/s}$)
→
12 zylindrische Proben → Relaxationsversuch
+ 1 zylindrische Probe → Reserve
- "PK99,5"
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_S = 2200 \text{ mm/s}$, $\Delta y_S = 100 \text{ mm/s}$)
→
12 zylindrische Proben

■ Vorheiztemperatur: $T_V = 200^\circ \text{ C}$, Werkstoffzustand: as built, Rohling abgedreht auf $\varnothing 9 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$

Abbildung 2: Baujoblayouts der Prüfkörper für Warmzugversuche (oben) und Spannungsrelaxationsversuche (unten)

Zur Bewertung des Verformungsvermögens von AlSi10Mg unter angepassten L-HIP-Bedingungen erfolgten die Warmzugversuche bei einer konstanten Prüftemperatur von 200° C gemäß DIN EN ISO 6892 unter dehnungsgeregelten Bedingungen. Ziel der Warmzugversuche war die Überprüfung, ob der Werkstoff bei dieser Temperatur ein plastisches Fließ- und Verformungsverhalten aufweist, das das Schließen von Gefügedefekten grundsätzlich ermöglicht. Ergänzend wurden Druckrelaxationsversuche im Temperaturbereich von 180 bis 210° C bei Druckspannungen von 200 bzw. 220 MPa durchgeführt. Hiermit sollte untersucht werden, ob AlSi10Mg unter den betrachteten prozessrelevanten Bedingungen ein messbarer Relaxationsverhalten zeigt, das auf Kriechvorgänge schließen lässt, welche für die Defektheilung erforderlich sind. Die Ergebnisse der Warmzugversuche in AP 5 zeigen, dass die Warmfließgrenze von AlSi10Mg unterhalb von 200 MPa und damit unterhalb des im L-HIP-Prozess eingesetzten Druckniveaus liegt. Daraus ist abzuleiten, dass eine plastische Verformung des Werkstoffs unter diesen Bedingungen grundsätzlich möglich ist. Die Druckrelaxationsversuche belegen darüber hinaus, dass im relevanten Temperaturbereich bei einer Druckspannung von 200 MPa für alle untersuchten Proben eine messbare Relaxation auftritt. Dies weist darauf hin, dass Kriechvorgänge im Werkstoff stattfinden, die zur Schließung von Defekten beitragen können. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Defektheilung in AlSi10Mg auch unter den angepassten L-

HIP-Prozessbedingungen grundsätzlich möglich ist. Höhere Drücke und/oder Temperaturen dürften diesen Effekt zusätzlich verstärken, da sowohl die plastische Verformung als auch die kriechbedingten Mechanismen des Werkstoffs zunehmen.

Im Rahmen der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses wurden gegenüber der ursprünglichen Antragsstellung Anpassungen des Versuchsprogramms für die mechanische Werkstoffprüfung beschlossen. Anstelle eines ausschließlich unbehandelten Werkstoffzustands wurden zwei Direct Aging-Wärmebehandlungen als Referenzzustände festgelegt:

- 175 °C / 6h (T5-ähnlicher Direct Aging Zustand)
- 200 °C / 15 min (an die thermische L-HIP-Prozessführung angepasster Referenzzustand)

Der zweite Referenzzustand diene dazu, den rein thermischen Einfluss der Temperatur-Zeit-Führung von der kombinierten Wirkung aus Temperatur und Druck während der L-HIP-Behandlung abzugrenzen.

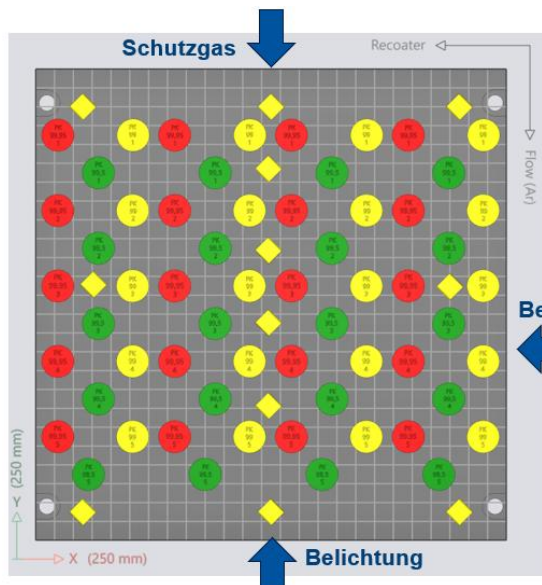
Die ursprünglich vorgesehene Untersuchung einer aufgebauten 45°-Probenorientierung bei Zug- und Schwingfestigkeitsproben wird nicht weiterverfolgt, da aufgrund der mechanisch endbearbeiteten Probenoberfläche zwar der Einfluss der aufbaurichtungsabhängigen Oberflächenbeschaffenheit verringert wird aber kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Einflusses der Aufbauorientierung und der Gefügeanisotropie erwartet wurde. Die Reduktion des Prüfumfangs diene daher der Fokussierung auf die beiden für die Bewertung maßgebliche Orientierungen, für die die deutlichsten richtungsabhängigen Unterschiede erwartet wurden.

Die Druckrelaxationsversuche wurden als ergänzende Plausibilitätsuntersuchungen durchgeführt, jedoch wurde darüber hinaus auf eine weiterführende Charakterisierung und Modellierung des Relaxationsverhaltens der AlSi10Mg-Legierung im mechanischen Hauptprüfprogramm verzichtet.

- *Tabelle 2: Mit dem PbA abgestimmte Anpassungen der mechanischen Prüfkörperfertigung*

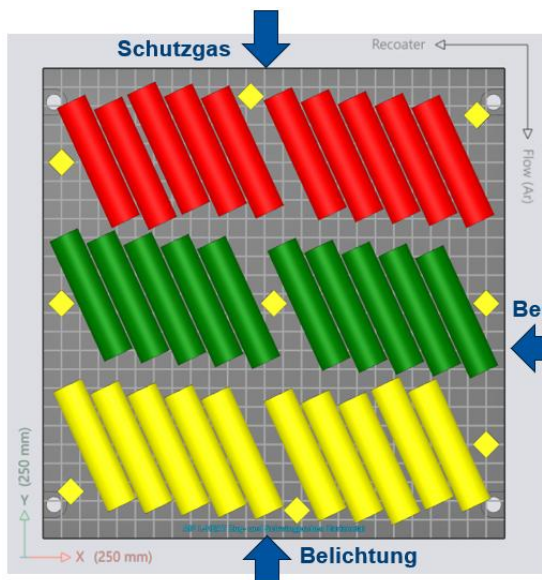
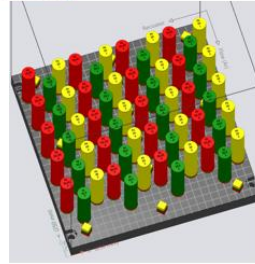
Aspekt	Gemäß Antragsstellung	Anpassung in Abstimmung mit dem PbA
Referenzzustand	unbehandelt	Direct Aging a) 175 °C / 6h (T5-Wärmebehandlung) b) 200 °C / 15 min
Mechanische Charakterisierung	Zugversuch, Dauerfestigkeitsversuch Relaxationsversuch	Zugversuch Dauerfestigkeitsversuch
Prüfkörperorientierung	horizontal / 45° geneigt / vertikal	horizontal / vertikal

Der abgestimmte Gesamtversuchsplan der mechanischen Hauptprüfprogramms umfasste für die Zug- und Dauerfestigkeitsprüfung die Faktoren Porositätsklasse (PK99 / PK99,5 / PK99,95), Aufbauorientierung (vertikal / horizontal) sowie (Direct-Aging) Wärmebehandlung (175 °C / 6 h bzw. 200 °C / 15 min). Daraus ergaben sich zwölf Zustandskombinationen. Für jede Zustandskombination wurden jeweils zehn Zugproben sowie jeweils zehn Proben für die Ermüdungsprüfung vorgesehen und für die Direct-Aging-Referenzzustände gefertigt. Die schematische Anordnung und Parameterzuordnung der vertikal und horizontal aufgebauten Prüfkörper ist in *Abbildung 3* dargestellt.



- "PK99,95"
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 1400 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben
- PK99,5
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 2200 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben
- PK99
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 2400 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben

Beschichtung



- "PK99,95"
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 1400 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben
- PK99,5
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 2200 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben
- PK99
($P_L = 400 \text{ W}$, $v_s = 2400 \text{ mm/s}$, $\Delta y_s = 100 \text{ mm/s}$)
→ 20 Proben

Beschichtung

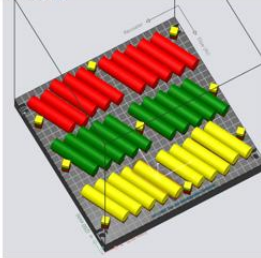
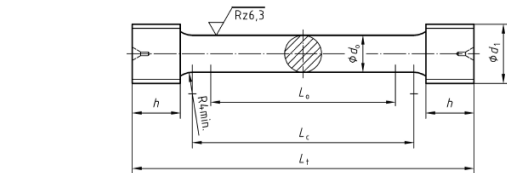


Abbildung 3: Schematische Anordnung und Parameterzuordnung der vertikal (oben) und horizontal (unten) aufgebauten Prüfkörper für das mechanische Hauptprüfprogramm

Die relative Dichte und die Defektkennwerte zusätzlich gefertigter würfelförmiger Begleitproben lagen innerhalb der bei den vorangegangenen Prozessentwicklungsversuchen ermittelten Streubereiche. Damit wurde bestätigt, dass die ausgewählten Verfahrensparameter auch in den Baujobs zur Fertigung der mechanischen Prüfkörper vergleichbare Ausgangszustände erzeugten.

Die mechanische Endbearbeitung der Zugproben erfolgte wie in Abbildung 5 dargestellt, gemäß DIN 50125 in der Probenform B5x25 als Rundprobe mit M8-Gewindeköpfen der Form B. Die für die Ermüdungsversuche vorgesehene Proben wurden als modifizierte FCE-Typ-B12,5-Probe in Anlehnung an DIN EN 6072 ausgeführt. Zur Vergrößerung des hochbeanspruchten Prüfvolumens verfügen diese über einen verlängerten Gleichmaß-(Prüf-) Bereich, um die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung mit statistisch verteilten prozessbedingten Defekten innerhalb des hochbeanspruchten Werkstoffvolumens zu erhöhen.

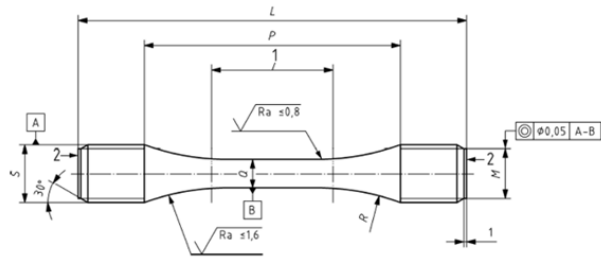
4.3 Zugprobe Form B



Legende

d_0	Probendurchmesser	L_0	Anfangsmesslänge ($L_0 = 5 d_0$)
d_1	Metrisches ISO-Gewinde	L_c	Versuchslänge ($L_c \geq L_0 + d_0$)
h	Kopfhöhe	L_1	Gesamtlänge

d_0	L_0	d_1	h min.	L_c min.	L_1 min.
5	25	M 8	7	30	50



Legende

1	Messlänge (kalibrierter Abschnitt)
2	Kennzeichnungsfeld
Allgemeintoleranz = js 12	
Formtoleranz = IT 9	
Gewindetoleranz = ISO 965-1, Toleranzklasse 6g	

- Abbildung 4: Rundzugprobe mit Gewinde-Kopf, Form B - Zugversuch (links) und modifizierte Rundprobe FCE Typ B - Ermüdungsversuch (rechts)

Damit wurde bewusst von klassischen Materialqualifikationsproben des Typs FCE A12,5 oder FCE A25 mit Sanduhrgeometrie abgewichen, bei denen der Ermüdungsbruch aufgrund der ausgeprägten Querschnittseinschnürung in der Regel in der Ebene des kleinsten Querschnitts konzentriert auftritt. Eine solche Probengeometrie kann bei additiv gefertigten Werkstoffen zu einer optimistischen Bewertung der Ermüdungseigenschaften führen, da der Einfluss statistisch verteilter Defekte nur in einem lokal begrenzten hoch beanspruchten Werkstoffvolumen erfasst wird. Die gewählte modifizierte Probengeometrie ermöglicht demgegenüber eine realitätsnähere defektsensitivere Bewertung des Einflusses prozessbedingter Defekte auf das Ermüdungsverhalten.

1.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung des Prüfstands (ifas)

Arbeitspaket 3.1 Durchführung Anforderungsanalyse

Im folgenden Kapitel wird die Erstellung der Anforderungsanalyse für das Projekt beschrieben. Zunächst wird die Problemstellung des Projekts erläutert und ein Ziel eingegrenzt. Abschließend wird die Anforderungsanalyse durchgeführt, auf deren Grundlage eine Anforderungsliste erstellt wird.

Das Ziel des Projektes besteht darin einen Versuchsstand zu entwickeln, mit dem es möglich ist additiv gefertigte Probenkörper mit Hilfe von heißisostatischen Pressens mit einem Fluid zu verdichten. Der Härteprozess soll dabei durch die Kombination aus Druck und Temperatur erfolgen.

Sofern die Konstruktion es zulässt, soll der Prüfstand für industrielle Prozesse geeignet oder entsprechend skalierbar sein.

Tabelle 3: Anforderungsliste Prüfstand

Forderung (F)/ Wunsch (W)	Anforderung
F	Der Prüfstand muss einen Arbeitsdruck von 2000 bar erzeugen können.
W	Der Prüfstand kann einen Arbeitsdruck von 4000 bar erzeugen.

F	Der Prüfstand muss einem Arbeitsdruck von 2000 bar und den daraus resultierenden Kräften standhalten können.
W	Der Prüfstand kann einem Arbeitsdruck von 4000 bar und den daraus resultierenden Kräften standhalten können.
F	Die Prüfkörper müssen einer Temperatur von mindestens 200 °C ausgesetzt werden können.
W	Der Prüfstand kann so für den Einsatz in der Industrie verwendet werden
F	Der Prüfstand muss Temperaturen von mindestens 200 °C standhalten können.
W	Der Prüfstand kann Temperaturen von bis zu 350 °C standhalten.

Arbeitspaket 3.2 Durchführung Funktionsstruktur

Aufbauend auf der Anforderungsanalyse werden im Folgenden die Teilfunktionen des Prüfstands ermittelt. Diese werden anschließend in die Funktionsstruktur der Konzeptentwicklung integriert und mit entsprechenden möglichen Teillösungen versehen.

Auf Basis der Anforderungsliste können verschiedene Teilfunktionen des Prüfstands definiert werden. Der geforderte Arbeitsdruck von 2000 bar zur Teilfunktion *Arbeitsdruck bereitstellen*. Da der erzeugte Arbeitsdruck zur Anwendung weitergeleitet werden muss, ergibt sich die Teilfunktion *Druck leiten*, die über einen entsprechenden Druckkreislauf realisiert wird.

Darüber hinaus ist eine Prüftemperatur von 200 °C erforderlich. Zur Erzeugung dieser Temperatur wird die Teilfunktion *Heizenergie bereitstellen* definiert. Die Heizenergie muss anschließend transportiert werden, woraus sich die Teilfunktion *Heizenergie leiten* ableiten lässt. Schließlich wird die Heizenergie in die gewünschte *Prüftemperatur umgewandelt*, die anschließend konstant gehalten werden muss.

Aufgrund des hohen Prüfdrucks entstehen im Prüfstand erhebliche *Kräfte*, die durch den Prüfstandsaufbau *kompensiert* werden müssen.

Im nächsten Schritt werden die identifizierten Teilfunktionen in einer Funktionsstruktur angeordnet. Hierzu wird die hierarchische Methode angewendet, da die Teilfunktionen unabhängig voneinander ablaufen können. Die Hauptfunktion des Prüfstands wird als *Bauteil verdichten* definiert. Sie lässt sich in die drei übergeordneten Teilfunktionen *Arbeitsdruck erzeugen*, *Prüftemperatur erzeugen* und *Kräfte kompensieren* gliedern. Die zuvor ermittelten Teilfunktionen werden diesen Bereichen zugeordnet, wodurch die in **Abbildung 5** dargestellte Funktionsstruktur entsteht.

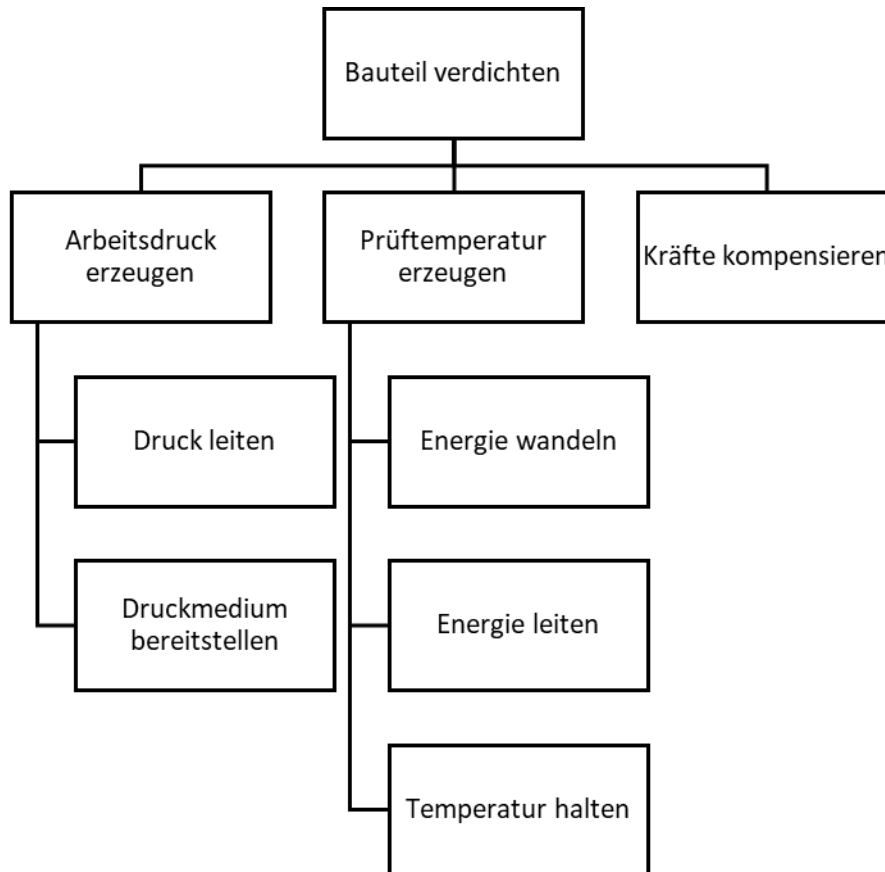


Abbildung 5: Funktionsstruktur Prüfstand

Heizkonzept

Die Prü fzelle kann über verschiedene Wärmeerzeuger aufgeheizt werden. Zum einen kann eine Heizspirale, die durch eine Flüssigkeit durchlaufen wird, erwärmt werden, zum anderen kann die Erwärmung auch elektrisch erfolgen.

Die elektrische Erwärmung würde über einen in den Prüfraum eingebauten Heizdraht erfolgen (vgl. **Abbildung 6**). Aufgrund der geforderten Drücke erweist sich dieses Heizkonzept jedoch als unbrauchbar. Es sind für diese Drücke keine geeigneten Stromdurchführungen verfügbar. Aus diesem Grund wird auf eine, mit Heizfluid gefüllte Heizspirale zurückgegriffen.

- Heizen durch elektrische Heizung
- Funktioniert bei hohen Drücken nicht

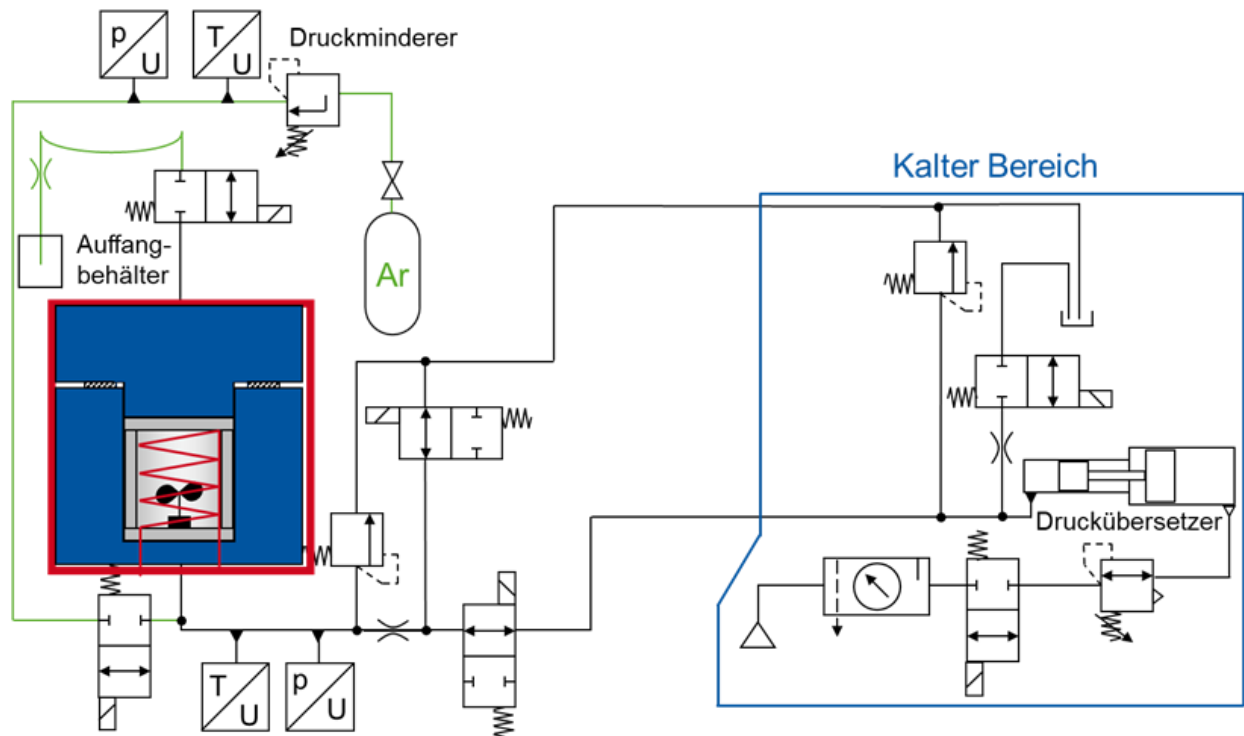


Abbildung 6: Konzept mit beheiztem Prozessraum

Entwicklung Konzept 1

Das erste Prüfstandkonzept (vgl. **Abbildung 7**) umfasst zwei Hydraulikkreisläufe. Dabei handelt es sich um einen Heiz- und um einen Druckkreislauf.

Der Hochdruckkreislauf wird von einer Druckübersetzer (5) angetrieben, der einen Betriebsdruck von bis zu 4000 bar bereitstellt und die Prüfkammer (2) unter Druck setzt.

Die Prüfkammer (vgl. **Abbildung 8**) besteht aus einem zylindrischen Stahlbehälter (7), der als Druckbehälter dient und mit zwei Deckeln (6; 9) verschlossen wird. Über den unteren Deckel ist der Behälter mit dem Hydraulikkreislauf verbunden.

Aufgrund des Systemdrucks wirken Kräfte, welche die Deckel axial aus der Prüfkammer drücken. Um diese Kräfte aufzunehmen, wird während des Versuchs ein Stahlrahmen (1) um den verschlossenen Behälter positioniert. Dieser absorbiert die entstehenden Belastungen.

Im Inneren der Prüfkammer befindet sich eine Prüfzelle (8) mit mehreren Isolierschichten (12), welche eine konstante Temperatur von bis zu 200 °C gewährleisten soll. Ein Deckel (10), der ebenfalls mit Isolierschichten ausgestattet ist, prägt den anliegenden Druck in der umliegenden Prüfkammer auf, da dieser frei gelagert ist. Aufgrund des Kräftegleichgewichts zwischen Druck in der Prüfzelle und in der umliegenden Prüfkammer besteht keine besondere Anforderung an das Material der Prüfzelle.

Die Versuchstemperatur wird durch den Heizkreislauf geregelt. Dieser besteht aus einem Tank (4), der mit zwei Patroneneinschraubheizkörpern ausgestattet ist. Die Heizkörper ermöglichen eine Tanktemperaturerhöhung auf bis zu 300 °C. Vom Tank aus wird das Hydraulikfluid über eine Hochtemperaturpumpe (3) mit Niederdruck in die Prüfzelle innerhalb der Prüfkammer gefördert. Dort strömt das Fluid durch eine Heizspirale und erwärmt den Innenraum der Prüfzelle.

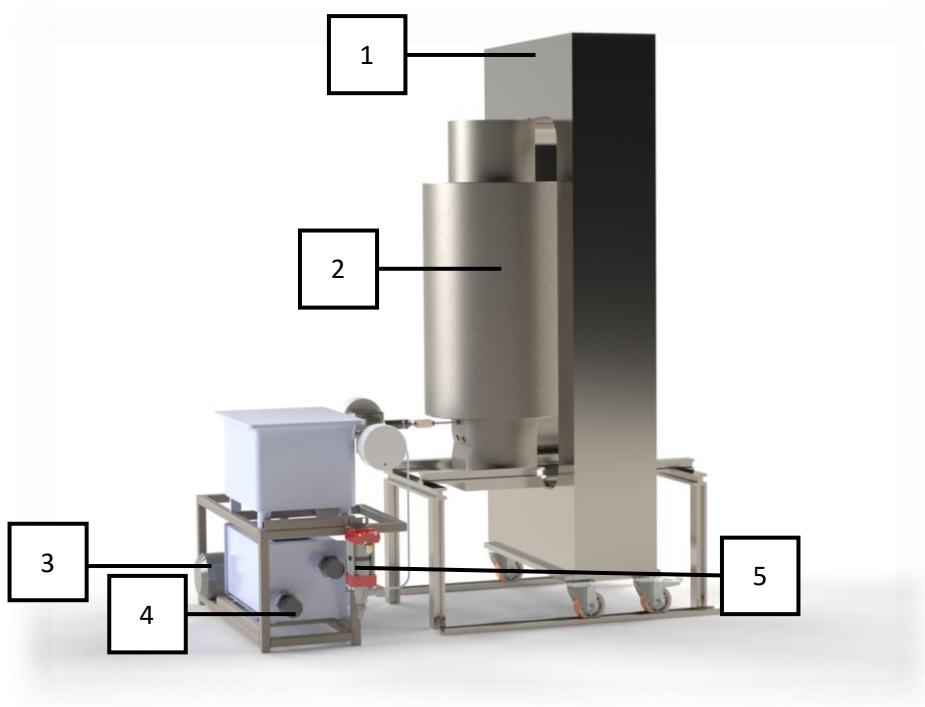


Abbildung 7: Prüfstandskonzept 1

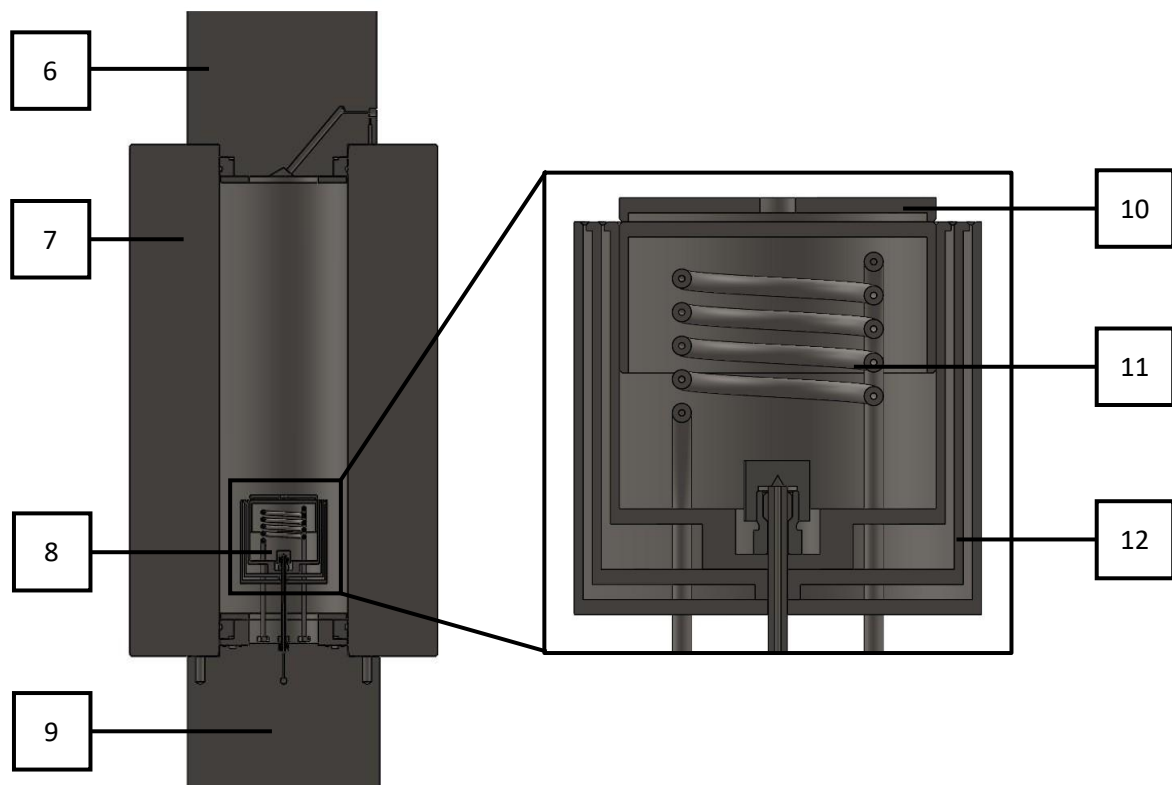


Abbildung 8: Prü fzelle des ersten Konzeptes

Planung

Bei der Planung des Prüfstands sind zwei zentrale Punkte der Anforderungsliste (vgl. **Tabelle 3**) zu berücksichtigen. Erstens muss sichergestellt werden, dass die Prüftemperatur von 200 °C innerhalb der

Prüfkammer konstant aufrechterhalten wird. Dies wird durch eine CFD-Simulation validiert.

Zweitens muss der Rahmen den infolge des Drucks entstehenden Kräften standhalten. Dies wird mithilfe einer FEM-Analyse und Berechnungen mit Hilfe der AD2000 sichergestellt. Im Folgenden werden die durchgeführten Simulationen beschrieben und die daraus resultierenden konstruktiven Anpassungen erläutert.

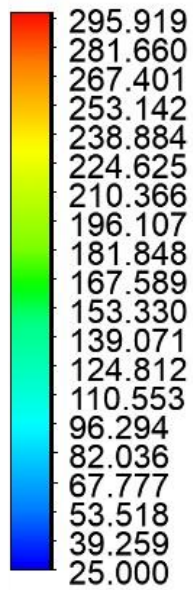
Zunächst erfolgt die Auslegung der Isolierung der inneren Prü fzelle. Diese wird durch einen mehrwandigen Stahlbehälter realisiert, dessen Zwischenräume mit dem ausgewählten Wärmeträgerfluid Fragoltherm Q-HTF gefüllt sind. Die Auslegung des Behälters wird mithilfe einer CFD-Simulation in ANSYS Fluent durchgeführt.

Es werden mehrere Simulationen durchgeführt, bei denen die Anzahl der Isolierschichten und die Heizdauer variiert werden. Für alle Simulationen wird das durch die Heizspirale strömende Heizfluid mit einer Temperatur von 300 °C definiert, während die Umgebungsluft eine Temperatur von 25 °C aufweist. Die Prü fzelle wird innerhalb der Prüfkammer untersucht, wobei die Geometrien für die Simulation vereinfacht werden.

Das Ergebnis der CFD-Simulation (vgl. **Abbildung 9**) zeigt eine vierwandige Prü fzelle, die mit einem zweischichtigen Deckel verschlossen ist. Durch diese Auslegung kann eine Prü ftemperatur von 200 °C nach einer Aufheizzeit von etwa drei Stunden erreicht werden. Die innere Prü fzelle wird als Schweißkonstruktion ausgeführt.

Die Prü fzelle ist in einer 800 mm hohen Prüfkammer verbaut. Diese Höhe ergibt sich ebenfalls aus den Ergebnissen der CFD-Simulation und dient der thermischen Isolierung des oberen Deckels.

Temperature
Contour 1



[C]

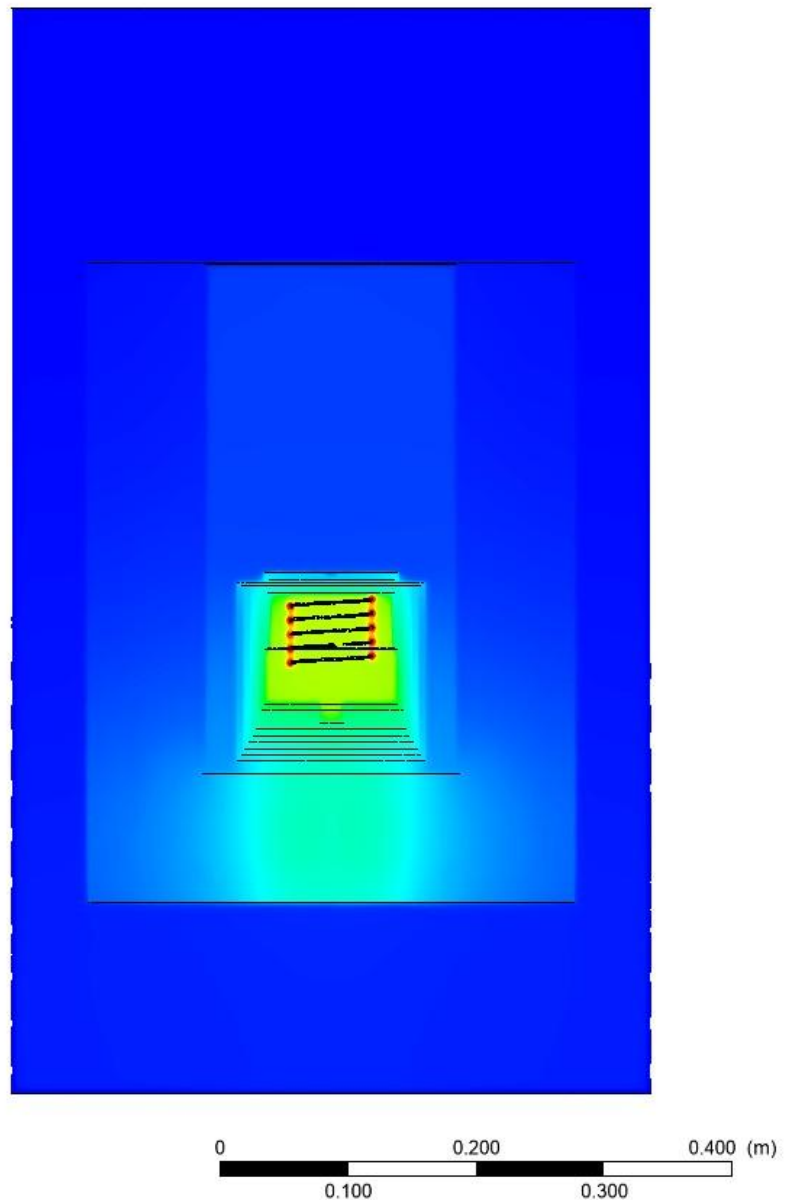


Abbildung 9: CFD-Simulation Prüfkammer nach 180 Minuten

Aufgrund des Prüfdrucks und der Prüftemperatur wird der Prüfbehälter aus dem Vergütungsstahl 27NiCrMoV15-6 gefertigt, welcher durch Berechnungen der AD 2000 ermittelt wurde.

Im nächsten Schritt wird der Rahmen des Prüfstands ausgelegt. Er dient der Aufnahme und Kompensation der in der Prüfkammer entstehenden Kräfte. Die Berechnung wird mithilfe einer FEM-Simulation in ANSYS Mechanical durchgeführt. Hierzu werden die Geometrien vereinfacht und für die Prüfkammer ein Innendruck von 2500 bar definiert. Durch die Simulation ergibt sich der in Abbildung 10 dargestellte Rahmen.

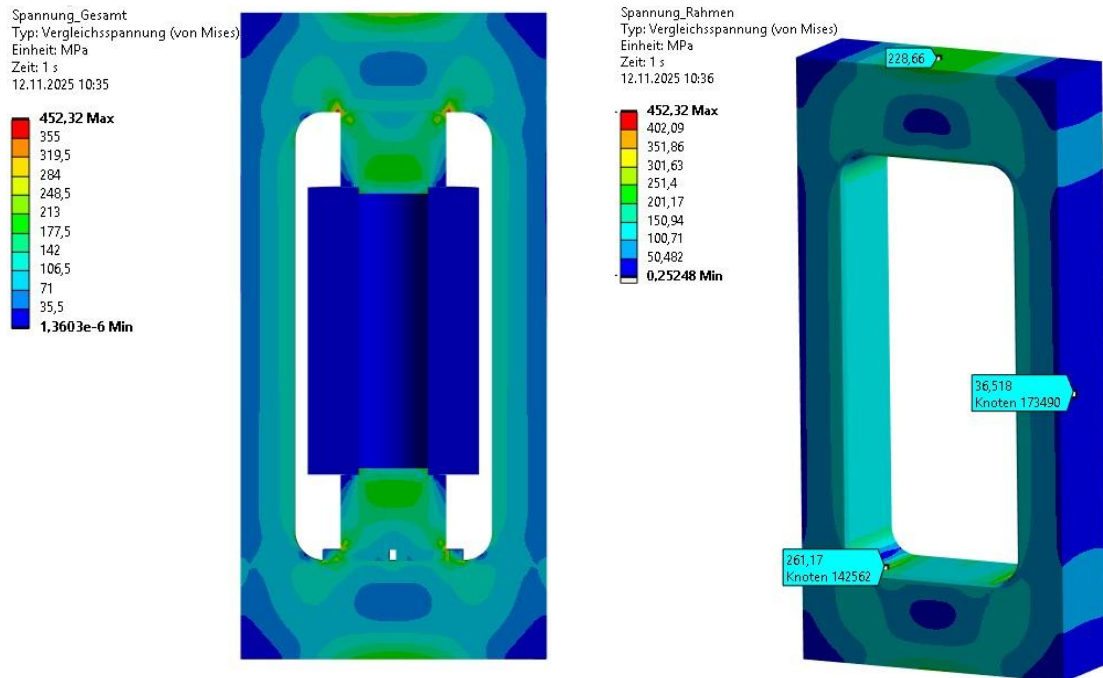


Abbildung 10: FEM-Simulation Rahmen

Die Dimensionierung der einzelnen Komponenten führt zu einem insgesamt hohen Systemgewicht. So beträgt das Gewicht des Rahmens etwa 2000 kg, während die Prüfkammer ohne Deckel rund 930 kg wiegt. Die Dimensionierung der Bauteile hat hohe Material- und Fertigungskosten zur Folge. Mit diesem Prüfstandkonzept kann das Projektbudget nicht eingehalten werden. Somit muss ein kostengünstigeres Konzept entwickelt werden. Zusätzlich kann aufgrund der kann der Prüfstand nicht mehr in den Prüfkammern des ifas aufgebaut und bewegt werden, da das zulässige Krantraggewicht überschritten wird.

Entwicklung Konzept 2

Das zweite Konzept (vgl. **Abbildung 11**) umfasst, ebenso wie das erste, zwei Hydraulikkreisläufe. Der wesentliche Unterschied liegt im Aufbau der Prüfkammer (3), die deutlich kompakter ausgeführt ist. So wurde die Zylinderhöhe von 800 mm auf 230 mm reduziert, während der Innendurchmesser mit 200 mm identisch ist. In diesem Konzept wird auf eine isolierte Prü fzelle im Inneren der Kammer verzichtet, sodass der gesamte Innenraum der Prüfkammer beheizt wird. Die thermische Isolierung (1; 2) erfolgt durch außen angebrachte Dämmwolle. Das übrige Funktionsprinzip entspricht dem des ersten Konzepts.

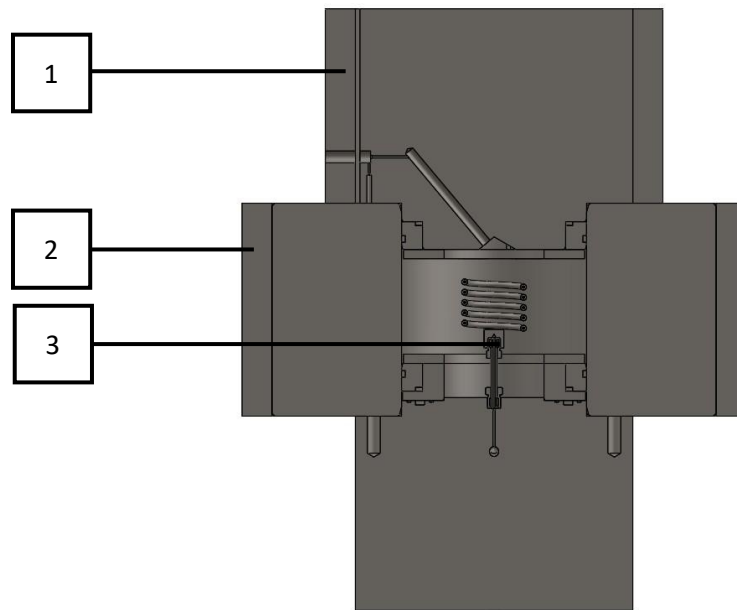


Abbildung 11:Prüfkammer des zweiten Prüfstandkonzeptes

Das Vorgehen bei der Auslegung der Komponenten entspricht dem des ersten Konzepts. Zunächst wird eine CFD-Simulation (vgl. **Abbildung 12**) durchgeführt, um die thermische Auslegung der Prüfkammer zu analysieren. Dabei werden verschiedene Größen von Heizspiralen, Wandkonfigurationen und Isolierschichtdicken untersucht. Keine der untersuchten Varianten ermöglicht das Erreichen einer Prüftemperatur von über 157 °C nach einer Zeit von 180 Minuten. Somit kann die geforderte Zieltemperatur von 200 °C nicht erzielt werden.

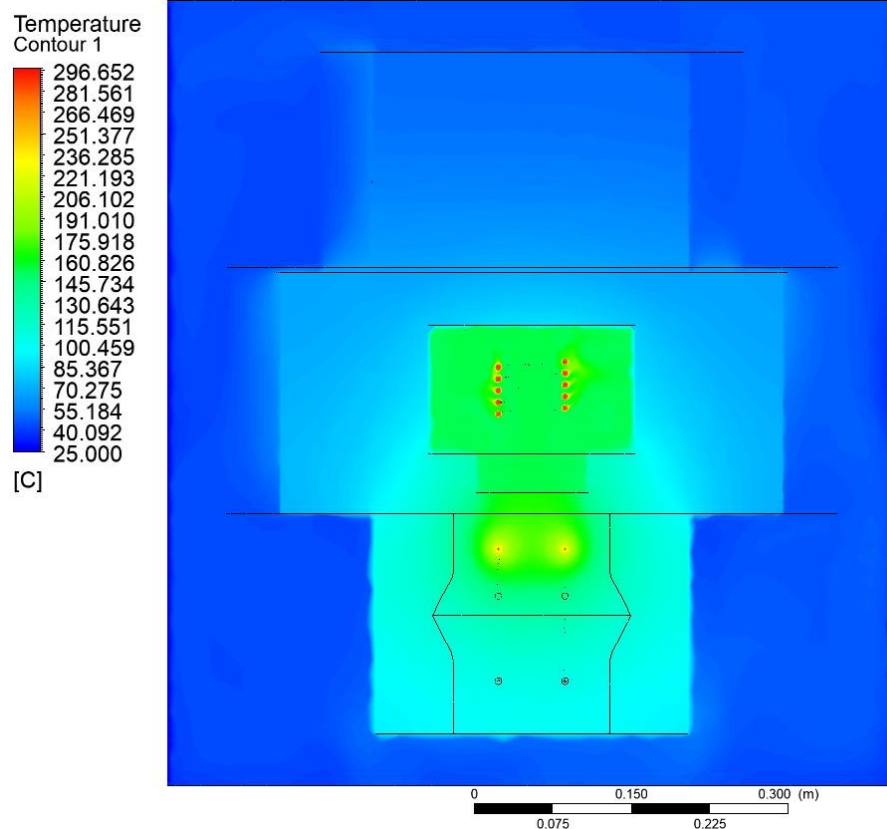


Abbildung 12: CFD-Simulation der zweiten Prüfkammer nach 180 Minuten

Da die geforderte Zieltemperatur nicht erreicht werden konnte, wird die Entwicklung dieses Prüfstandkonzepts nicht fortgesetzt. Folglich wird auch auf die Durchführung einer FEM-Simulation verzichtet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass unter den finanziellen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen kein für den Industrieinsatz geeigneter Prüfstand realisiert werden kann. Daher ist die Entwicklung einer alternativen Lösung erforderlich. Dies wurde im Rahmen der PbA mit den Teilnehmenden besprochen und als einzige Möglichkeit bestimmt Ergebnisse in Hinblick auf die Funktionseignung des L-HIP Prozesses zu erzielen.

Entwicklung Ersatzkonzept

Da sich die Umsetzung eines industrienahen Konzepts unter den gegebenen Rahmenbedingungen als nicht realisierbar erwiesen hat, besteht das neue Ziel darin, die Prinzipielle Durchführbarkeit des Härteverfahrens der Probenkörper zu überprüfen. Zu diesem Zweck soll ein Prüfstand entwickelt werden, der mindestens einen Probenkörper bei 200 °C und 2000 bar nachverdichtet.

Anders als bei den ersten beiden Konzepten kommt beim dritten Konzept nur ein einziger Hydraulikkreislauf zum Einsatz, der ausschließlich dem Druckaufbau dient. Die Temperaturzufuhr erfolgt über einen Ofen, in den die Prüfkammer (vgl. **Abbildung 13**) eingesetzt und anschließend erwärmt wird. Die Hydraulikkomponenten sind außerhalb des Ofens angeordnet und über Rohrleitungen mit der sich im Inneren befindlichen Prüfkammer verbunden.

Die Prüfkammer fällt bei diesem Konzept deutlich kleiner aus, sodass sie nur Platz für einen Prüfkörper (4) bietet. Über die Verschraubung (2), die mit der Druckleitung verbunden ist, wird der Druck in die

zylindrische Prüfkammer (1) geleitet. In diese wird durch eine Öffnung der Prüfkörper eingelegt. Die Öffnung wird mit einem Stopfen (3) verschlossen, um den Prüfdruck innerhalb des Zylinders halten zu können.

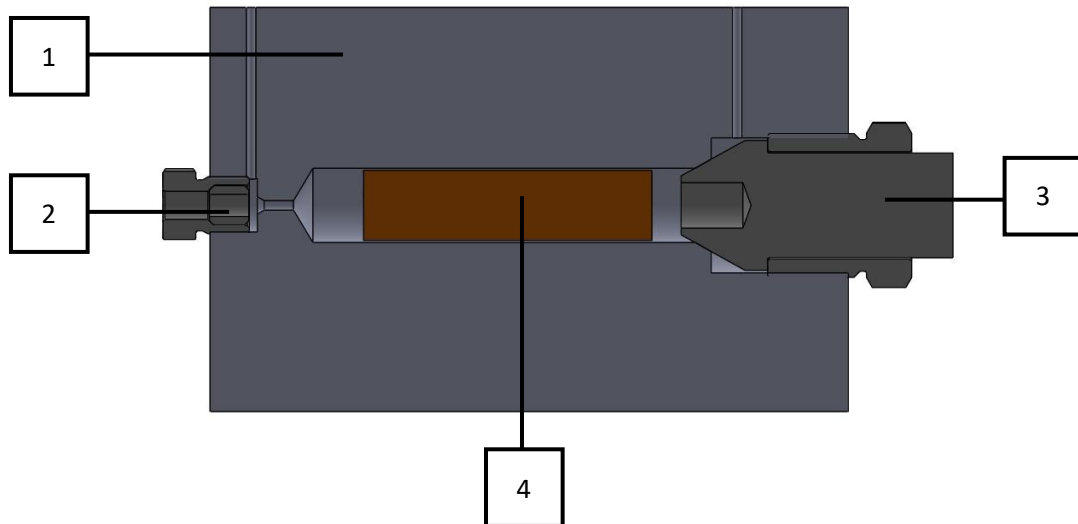


Abbildung 13: Prüfstandkonzept drei

Arbeitspaket 3.3 Festigkeitsanalyse Druckkammer mittels FEM

Zur Auslegung der Prüfkammer wird eine FEM-Simulation durchgeführt, um sicherzustellen, dass sie dem Druck von 2500 bar standhält. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in **Abbildung 14** dargestellt. Eine CFD-Simulation ist für dieses Konzept nicht erforderlich, da die Versuchstemperatur durch den Ofen direkt auf die Prüfkammer übertragen wird, wodurch sich der gesamte Aufbau gleichmäßig auf 200 °C erwärmt. Aufgrund des Druckes wurde für die Prüfkammer der legierter Vergütungsstahl 30CrNiMo8V als Werkstoff ausgewählt.

C: Kurz

Vergleichsspannung 2
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 1 s
12.11.2025 14:08

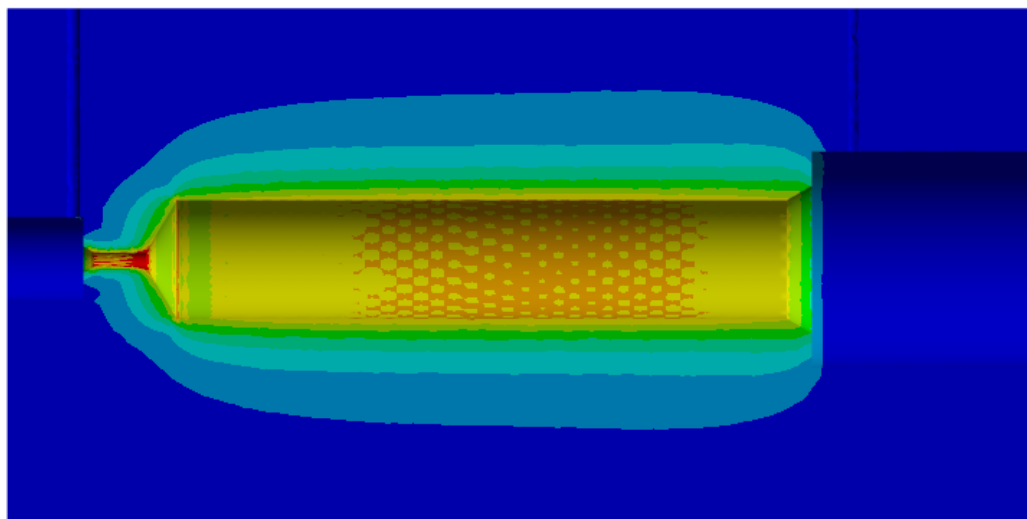
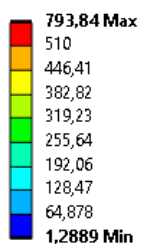


Abbildung 14: FEM-Simulation der Prüfkammer des Ersatzkonzepts in Schnittansicht

Für die Druckkomponenten wird auf Hochdruckkomponenten der Firma *Maximator* zurückgegriffen, welche entsprechende Festigkeiten bei den gegebenen Prüfparametern erzielen. Als Pumpe dient dabei der pneumatisch betriebene Druckübersetzer vom Typ M111-2 (vgl. **Abbildung 15**). Dieser wird mit einem Luftdruck von bis zu zehn bar betrieben und besitzt ein Übersetzungsverhältnis von 1:261.



Abbildung 15: Maximator-Druckübersetzer M111-2

Ein schematisches Schaltbild des Prüfstands ist in **Abbildung 16** dargestellt. Von dem Druckübersetzer aus wird die Druckleitung zu einem Drucksensor (vgl. **Abbildung 18**) geführt, welcher den Prüfdruck überwacht. Bei dem Drucksensor handelt es sich um einen *P3ICP* der Marke *HBM*. Dieser ermöglicht es einen Druck von bis zu 3000 bar zu messen. Der Sensor wird über einen eigens dafür konstruierten Block (vgl. **Abbildung 18**) in die Druckleitung integriert. Von dort führt die Druckleitung in den Klimaschrank, in dem die Prü fzelle (Druckrohr) verbaut ist. Zum Ablassen des Drucks wird ein pneumatisch betätigtes Ventil verwendet.

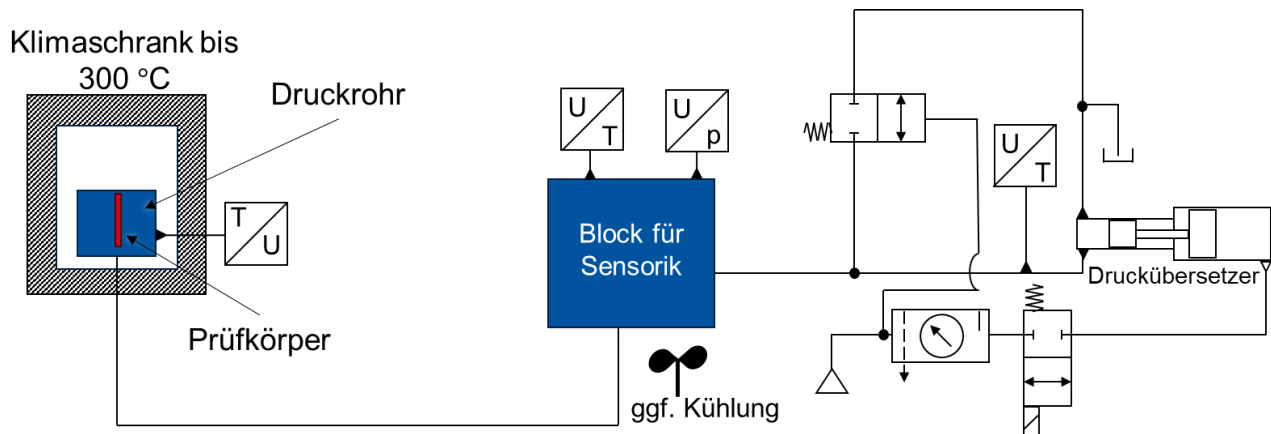


Abbildung 16: Schaltbild des Prüfaufbaus

In **Abbildung 17** ist ein Foto des Prüfaufbaus dargestellt. Die Einheit des zum Druckaufbau ist räumlich von der Wärmequelle entfernt.



Abbildung 17: Foto des Prüfaufbaus

Der Prüfstand ist so konzeptioniert, dass die eingebrachte Temperatur allein in das Druckrohr eingeleitet wird. Die weiteren Komponenten wie Drucksensor und Druckübersetzer sollen räumlich möglichst weit vom Klimaschrank entfernt sein, dass die Temperatur des Fluids am den weiteren Komponenten nicht die maximale Betriebstemperatur übersteigt. Für den Druckübersetzer darf eine Temperatur von 60 °C nicht überschritten werden und für den Drucksensor eine Temperatur von 80 °C. Die Temperatur wird entsprechend über Thermoelemente überwacht.

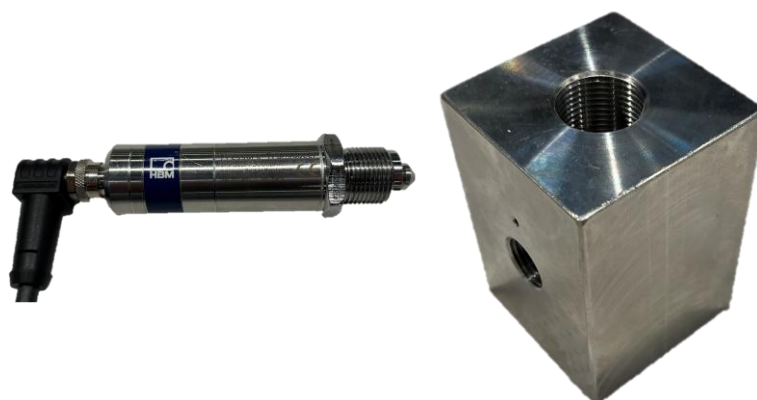


Abbildung 18: Drucksensor (links) und Einschraubblock für den Drucksensor (rechts)

Die Temperaturüberwachung im Inneren des Klimaschranks erfolgt über Thermoelemente. Diese werden durch die Durchführung des Klimaschranks geführt und in die Entlastungsbohrung für die Verschraubungen des Druckrohrs geleitet (Abbildung 19). Die Spitze des Thermoelements liegt direkt auf dem Rohr auf

(Wandstärke 2 mm). So ist es möglich, eine Temperatur zu erfassen, welche möglichst identisch zu der Temperatur des Fluides im Druckrohr ist.

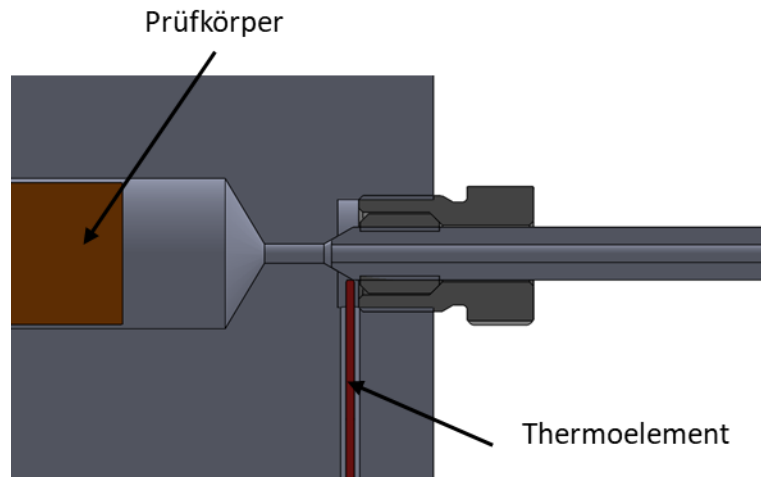


Abbildung 19: Position Thermoelement zur Temperaturermittlung

1.4 Arbeitspaket 4: L HIP-Prozessentwicklung (ifas)

Der Prozess des flüssigkeitsbasierten Verdichtens soll mit Hilfe des Prüfstandes validiert werden. Dazu sollen im Prozessraum mindestens eine Temperatur von 200 °C und ein Druck von 2000 bar erreicht werden. Zu diesem Zweck werden die Druckrohre mit den Prüfkörpern bestückt und im Klimaschrank erhitzt. Die Temperatur wird mit Hilfe eines in die Entlastungsbohrung eingesetzten Thermoelement gemessen. Somit wird ein Messpunkt erreicht, welcher räumlich nah am Fluid ist. Die Aufheizzeit bis zum Erreichen der 200 °C beträgt ungefähr 120 Minuten. Anschließend wird der Druck mit Hilfe des Druckübersetzers aufgeprägt und entsprechend über die Dauer der Prüfzeit (30 min) gehalten.

In **Abbildung 20** ist exemplarisch für eine Prüfung der Verlauf von Druck und der Temperatur, gemessen am Druckrohr dargestellt. Die Vorgaben für Temperatur (200 °C) und Druck (2000 bar) können über die gesamte Prüfzeit gehalten werden. Die durchschnittliche Temperatur beträgt dabei 204 °C und der durchschnittlich aufgeprägte Druck 2110 bar.

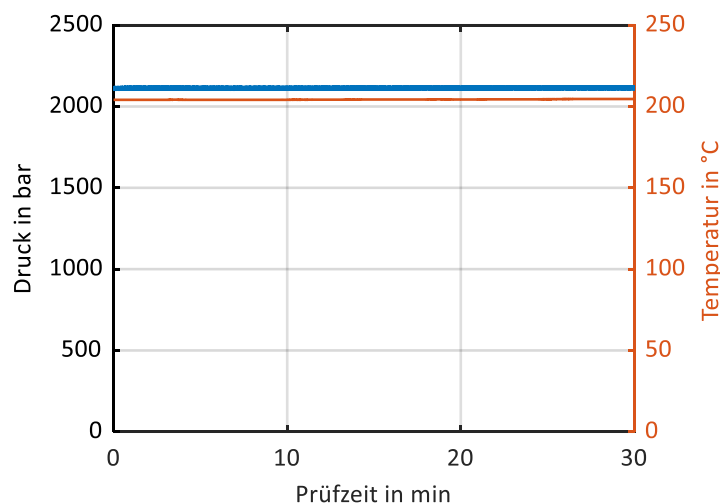


Abbildung 20: Verlauf des Drucks und der Temperatur im Druckrohr während der Laufzeit des flüssigkeitsbasierten Verdichtens

Pro Versuchsdurchgang können mit dem Prüfkonzept drei Prüfkörper verdichtet werden. Aufgrund der zeitlich intensiven Aufheiz- sowie Abkühlzeit ist es lediglich möglich pro Arbeitstag einen Versuchsdurchgang zu realisieren. In Abbildung 21 ist der Verlauf eines Versuchszyklus mit Aufheiz- und Abkühlvorgang dargestellt. Der Aufheizvorgang dauert circa 2 Stunden bis die 200 °C im Druckrohr erreicht ist. Aufgrund der Wärmeausdehnung des Fluid steigt der Druck im System während des Aufheizvorgangs bereits auf über 500 bar an. Bis das Druckrohr wieder handwarm ist und entsprechend demontiert und neu bestückt werden kann, werden weitere 6 Stunden Abkühlzeit benötigt.

Aufgrund dessen hat sich der projektbegleitende Ausschuss darauf geeinigt die Probenzahl zu minimieren. Versuche wurden bis zum Projektende (März 2026) durchgeführt, wobei die folgenden Proben mit dem L-HIP Konzept verdichtet wurden.

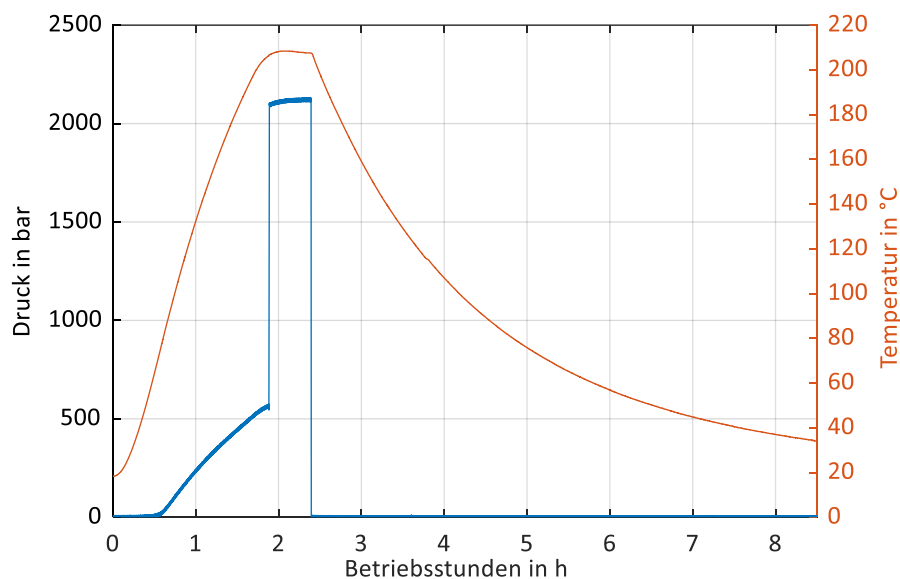


Abbildung 21: Verlauf der gesamten Prüfung mit Aufheizen und Abkühlen

1.5 Arbeitspaket 5: Messungen und Auswertung (ifas/ILT)

Ziel des Hauptarbeitspakets 5 war die werkstofftechnische Bewertung der im Gesamtvorhaben entwickelten Prozesskette. Hierzu wurden die in Hauptarbeitspaket 2 gewonnenen Erkenntnisse zur reproduzierbaren PBF-LB/M-Fertigung von Probekörpern mit definierten Porositätsklassen mit den in Hauptarbeitspaket 4 erzielten Ergebnissen zur L-HIP-Behandlung zusammengeführt. Untersucht wurde, in welchem Umfang die L-HIP-Behandlung in Abhängigkeit von der anfänglichen Porositätsklasse und Defektausprägung zu einer Reduzierung beziehungsweise Schließung innerer Defekte führt und wie sich diese Veränderungen auf die quasistatischen mechanischen Eigenschaften, das Ermüdungsverhalten und die Streuung der Kennwerte auswirken. Die Ergebnisse wurden den Direct-Aging-Zuständen sowie einer unter vergleichbarer thermischer Prozessführung, jedoch ohne aktive Druckbeaufschlagung behandelten Referenz gegenübergestellt.

Arbeitspaket 5.1 Metallographische Untersuchungen (rel. Dichte, Mikrostruktur) (ILT)

Für sämtliche untersuchten Verfahrensparameterkombinationen wurde die resultierende relative Dichte mittels Phasenkontrastierung lichtmikroskopischer Aufnahmen metallographisch präparierter Schliffe bestimmt. Hierzu wurden die Schliffbilder bildanalytisch segmentiert, wobei innere Defekte anhand ihrer gegenüber der metallischen Matrix geringeren Grauwertintensität identifiziert wurden. Die relative Dichte

wurde aus dem Flächenanteil der detektierten Defekte innerhalb der ausgewerteten Schlifffläche abgeleitet.

Neben der im Schliffbild ermittelten Gesamtporosität (Gesamtdefektflächenanteil) waren für die Bewertung des L-HIP-Prozesses insbesondere Größe und Morphologie der Defekte von Bedeutung. Als Größenkennwert wurde der äquivalente Kreisdurchmesser verwendet. Defekte mit einem mittleren Durchmesser $D > 25 \mu\text{m}$ wurden im Hinblick auf eine vollständige Verdichtung während des L-HIP-Prozess als potenziell kritisch eingestuft.

Aus diesem Grund wurden aus jedem Schliffbild mittels Geometrieerfassung die Defektgröße und die Rundheit für jeden detektierten Defekt extrahiert und anschließend anhand von Histogrammen sowie kumulierten Häufigkeitsverteilungen statistisch ausgewertet, wie in Abbildung 22 schematisch dargestellt. Verfahrensparameter, die zu großen relativen Werkstoffdichten führen, zeichnen sich durch ein Histogramm mit geringer Streubreite und eine steile kumulierte Häufigkeitsverteilung aus. Niedrige Werkstoffdichten korrelieren dagegen im Allgemeinen mit breiteren Streuungen im Histogramm und einem erhöhten Anteil großer Werkstoffdefekte ($D > 25 \mu\text{m}$).

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 15 exemplarisch für die kleinste und größte untersuchte Schichtdicke $D_s = 60 \mu\text{m}$ bzw. $D_s = 150 \mu\text{m}$ dargestellt. Grundsätzlich wird mit zunehmender Schichtdicke eine Zunahme sowohl der Defektanzahl als auch der Defektgröße beobachtet, was auf einen zunehmend instabilen Fertigungsprozess hindeutet. Eine direkte Übertragbarkeit der Fertigungsqualität und Reproduzierbarkeit von $D_s = 60 \mu\text{m}$ auf größere Schichten im Bereich von $D_s = 120 - 150 \mu\text{m}$ war daher nicht gegeben.

Für den umfangreichen mechanische Versuchsprogramm wurde deshalb in Abstimmung mit dem PbA eine Schichtdicke von $D_s = 60 \mu\text{m}$ festgelegt.

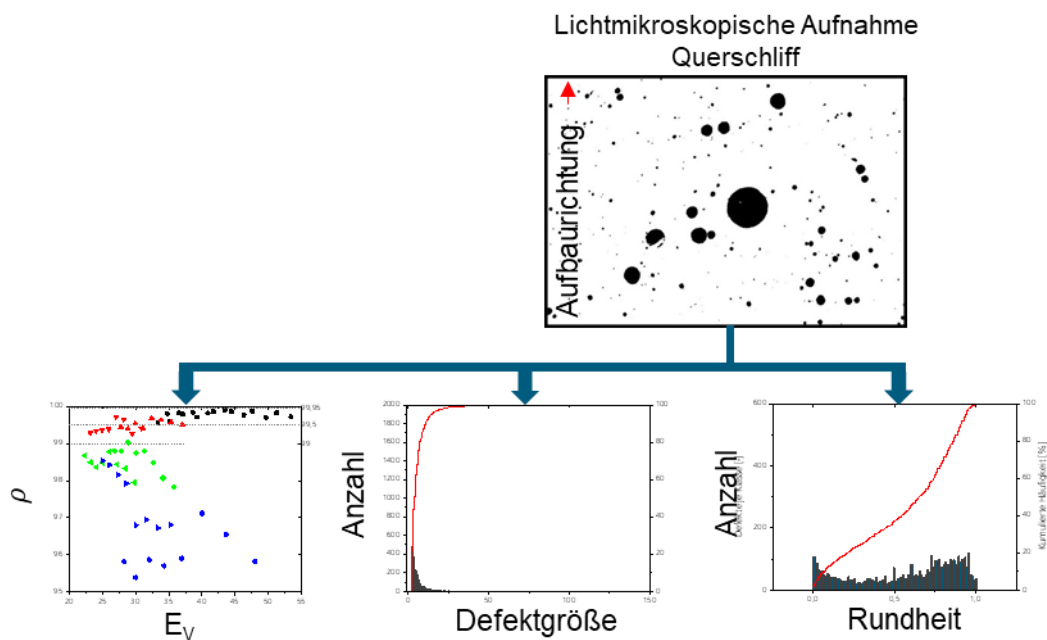


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bestimmung der relativen Dichte ρ , der Defektgrößen- und Sphäritätsverteilung anhand lichtmikroskopischer Schliffaufnahmen

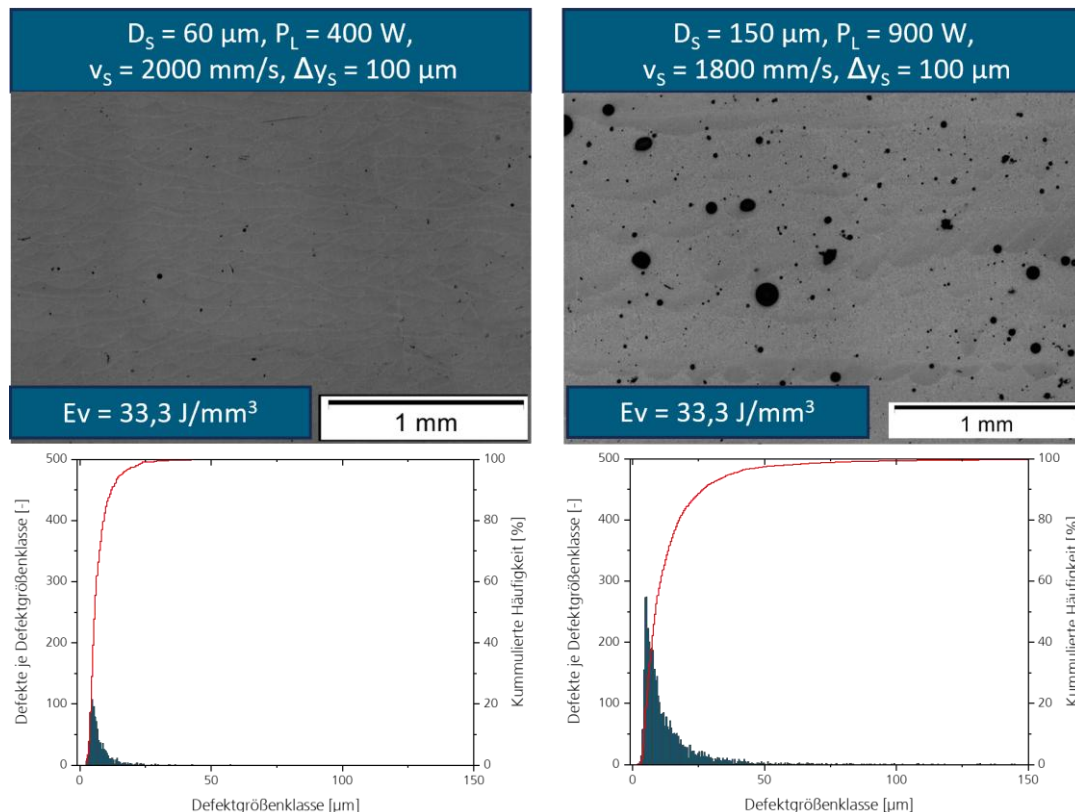


Abbildung 23: Metallographische Schliffbilder und zugehörige Defektgrößenverteilungen von mittels PBF-LB/M gefertigtem AlSi10Mg mit hoher bei $D_s = 60\mu\text{m}$ (linke Bildhälfte) und niedriger relativer Dichte bei $D_s = 150\mu\text{m}$ (rechte Bildhälfte)

Die Mikrostruktur der in AP2.2 gefertigten Probekörper wurde für jede Schichtdicke mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie Härtemessung charakterisiert. Dabei wurden sowohl der unbehandelte als auch der wärmebehandelte Zustand der Probekörper untersucht. Exemplarische Aufnahmen sind in Abbildung 24 zusammengefasst.

Für Schichtdicken $D_s \leq 90\mu\text{m}$ zeigt sich eine vergleichsweise homogene Mikrostruktur mit der für mittels PBF-LB/M gefertigtem AlSi10Mg typischen Erstarrungsstruktur innerhalb der Schmelzbäder. Bei größeren Schichtdicken wird hingegen eine zunehmend inhomogene Mikrostruktur beobachtet, die durch Bereiche mit gröberer und feinerer Erstarrungsstrukturen gekennzeichnet ist. Die Ausbildung gröberer Erstarrungsstrukturen ist auf ein das iterative Wiederaufschmelzen tieferer Schichten zurückzuführen, das infolge der bei diesen Schichtdicken erforderlichen hohen Laserleistungen und der damit verbundenen größeren Einschmelztiefen auftritt. Die gröberen Mikrostrukturbereiche konnten anhand der REM-Aufnahmen qualitativ bestätigt werden.

Auffällig ist darüber hinaus die atypische Mikrostruktur nach der Wärmebehandlung mittels Direct Aging. Diese ist durch degradierte zelluläre Netzwerke sowie eine nur geringe Ausscheidungsbildung gekennzeichnet. Die geringe Ausscheidungsbildung spiegelt sich in einem Rückgang der Werkstoffhärte über alle untersuchten Schichtdicken wider. Als Ursache wird die ursprünglich eingestellte Vorheiztemperatur der Bauplattform auf $200\text{ }^\circ\text{C}$ angesehen. Durch die Vorwärmung in diesem Temperaturbereich finden bereits während des Fertigungsprozesses Phasenumwandlungen im erstarrten Werkstoff statt, die als In-situ-Wärmebehandlung beschrieben werden können. Die anschließende Alterungsbehandlung führt in der Folge zu einer Überalterung des Werkstoffes und damit zu dem gemessenen Rückgang der Werkstoffhärte.

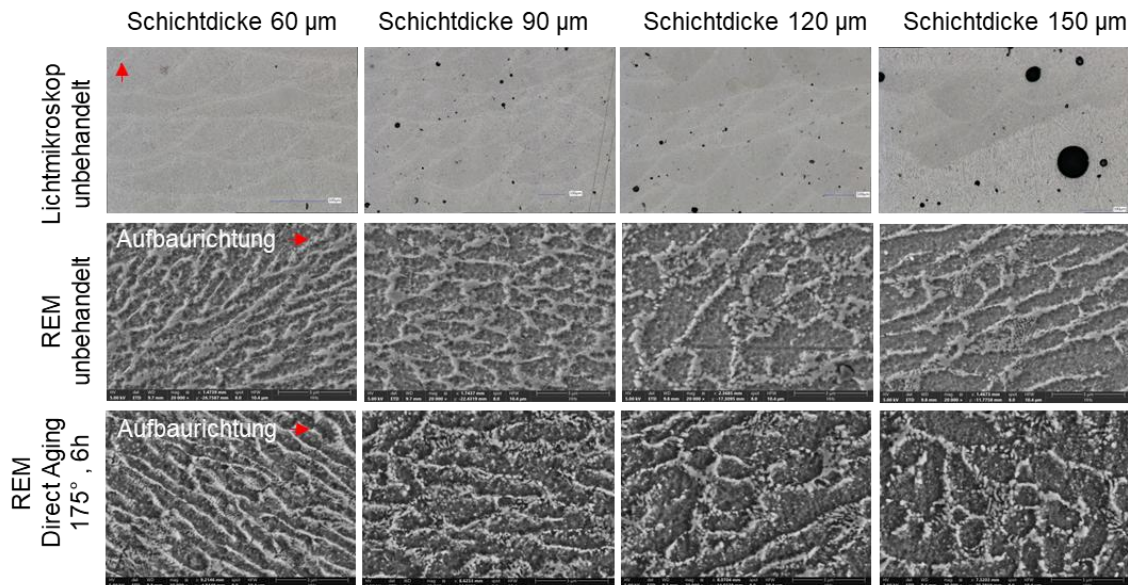


Abbildung 24: Exemplarische Gefüge-Aufnahmen mittels Lichtmikroskop und REM im unbehandelten und Direct-Aging-wärmebehandelten Werkstoffzustand für unterschiedliche Schichtdicken, gefertigt bei Vorheiztemperatur von 200 °C

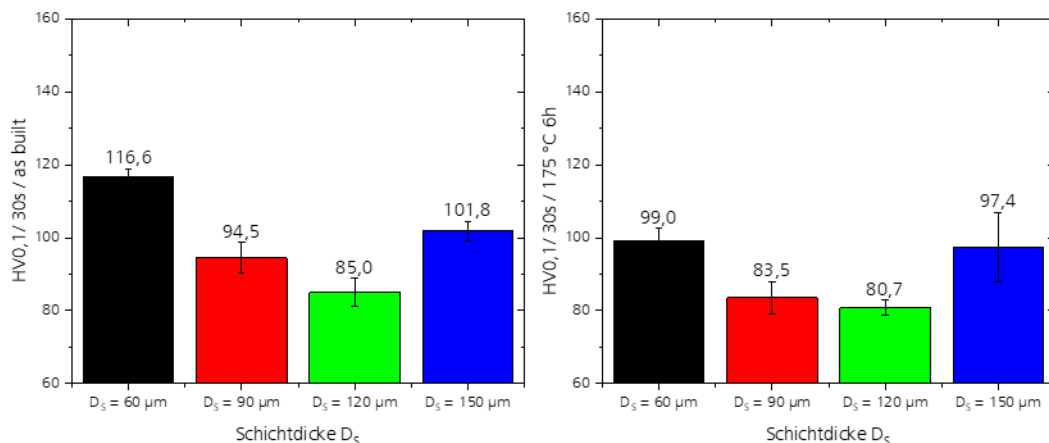


Abbildung 25: Gemessene Werte der Härte HVO,1 für verschiedene Schichtdicken im unbehandelten Zustand (links) sowie nach Direct Aging Wärmebehandlung (rechts), jeweils gemittelte Werte aus 5 Einzelmessungen je Schichtdicke. Plattformtemperatur 200 °C

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde in Abstimmung mit dem PbA die Plattformtemperatur für die Fertigung mechanischer Prüfkörper auf 100 °C abgesenkt. Für diese Plattformtemperatur wurden in Vorbereitung auf das Prüfprogramm Verfahrensparameter zur Einstellung der verschiedenen Porositätsklassen bei einer Schichtdicke $D_s = 60 \mu\text{m}$ entwickelt. Darüber hinaus wurden die beiden Direct Aging-Wärmebehandlungen erneut als Referenzzustand untersucht. Abbildung 27 zeigt exemplarische REM-Aufnahmen des Werkstoffgefüges im Ausgangszustand sowie nach Direct Aging-Wärmebehandlung. Im Ausgangszustand wurde ein intaktes, durchgängiges zelluläres Silizium-Netzwerk sowie innerhalb der Zellen eine vergleichsweise reine Aluminiummatrix mit nur geringer Ausscheidungsbildung festgestellt. Beide Direct Aging-Wärmebehandlungen führen zu einer verstärkten Ausscheidungsbildung siliziumreicher Partikel, die in den Aufnahmen als helle Partikel erkennbar sind. Hinsichtlich der Härte werden im Vergleich zur Vorheiztemperatur von 200 °C deutlich höhere Werte im unbehandelten Zustand sowie eine (moderate)

Härtesteigerung infolge der Wärmebehandlung gemessen. Vor diesem Hintergrund wurde die Plattformtemperatur für die Fertigung der mechanischen Prüfkörper dauerhaft auf 100 °C festgelegt.

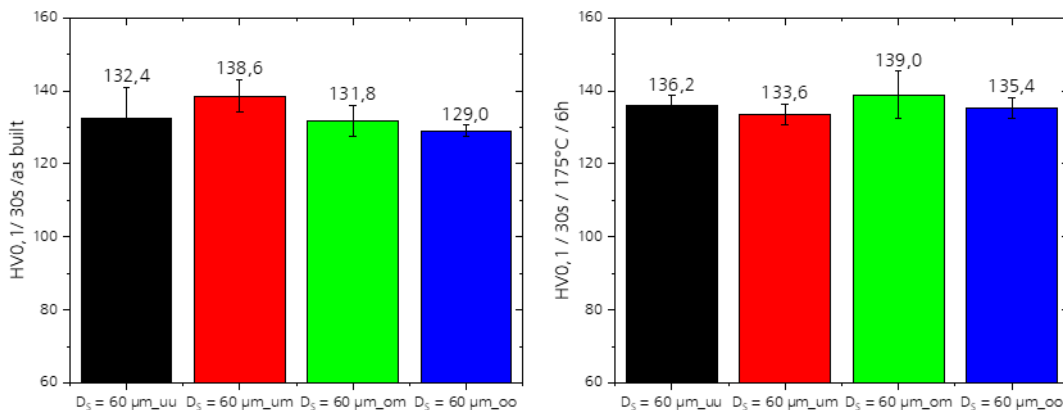
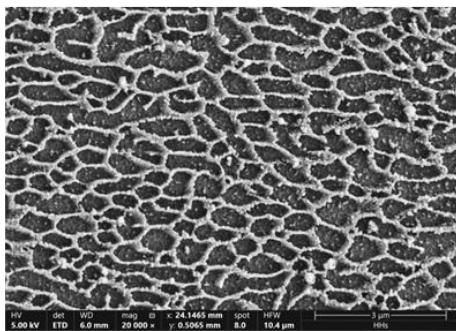
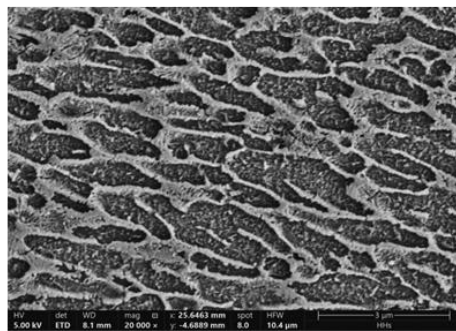


Abbildung 26: Gemessene Werte der Härte HVO,1 für verschiedene Schichtdicken im unbehandelten Zustand (links) sowie nach Direct Aging Wärmebehandlung (rechts), jeweils gemittelte Werte aus 5 Einzelmessungen je Schichtdicke. Plattformtemperatur 100 °C

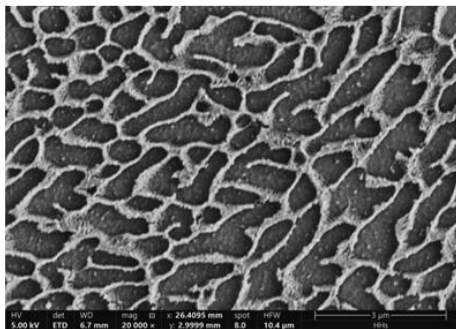
REM unbehandelt



REM Direct Aging 175°C , 6h



REM unbehandelt



REM Direct Aging 200 °C , 15 min

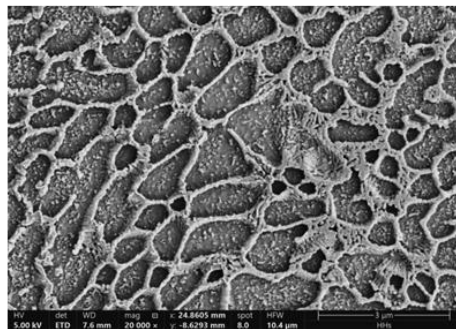


Abbildung 27: REM-Aufnahmen der Mikrostruktur von AlSi10Mg im unbehandelten Zustand sowie nach Direct Aging Wärmebehandlungen bei Bauplattformtemperatur von 100 °C

Arbeitspaket 5.2 Bestimmung mechanischer Kennwerte nach konv. HIP (stat. / dyn.)

Infolge der gegenüber der Antragsstellung geänderten Prozessbedingungen wurden abweichend vom ursprünglichen Arbeitsplan zunächst Warmzugversuche durchgeführt wie in AP2.3 beschrieben. Die Prüfergebnisse sind in nachfolgender Abbildung 28 zusammengefasst. Für alle untersuchten Probekörper lag die für das plastische Fließen maßgebliche Warmfließgrenze $R_{p0,2}$ unterhalb der Spannung von 200 MPa (= 2000 bar), die dem zunächst angepassten L-HIP-Prozessdruck entspricht. Aufgrund des geringen Abstands zwischen Warmfließgrenze und Prozessdruck wurde mit dem Projektpartner ifas abgestimmt, den L-HIP-

Prüfstand auf einen Druck von 250 MPa auszulegen, um hinreichende Reserven für plastisches Fließen zu berücksichtigen.

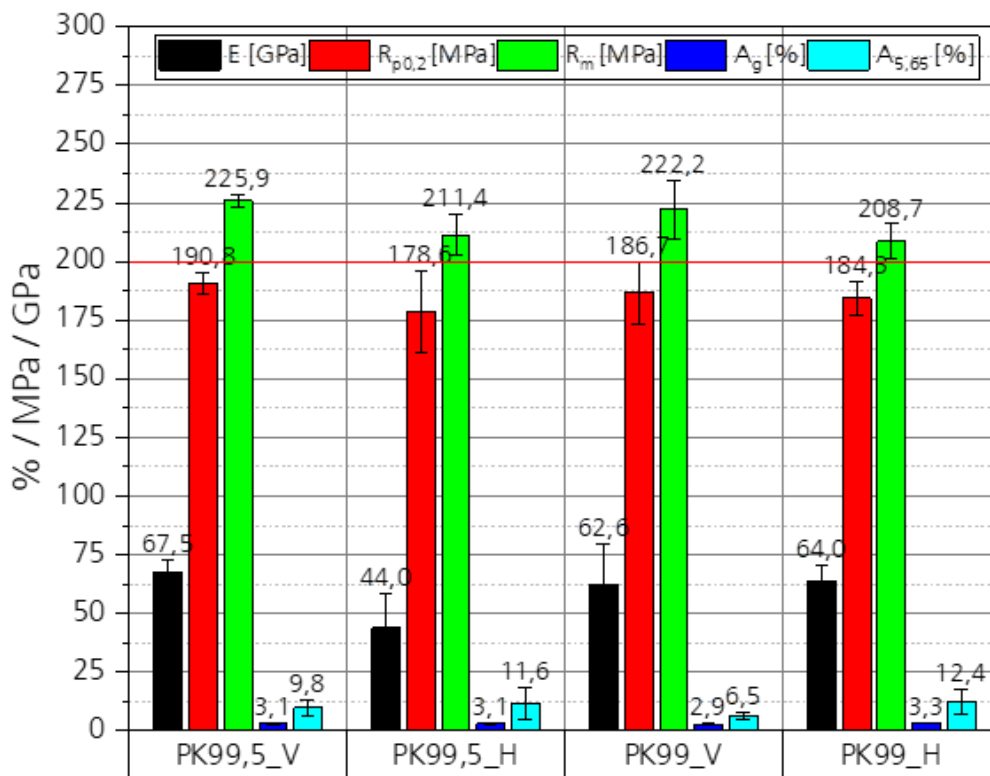


Abbildung 28: Zusammenfassung relevanter mechanischer Kennwerte aus dem statischen Warmzugversuch für vertikale und horizontale Zugproben der Porositätsklassen PK99 und PK99,5

Vor dem Hintergrund der im Projekt vorgenommenen Anpassung der L-HIP-Prozessbedingungen auf niedrigere Temperaturen und Drücke wurde die Durchführung eines konventionellen HIP-Prozesses als möglicher Referenzzustand kritisch geprüft und bewertet. Im Ergebnis wurde von einer experimentellen Umsetzung jedoch abgesehen, da ein konventioneller Gas-HIP-Prozess bei 200 °C und 2000 bar für AlSi10Mg weder technisch sinnvoll noch für die vorliegende Fragestellung praxisrelevant umgesetzt werden kann. Die vorge-sehene Temperatur liegt deutlich unterhalb des für konventionelle HIP-Prozesse typischen werkstoffabhän-gigen Temperaturbereichs, der üblicherweise zwischen etwa 600 °C und 1300 °C liegt. Zudem sind die Druckaufbauzeiten bei entsprechenden Druckniveaus stark anlagenabhängig und werden maßgeblich durch das Arbeitsvolumen, die Kompressorkapazität sowie die eingesetzte Gasart beeinflusst und können meh-rere Stunden betragen. Die unter diesen Randbedingungen zu erwartende Effekte wurden daher weder als repräsentativ für industrielle Anwendungen noch als belastbare Referenz für die Bewertung des Werk-stoffverhaltens im Rahmen des Vorhabens eingestuft. Aus diesem Grund wurde auf die Durchführung eines konventionellen Gas-HIP-Referenzversuchs verzichtet und die Untersuchungen auf die angepassten L-HIP-Bedingungen fokussiert.

Die quasistatischen Zugversuche bei Raumtemperatur wurden gemäß DIN EN ISO 6892-1 nach Verfahren A(2) durchgeführt, wobei die Prüfmaschine traversengeregt betrieben wurde. Die Prüfungen erfolgten auf einer ZwickRoell RetroLine-Prüfmaschine mit 100-kN-Kraftmesszelle unter Verwendung der Software testXpert III. Die Längsdehnung wurde optisch mittels videoXtens L erfasst. Im Messsystem war eine Mess-länge von $L_0 = 25\text{mm}$ hinterlegt. Ausgewertet wurden das Elastizitätsmodul E , die Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m , die Gleichmaßdehnung A_g , die Bruchdehnung $A_{25\text{ mm}}$ sowie die Brucheinschnürung Z . Zur

Sicherstellung einer belastbaren optischen Dehnungsmessung bzw. zur Verbesserung des Bildkontrastes wurde die Messlänge der Zugproben mit AESUB-3D-Scanningspray beschichtet, um Reflexionen der LPBF-Oberfläche zu reduzieren, den Bildkontrast zu erhöhen und das Tracking des videoXtens-Systems zu verbessern. Dabei wurde ausschließlich das Messbereich behandelt. Die Gewinde- und Einspannbereiche blieben unbehandelt. Da die Sprayschicht lediglich im Mikrometerbereich liegt und innerhalb von 12 bis 24 Stunden sublimiert, wurde ein mechanischer Einfluss als vernachlässigbar eingestuft. Vor Prüfungsbeginn wurde eine Vorkraft von 10 N aufgebracht, um das Spiel im Spannsystem zu beseitigen und die Messlänge eindeutig zu definieren. Aufgrund des sehr geringen Spannungsniveaus unterhalb von 1 MPa wurde eine plastische Vorschädigung ausgeschlossen. Die Prüfgeschwindigkeit betrug bis zum Erreichen von $R_{p0,2} \dot{\epsilon} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ und wurde anschließend bis zum Bruch auf $\dot{\epsilon} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$ erhöht.

Die Tabellen 5 bis 7 enthalten die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen der verfügbaren Einzelversuche. Gemessene Kennwerte werden aufgrund der teilweise kleinen Stichprobenumfänge, insbesondere für die thermische Referenzbehandlung ohne aktive Druckbeaufschlagung und den L-HIP-Zustand, zunächst deskriptiv dargestellt. Die als „drucklos“ bezeichnete Referenzbehandlung folgte einer zur L-HIP-Behandlung vergleichbaren thermischen Prozessführung, jedoch ohne aktive Druckbeaufschlagung.

Tabelle 4: Statische Zugkennwerte nach Direct Aging bei 175 °C/6 h; Mittelwert $\pm$ Standardabweichung.

Ori.	PK	n	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A_{25 \text{ mm}}$ [%]	E [GPa]
H	PK99	10	269,8 $\pm$ 9,7	309,8 $\pm$ 25,7	1,0 $\pm$ 0,7	64,8 $\pm$ 4,6
H	PK99,5	10	292,0 $\pm$ 4,0	417,0 $\pm$ 9,9	4,3 $\pm$ 1,2	73,5 $\pm$ 4,1
H	PK99,95	10	279,6 $\pm$ 5,8	419,8 $\pm$ 5,6	6,9 $\pm$ 1,1	70,9 $\pm$ 4,4
V	PK99	10	297,2 $\pm$ 5,9	400,2 $\pm$ 18,7	2,2 $\pm$ 0,7	65,8 $\pm$ 8,4
V	PK99,5	10	278,7 $\pm$ 22,7	390,9 $\pm$ 52,1	2,5 $\pm$ 1,0	66,9 $\pm$ 11,1
V	PK99,95	9	268,2 $\pm$ 21,6	460,3 $\pm$ 21,3	4,8 $\pm$ 1,4	67,6 $\pm$ 7,0

Tabelle 5: Statische Zugkennwerte nach Direct Aging bei 200 °C/15 min; Mittelwert $\pm$ Standardabweichung.

Ori.	PK	n	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A_{25 \text{ mm}}$ [%]	E [GPa]
H	PK99	10	256,4 $\pm$ 10,5	306,6 $\pm$ 19,7	1,3 $\pm$ 0,4	65,3 $\pm$ 2,5
H	PK99,5	10	271,4 $\pm$ 4,5	372,3 $\pm$ 26,6	3,0 $\pm$ 0,8	68,6 $\pm$ 2,9
H	PK99,95	10	251,2 $\pm$ 4,6	436,9 $\pm$ 5,9	9,4 $\pm$ 0,7	69,4 $\pm$ 3,9
V	PK99	10	252,4 $\pm$ 8,8	373,3 $\pm$ 31,5	2,7 $\pm$ 0,9	65,3 $\pm$ 9,5
V	PK99,5	10	252,7 $\pm$ 10,1	392,5 $\pm$ 52,7	3,3 $\pm$ 1,5	66,8 $\pm$ 5,0
V	PK99,95	8	236,0 $\pm$ 16,5	446,5 $\pm$ 10,2	6,2 $\pm$ 1,5	72,2 $\pm$ 7,7

Tabelle 6: Statische Zugkennwerte nach druckloser Referenzbehandlung; Mittelwert $\pm$ Standardabweichung.

Ori.	PK	n	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{25 mm} [%]	E [GPa]
H	PK99	2	256,0 $\pm$ 6,6	297,2 $\pm$ 16,4	0,6 $\pm$ 0,0	69,2 $\pm$ 0,8
H	PK99,5	4	294,0 $\pm$ 0,5	420,9 $\pm$ 3,9	3,8 $\pm$ 0,6	74,1 $\pm$ 1,7
H	PK99,95	4	278,1 $\pm$ 9,2	419,0 $\pm$ 13,0	7,0 $\pm$ 1,0	76,9 $\pm$ 8,7
V	PK99	4	268,8 $\pm$ 15,6	382,3 $\pm$ 39,7	2,2 $\pm$ 0,7	66,6 $\pm$ 8,8
V	PK99,5	3	267,3 $\pm$ 6,1	392,2 $\pm$ 22,8	2,2 $\pm$ 0,4	73,3 $\pm$ 4,9
V	PK99,95	2	240,7 $\pm$ 2,5	439,6 $\pm$ 2,5	5,5 $\pm$ 0,8	75,7 $\pm$ 3,7

Tabelle 7: Statische Zugkennwerte nach L-HIP-Behandlung; Mittelwert $\pm$ Standardabweichung.

Ori.	PK	n	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{25 mm} [%]	E [GPa]
H	PK99	4	264,5 $\pm$ 10,8	320,9 $\pm$ 26,8	1,3 $\pm$ 0,4	65,5 $\pm$ 6,2
H	PK99,5	3	289,9 $\pm$ 7,0	413,0 $\pm$ 6,0	3,9 $\pm$ 1,0	72,1 $\pm$ 3,4
H	PK99,95	4	286,6 $\pm$ 10,0	433,6 $\pm$ 13,3	7,8 $\pm$ 0,4	73,3 $\pm$ 5,2
V	PK99	4	229,6 $\pm$ 72,1	365,0 $\pm$ 24,4	1,8 $\pm$ 0,9	73,9 $\pm$ 4,5
V	PK99,5	4	282,9 $\pm$ 16,6	403,8 $\pm$ 21,5	2,3 $\pm$ 0,3	75,4 $\pm$ 4,5
V	PK99,95	2	258,2 $\pm$ 11,3	452,5 $\pm$ 7,1	4,5 $\pm$ 0,7	72,1 $\pm$ 5,3

Die Messwerte zeigen über die Behandlungszustände hinweg einen ausgeprägten Einfluss der Porositätsklasse auf Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Insbesondere bei horizontalen Proben nahmen R_m und A_{25 mm} von PK99 zu PK99,5 beziehungsweise PK99,95 deutlich zu. Die höhere relative Dichte verringerte damit die Wahrscheinlichkeit eines frühzeitigen, defektkontrollierten Versagens. Für vertikale Proben war der Trend ebenfalls erkennbar, jedoch nicht für jede Zwischenklasse streng monoton und teilweise mit hoher Streuung verbunden.

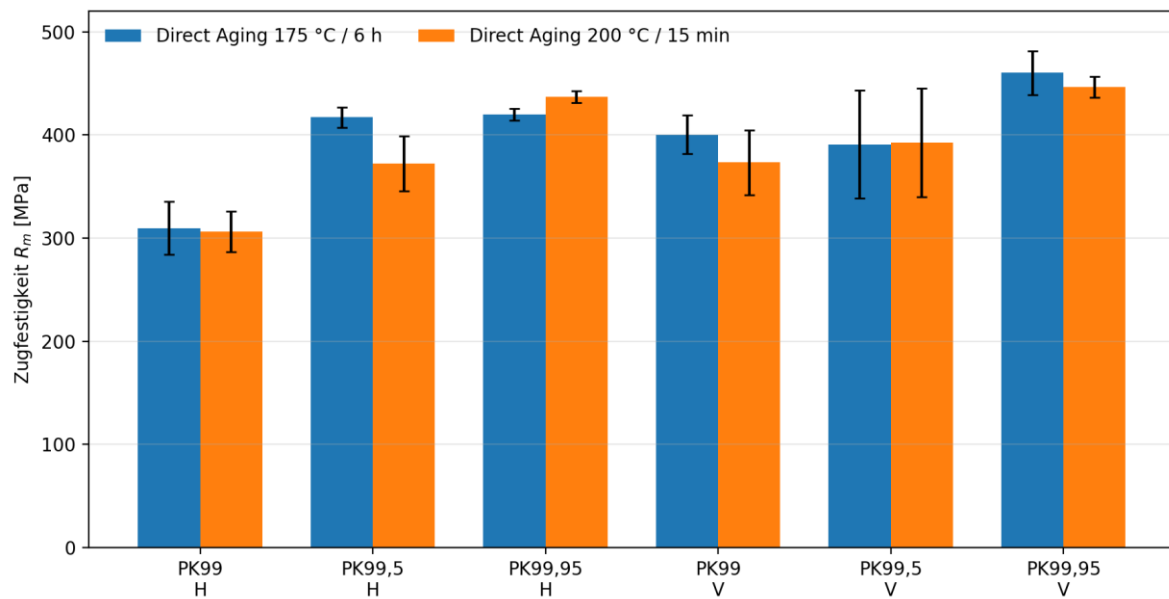


Abbildung 31: Zugfestigkeit R_m nach Direct Aging in Abhängigkeit von Porositätsklasse und Aufbaurichtung.

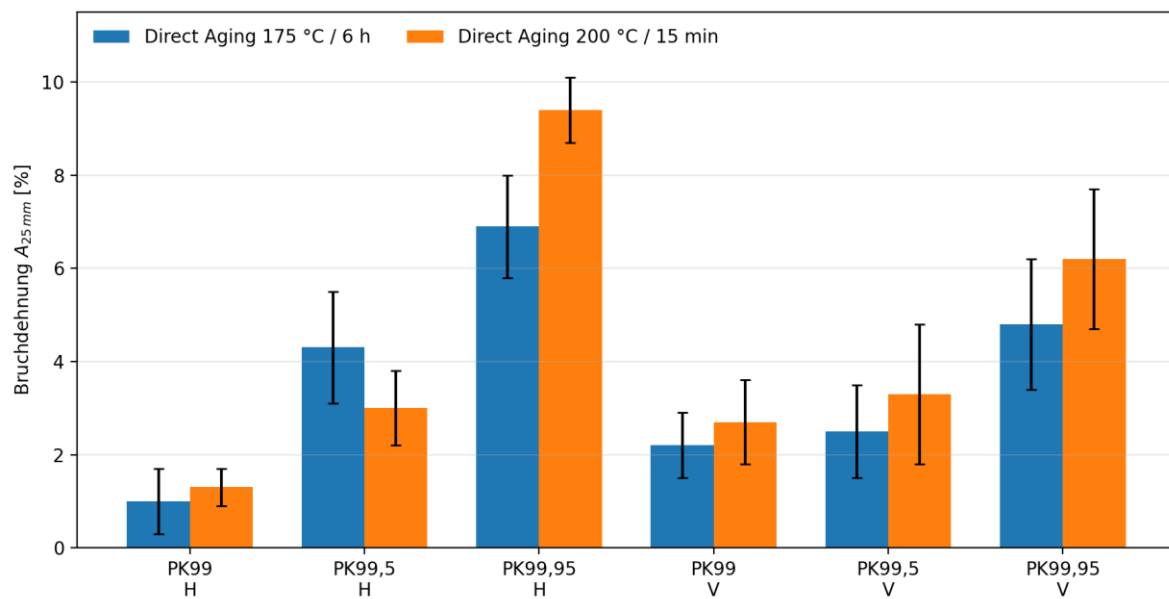


Abbildung 32: Bruchdehnung $A_{25\text{ mm}}$ nach Direct Aging in Abhängigkeit von Porositätsklasse und Aufbaurichtung.

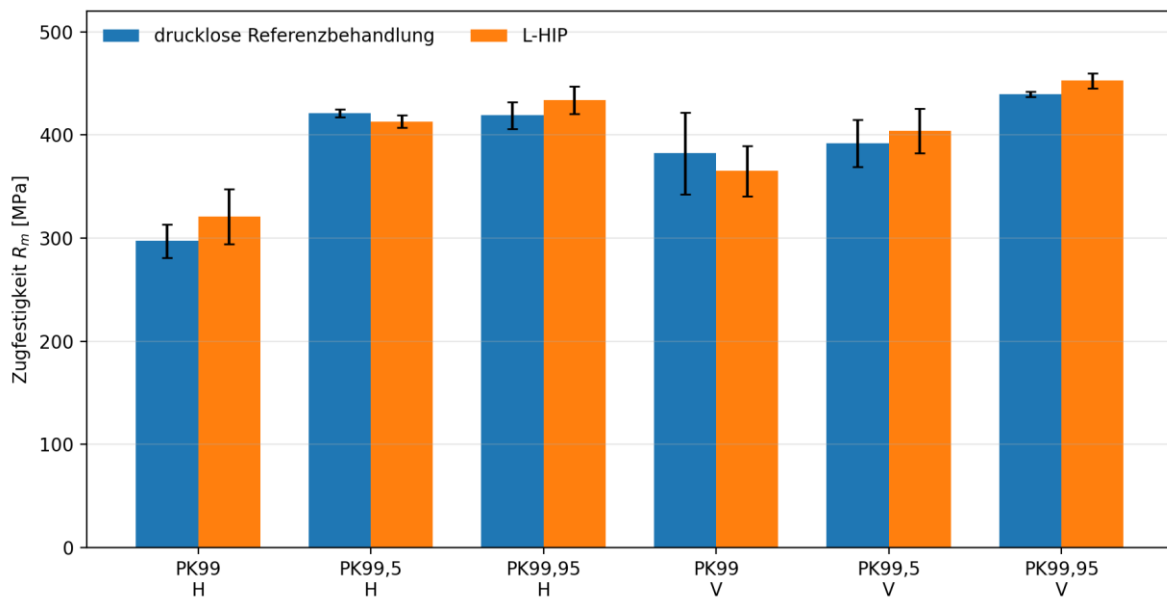


Abbildung 33: Zugfestigkeit R_m nach druckloser Referenzbehandlung und L-HIP.

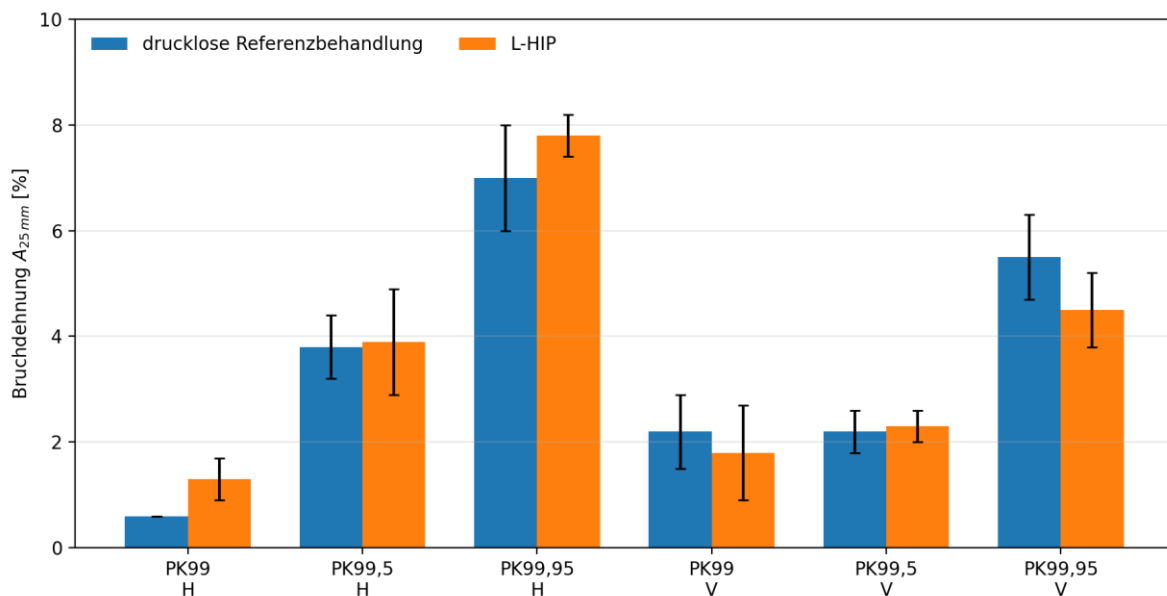


Abbildung 34: Bruchdehnung $A_{25\text{ mm}}$ nach druckloser Referenzbehandlung und L-HIP.

Die Aufbaurichtung beeinflusste sowohl das Kennwertniveau als auch die Streuung der Kennwerte. Vertikale Proben der höchsten Dichteklasse erreichten hohe Zugfestigkeiten, wiesen jedoch in mehreren Zuständen geringere Bruchdehnungen als horizontale Proben auf. Dieses Verhalten ist mit der relativen Orientierung von Schmelzbadgrenzen, prozessbedingten Defekten und der Belastungsachse vereinbar.

Direct Aging bei 200 °C/15 min führte im Mittel überwiegend zu niedrigeren $R_{p0,2}$ -Werten als die Behandlung bei 175 °C/6 h. Für R_m und $A_{25\text{ mm}}$ war die Wirkung abhängig von Dichteklasse und Orientierung. Insbesondere die horizontalen PK99,95-Proben zeigten nach 200 °C/15 min eine höhere Bruchdehnung bei vergleichbarer beziehungsweise höherer Zugfestigkeit. Daraus lässt sich kein generell überlegener Wärmebehandlungszustand ableiten. Die Auswahl ist an die Zielgröße und den Defektzustand zu koppeln.

Das ermittelte Elastizitätsmodul streute teilweise deutlich. Da E bei metallischen Werkstoffen nur gering durch Porosität im hier betrachteten Porositätsbereich verändert werden sollte, sind größere

Abweichungen vor allem auf Messlänge, optische Dehnungserfassung, Probenausrichtung und Auswerteregression zu prüfen. Das Elastizitätsmodul E wurde daher nicht als primäre Zielgröße für die Bewertung der L-HIP-Wirkung herangezogen.

Die Ermüdungsversuche der Direct-Aging-Referenzzustände erfolgten axial bei einem Spannungsverhältnis $R = 0,1$. Als Grenzlasterzahl wurden 3×10^7 Lastspiele angesetzt. Ausgewertet wurden 54 Prüfungen des Zustands 175 °C/6 h bei 20–30 Hz sowie 60 Erst- und sieben Folgeprüfungen des Zustands 200 °C/15 min bei überwiegend etwa 149 Hz und 23 °C. Tabelle 10 enthält die den dargestellten Lastniveaus eindeutig zugeordneten gültigen Bruchversuche und Durchläufer. Aufgrund der unterschiedlichen Prüffrequenzen, der geringen Wiederholungszahlen und der nicht unabhängigen Folgeprüfungen ist der Vergleich ausschließlich deskriptiv.

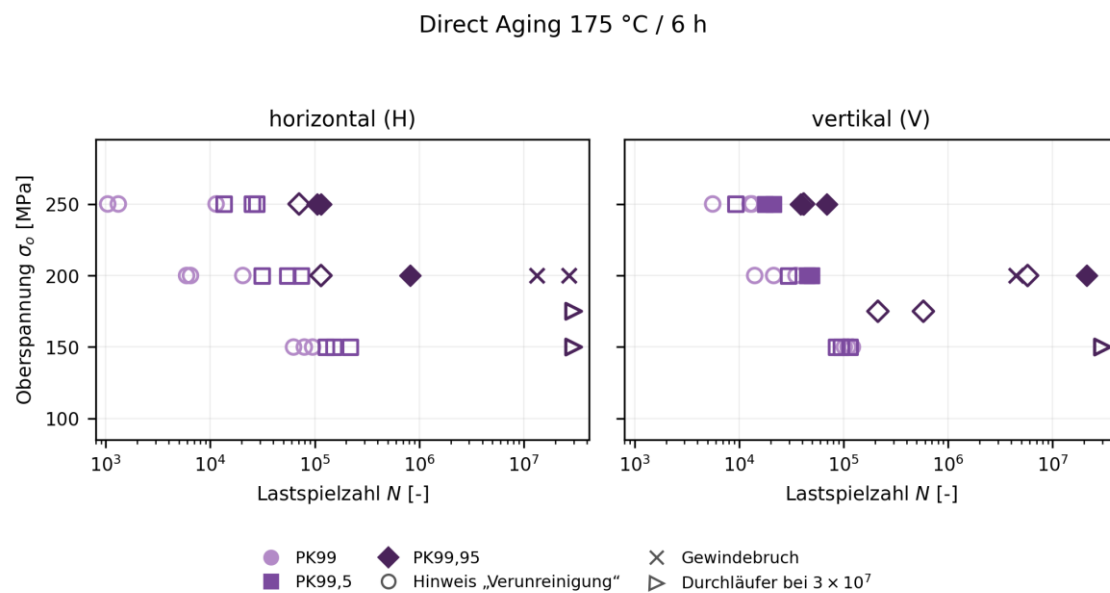


Abbildung 35: Ergebnisse der axialen Ermüdungsversuche nach Direct Aging bei 175 °C/6 h für horizontale und vertikale Proben. Offene Symbole kennzeichnen Datensätze mit dem Protokollhinweis „Verunreinigung“, Kreuze Gewindebrüche und Dreiecke Durchläufer bis 3×10^7 Lastspiele.

Direct Aging 200 °C / 15 min

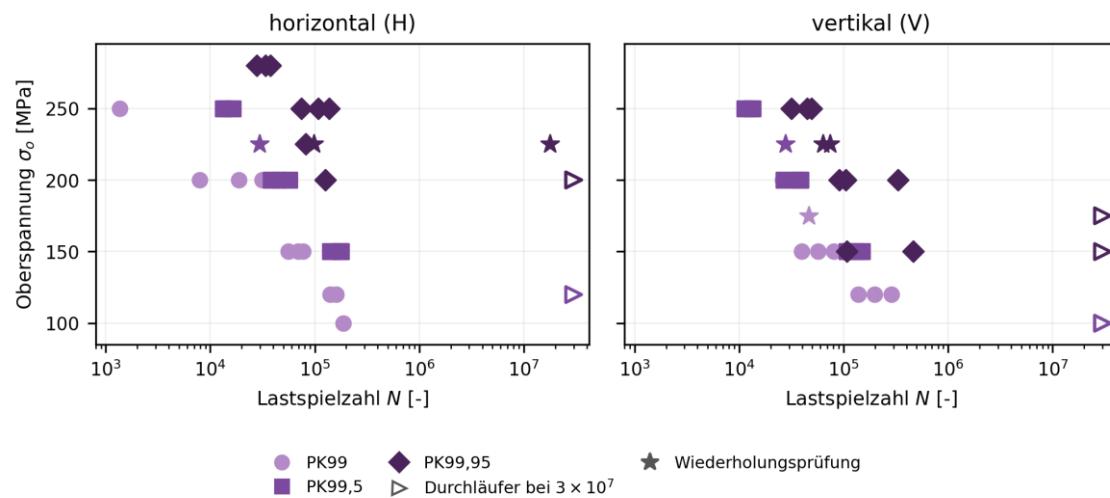


Abbildung 36: Ergebnisse der axialen Ermüdungsversuche nach Direct Aging bei 200 °C/15 min für horizontale und vertikale Proben. Dreiecke kennzeichnen Durchläufer bis 3×10^7 Lastspiele; Sterne markieren Folgeprüfungen zuvor durchgelaufener Proben und stellen daher keine statistisch unabhängigen Wiederholungen dar.

Die höchste Dichteklasse PK99,95 zeigte in beiden Wärmebehandlungszuständen die höchste Ermüdungsbeständigkeit. Bei 250 MPa betrug die mediane Bruchlastspielzahl horizontal $1,06 \times 10^5$ Lastspiele nach 175 °C/6 h und $1,08 \times 10^5$ Lastspiele nach 200 °C/15 min. Für PK99,5 wurden $2,52 \times 10^4$ beziehungsweise $1,39 \times 10^4$ Lastspiele und für PK99 $1,32 \times 10^3$ beziehungsweise $1,36 \times 10^3$ Lastspiele erreicht. Die Verringerung des Defektanteils von PK99 auf PK99,95 erhöhte die Lebensdauer damit um annähernd zwei Größenordnungen. Vertikale PK99,95-Proben erreichten mit $4,14 \times 10^4$ beziehungsweise $4,46 \times 10^4$ Lastspielen niedrigere, jedoch weiterhin deutlich über den poröseren Zuständen liegende Medianwerte.

Auch im niedrigeren Spannungsbereich war der Dichteinfluss erkennbar, jedoch nicht für jede Zwischenklasse streng monoton. Nach 200 °C/15 min stieg die mediane Bruchlastspielzahl vertikaler Proben bei 150 MPa von $5,69 \times 10^4$ Lastspielen für PK99 über $1,31 \times 10^5$ für PK99,5 auf $2,85 \times 10^5$ für PK99,95; zusätzlich trat ein Durchläufer auf. Horizontale PK99,95-Proben erreichten nach 175 °C/6 h Durchläufer bei 150 und 175 MPa. Nach 200 °C/15 min standen bei 200 MPa zwei Durchläufer einem Bruch nach $1,27 \times 10^5$ Lastspielen gegenüber. Einzelne Durchläufer begründen daher keine abgesicherte Dauerfestigkeitsgrenze.

Ein richtungsunabhängiger Wärmebehandlungseffekt wurde nicht festgestellt. Für PK99,95 lagen die horizontalen Medianwerte bei 250 MPa in beiden Direct-Aging-Zuständen nahezu gleich. Für PK99 und PK99,5 wechselte die Rangfolge mit Spannungsniveau und Aufbauorientierung. Horizontale PK99,95-Proben erreichten bei 250 MPa etwa das 2,4- bis 2,6-Fache der medianen Lebensdauer vertikaler Proben, während für die poröseren Klassen keine Richtung durchgängig vorteilhaft war. Eine kausale Zuordnung erfordert die fraktographische Identifikation der rissinitiierenden Defekte.

Tabelle 8: Deskriptive Zusammenfassung der Ermüdungsergebnisse. Angegeben ist der Median der Bruchlastspielzahl gültiger Bruchversuche; die Zahl in Klammern entspricht der Anzahl n. Durchläufer und Gewindebrüche wurden nicht in die Medianbildung einbezogen.

Direct Aging	Ori.	PK	250 MPa	200 MPa	150 MPa	Durchläufer bei 3×10^7
175 °C/ 6 h	H	PK99	$1,32 \times 10^3$ (3)	$6,47 \times 10^3$ (3)	$7,95 \times 10^4$ (3)	—
175 °C/ 6 h	H	PK99,5	$2,52 \times 10^4$ (3)	$5,50 \times 10^4$ (3)	$1,51 \times 10^5$ (3)	—
175 °C/ 6 h	H	PK99,95	$1,06 \times 10^5$ (3)	$4,66 \times 10^5$ (2)	—	150 MPa (1); 175 MPa (1)
175 °C/ 6 h	V	PK99	$1,27 \times 10^4$ (3)	$2,14 \times 10^4$ (3)	$1,10 \times 10^5$ (3)	—
175 °C/ 6 h	V	PK99,5	$1,79 \times 10^4$ (3)	$4,50 \times 10^4$ (3)	$9,49 \times 10^4$ (3)	—
175 °C/ 6 h	V	PK99,95	$4,14 \times 10^4$ (3)	$1,35 \times 10^7$ (2)	—	150 MPa (1)
200 °C/ 15 min	H	PK99	$1,36 \times 10^3$ (1)	$1,88 \times 10^4$ (3)	$6,92 \times 10^4$ (3)	—
200 °C/ 15 min	H	PK99,5	$1,39 \times 10^4$ (3)	$4,56 \times 10^4$ (3)	$1,75 \times 10^5$ (3)	120 MPa (1)
200 °C/ 15 min	H	PK99,95	$1,08 \times 10^5$ (3)	$1,27 \times 10^5$ (1)	—	200 MPa (2)
200 °C/ 15 min	V	PK99	—	$2,65 \times 10^4$ (3)	$5,69 \times 10^4$ (3)	100 MPa (1)
200 °C/ 15 min	V	PK99,5	$1,29 \times 10^4$ (3)	$3,72 \times 10^4$ (3)	$1,31 \times 10^5$ (3)	100 MPa (1)
200 °C/ 15 min	V	PK99,95	$4,46 \times 10^4$ (3)	$1,05 \times 10^5$ (3)	$2,85 \times 10^5$ (2)	150 MPa (1); 175 MPa (1)

Die begrenzten Stichprobenumfänge, zensierten Durchläufer, nicht unabhängigen Folgeprüfungen und dokumentierten Auffälligkeiten erlauben keine statistisch abgesicherte Bestimmung von Wöhlerlinien oder Dauerfestigkeitskennwerten. Im Datensatz 175 °C/6 h waren 38 von 54 Prüfungen mit „Verunreinigung“ gekennzeichnet. Drei Versuche endeten durch Gewindebruch und wurden nicht als gültige Ermüdungsbrüche gewertet. Die markierten Ergebnisse blieben mangels dokumentierten Ausschlusskriteriums in der deskriptiven Darstellung. Für eine belastbare Quantifizierung sind ein einheitliches Prüfregime, mindestens fünf bis sechs unabhängige Wiederholungen je Lastniveau sowie fraktographische und porosimetrische Korrelationen der rissinitiierenden Defekte erforderlich.

Arbeitspaket 5.3 Bestimmung mechanischer Kennwerte nach LHIP (stat. / dyn.) (ILT)

Der direkte Vergleich der drucklosen Referenzbehandlung mit L-HIP zeigt keinen einheitlichen, von Porositätsklasse und Aufbaurichtung unabhängigen Effekt auf die quasistatischen Kennwerte. Bei horizontalen Proben stieg R_m für PK99 von 297,2 auf 320,9 MPa und für PK99,95 von 419,0 auf 433,6 MPa; für PK99,5 sank R_m geringfügig von 420,9 auf 413,0 MPa. Die Bruchdehnung A_{25} mm erhöhte sich in allen drei horizontalen Dichteklassen um 0,1-0,8 Prozentpunkte. Bei vertikalen Proben stieg R_m für PK99,5 und PK99,95 um 11,6 beziehungsweise 12,9 MPa, während für PK99 eine Abnahme um 17,3 MPa beobachtet wurde. Die

vertikale Bruchdehnung blieb bei PK99,5 nahezu unverändert und nahm bei PK99 sowie PK99,95 ab. Aufgrund der kleinen Stichprobenumfänge der drucklosen und L-HIP-Zustände ($n = 2-4$) und teilweise hoher Standardabweichungen sind diese Unterschiede als deskriptive Tendenzen und nicht als statistisch abgesicherte Behandlungseffekte zu bewerten. Für die Direct-Aging-Referenzzustände liegen dynamische Ergebnisse vor (vgl. Arbeitspaket 5.2).

Ergänzend wurden metallographische Querschliffe aus den verbliebenen Kopfbereichen horizontal aufgebauter Zugprobenrohlinge ausgewertet. Verglichen wurden Proben, die mit den für die Porositätsklassen PK99, PK99,5 und PK99,95 entwickelten Parameterkombinationen gefertigt und anschließend entweder ohne aktive Druckbeaufschlagung unter einer zur L-HIP-Behandlung vergleichbaren thermischen Prozessführung oder unter L-HIP-Bedingungen behandelt worden waren.

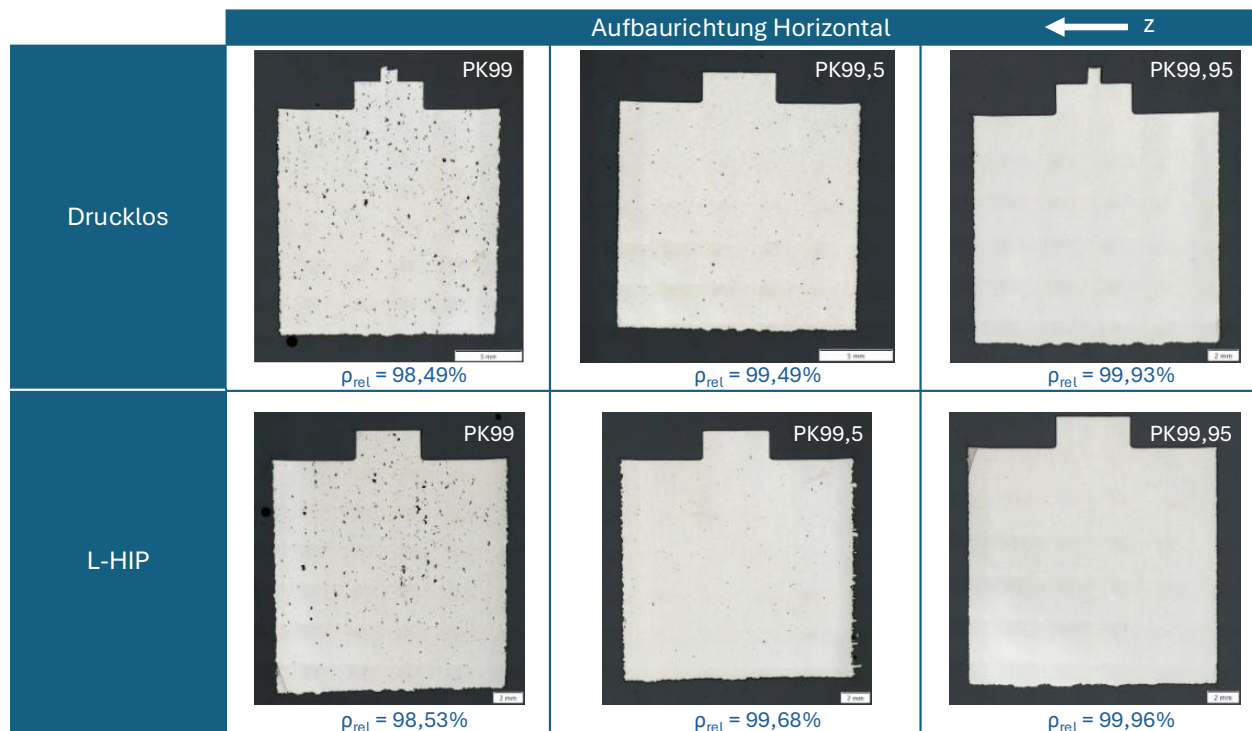


Abbildung 37: Metallographische Querschliffe aus den verbliebenen Kopfbereichen horizontal aufgebauter Zugprobenrohlinge nach thermischer Referenzbehandlung ohne aktive Druckbeaufschlagung (oben) und nach L-HIP-Behandlung (unten). Dargestellt sind Proben, die mit den für PK99, PK99,5 und PK99,95 entwickelten Parameterkombinationen gefertigt wurden. Die Tabellen geben den bildanalytisch bestimmten Defektflächenanteil und die daraus abgeleitete relative Dichte an.

Die aus den Querschliffen abgeleiteten relativen Dichten betrugen nach der thermischen Referenzbehandlung ohne aktive Druckbeaufschlagung 98,359 %, 99,656 % und 99,890 % sowie nach der L-HIP-Behandlung 98,531 %, 99,717 % und 99,896 %. Dies entspricht Differenzen von +0,172, +0,061 und +0,006 Prozentpunkten. Die größte absolute Veränderung wurde somit für die mit der Parameterkombination PK99 gefertigte Probe festgestellt. Da jeweils einzelne zweidimensionale Querschliffe und keine korrelativen Vorher-nachher-Untersuchungen identischer Defektvolumina vorliegen, sind die Unterschiede als indikative Tendenzen und nicht als statistisch abgesicherter Nachweis einer Defektschließung zu bewerten. Die in den einzelnen Kopfquerschliffen bestimmten Ist-Dichten können von den nominellen Klassengrenzen abweichen.

Arbeitspaket 5.4 Vergleich konv. HIP vs. LHIP vs. as-built (Werkstoffanalyse) (ILT)

Ein vollständiger experimenteller Dreifachvergleich zwischen konventionellem Gas-HIP, L-HIP und as-built konnte nicht durchgeführt werden. Der konventionelle Gas-HIP-Referenzzustand wurde unter den angepassten Prozessbedingungen nicht umgesetzt. Zugleich wurde der unbehandelte Referenzzustand im abgestimmten mechanischen Prüfprogramm durch zwei Direct-Aging-Zustände ersetzt. Der experimentelle Vergleich beschränkt sich daher auf die Direct-Aging-Zustände, die thermische Referenzbehandlung ohne aktive Druckbeaufschlagung und die L-HIP-Behandlung. Die quasistatischen Ergebnisse erlauben eine deskriptive Gegenüberstellung. Der dynamische Vergleich zwischen der thermischen Referenz und L-HIP bleibt bis zum Abschluss der laufenden Ermüdungsversuche offen.

Arbeitspaket 5.5 Erweiterung des Modells um PBF-LB/M und Werkstoffkennwerte (ifas & ILT)

Die Herstellung von AlSi10Mg-Prüfkörpern mit drei definierten Porositätsklassen und zwei Aufbaurichtungen wurde prozessseitig umgesetzt. Die metallographischen Untersuchungen identifizierten $D_s = 60 \mu\text{m}$ und 100°C Bauplattformtemperatur als geeignete Randbedingungen für eine reproduzierbare mechanische Testkampagne. Die quasistatischen Zugkennwerte wurden für vier Behandlungszustände quantitativ ausgewertet. Die dynamischen Referenzprüfungen belegen einen dominanten Einfluss der Porositätsklasse. Aufgrund des orientierenden Prüfplans und der genannten Datenrestriktionen ist jedoch keine statistisch abgesicherte Wöhlerlinienbewertung möglich.

Der L-HIP-Prüfstand erreichte die für das angepasste Versuchsprogramm erforderlichen Prozessbedingungen von etwa 200°C und 2000 bar bei 30 min Haltezeit. Die quasistatischen mechanischen Ergebnisse zeigen einzelne positive, jedoch keine universelle L-HIP-Tendenzen. Eine allgemeine, von Dichteklasse und Orientierung unabhängige Verbesserung wurde nicht nachgewiesen.

Die dynamischen Referenzversuche wurden für beide Direct-Aging-Zustände ausgewertet. Eine belastbare Quantifizierung der L-HIP-Wirkung auf das Ermüdungsverhalten war mangels entsprechender L-HIP-Datensätze weiterhin nicht möglich.

Ebenso konnte kein repräsentativer experimenteller Vergleich mit konventionellem Gas-HIP durchgeführt werden. Der Innovationsbeitrag des Vorhabens liegt daher vor allem im Aufbau einer funktionsfähigen flüssigkeitsbasierten Hochdruckprozesskette, der systematischen Verknüpfung mit definierten PBF-LB/M-Defektzuständen und der Identifikation der für eine weiterführende Qualifikation erforderlichen Mess- und Nachweisgrößen. Die metallographischen Kopfquerschliffe zeigen eine indikative Verringerung des Defektflächenanteils nach L-HIP, die aufgrund der begrenzten zweidimensionalen Datengrundlage jedoch noch statistisch und korrelativ abzusichern ist.

2 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde entsprechend dem im Weiterleitungsvertrag festgelegten Zweck und auf Grundlage der verbindlichen Einzelfinanzierungspläne zur Durchführung des IGF-Vorhabens 23161 N eingesetzt. Die Mittel dienten der personellen Bearbeitung der im Forschungsantrag festgelegten wissenschaftlich-technischen Aufgaben durch das Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme der RWTH Aachen – ifas – und das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT. Die Mittelverwendung erfolgte innerhalb des Bewilligungszeitraums vom 1. November 2023 bis zum 31. Oktober 2025 projektbezogen sowie nach den Grundsätzen einer wirtschaftlichen und sparsamen Mittelverwendung.

Der wesentliche Mitteleinsatz entfiel auf die Personalausgaben für das zur Bearbeitung des Vorhabens eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal der beiden Forschungsstellen. Die wissenschaftlichen Mitarbeitenden übernahmen die Planung, Durchführung, Koordination, Auswertung und Dokumentation der im Antrag definierten Arbeitspakete. Hierzu gehörten die Entwicklung und Anwendung geeigneter experimenteller und numerischer Methoden, die wissenschaftliche Interpretation der Versuchsergebnisse sowie die Aufbereitung und Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse. Gemäß den Einzelfinanzierungsplänen waren am ifas ergänzend Ausgaben für übriges Fachpersonal sowie an beiden Forschungsstellen Ausgaben für Hilfskräfte vorgesehen.

Am ifas umfassten die Arbeiten insbesondere die Auswahl, Charakterisierung und Bewertung eines geeigneten Thermofluids, die Modellierung der Druck- und Temperaturentwicklung sowie die Untersuchung der Wärmeübertragung zwischen Thermofluid, Prozessraum und Bauteil. Weitere Schwerpunkte bildeten die konstruktive und sicherheitstechnische Auslegung, die mechanische Dimensionierung, die Fertigung, Montage und Inbetriebnahme des L-HIP-Prüfstands sowie die Entwicklung und experimentelle Umsetzung der L-HIP-Prozessführung. Hierzu gehörten die Auslegung des Prozessraums und des Fluidkreislaufs, die mechanische und thermische Dimensionierung der Anlagenkomponenten, die Integration der bereitgestellten Hochdruck-, Heiz-, Mess- und Regelungskomponenten sowie die Durchführung und Auswertung der L-HIP-Zyklen. Die experimentellen Ergebnisse wurden zur Erweiterung und Validierung der entwickelten Prozess- und Anlagenmodelle herangezogen.

Das ILT übernahm insbesondere die Entwicklung und Validierung der PBF-LB/M-Prozessparameter sowie die Herstellung der würfelförmigen Prozessentwicklungsproben und der normnahen mechanischen Prüfkörper aus AlSi10Mg. Die Arbeiten umfassten die Pulver- und Werkstoffcharakterisierung, die gezielte Einstellung unterschiedlicher Porositätsklassen und die Fertigung der Referenz-, Zug-, Ermüdungs- und Relaxationsproben. Darüber hinaus führte das ILT gemeinsam mit dem ifas die Qualifizierung der Gesamtprozesskette durch. Hierzu gehörte die metallographische Bestimmung der relativen Dichte und der Defektmerkmale, die mikrostrukturelle Charakterisierung sowie die quasistatischen Zugprüfungen sowie die Koordination und Auswertung der bei den PbA-Partnern durchgeführten Ermüdungsprüfungen. Die Versuchsdaten wurden statistisch deskriptiv ausgewertet und zur Bewertung der Zusammenhänge zwischen Ausgangsporosität, PBF-LB/M-Prozessführung, L-HIP-Behandlung, Gefügeentwicklung und mechanischen Eigenschaften herangezogen.

Die wissenschaftlichen Mitarbeitenden beider Forschungsstellen übernahmen darüber hinaus die fachliche Koordination des Vorhabens, die detaillierte und forschungsstellenübergreifende Abstimmung der Versuchsplanung, den Austausch von Proben und Versuchsdaten sowie die Entwicklung und Anpassung der erforderlichen Untersuchungs- und Auswertungsmethoden. Ergänzend führten sie projektbezogene

Literatur- und Technologierecherchen durch und waren für die übergreifende wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse verantwortlich.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden fortlaufend dokumentiert und für die Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft sowie für Präsentationen, Veröffentlichungen und den vorliegenden Abschlussbericht aufbereitet.

Der Austausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit. Die Vorgehensweise, der Bearbeitungsstand und die erzielten Ergebnisse wurden regelmäßig vorgestellt und diskutiert. Erforderliche Anpassungen des Arbeitsplans und der experimentellen Vorgehensweise wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt. Sie dienten dazu,

die Projektziele unter Berücksichtigung der im Projektverlauf ermittelten technischen, sicherheitsrelevanten und anlagenseitig realisierbaren Randbedingungen zu erreichen und belastbare wissenschaftliche Ergebnisse zu generieren.

Das am ifas eingesetzte übrige Fachpersonal unterstützte insbesondere die mechanische und elektrotechnische Umsetzung sowie die Montage und Inbetriebnahme des Prüfstands. Die Hilfskräfte beider Forschungsstellen wirkten unter Anleitung der wissenschaftlichen Mitarbeitenden an der Versuchsvorbereitung und -durchführung, der Bedienung der Maschinen und Versuchseinrichtungen, der Erfassung und Protokollierung von Prozess- und Versuchsdaten sowie an zeitintensiven Auswertungs- und Dokumentationsarbeiten mit.

Tabelle 3 stellt den Personaleinsatz der beiden Forschungsstellen zusammenfassend dar.

Tabelle 3: Personaleinsatz

ifas	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	$1,8+12+12+3 = 28,80$	Projektbearbeitung
A.2 Ang. m. staatl. Abschluss Techniker, Meister o. vglb.	0,0	-
A.3 studentische Hilfskräfte	$1,356+4,946+4,07+0,2009 = 10,572$	Unterstützung bei der Projektbearbeitung
ILT	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	$3,02+11,77+10,17 = 24,96$	Projektbearbeitung
A.2 Ang. m. staatl. Abschluss Techniker, Meister o. vglb.	0,0	-
A.3 studentische Hilfskräfte	$0,23+8,19+1,98 = 10,40$	Unterstützung bei der Projektbearbeitung

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele erforderlich und bildeten die Grundlage für die Bearbeitung der aufeinander aufbauenden Arbeitspakete sowie für die abschließende Bewertung der gesamten PBF-LB/M- und L-HIP-Prozesskette. Die Eignung eines flüssigkeitsbasierten heißisostatischen Pressverfahrens zur Nachbehandlung PBF-LB/M-gefertigter Bauteile aus AlSi10Mg konnte weder allein aus Literaturdaten noch aus den Erkenntnissen zum konventionellen gasbasierten HIP abgeleitet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Druckübertragung, Wärmeführung und Prozessdynamik war eine durchgängige experimentelle Untersuchung erforderlich, die von der gezielten Einstellung definierter

Ausgangsporositäten über die Entwicklung und Validierung der L-HIP-Prozessführung bis zur metallographischen und mechanischen Werkstoffcharakterisierung reichte.

Art und Umfang der im Arbeitsteil zur PBF-LB/M-Prozessentwicklung durchgeführten Fertigungsversuche und Auswertungen waren notwendig und angemessen, um reproduzierbare Verfahrensparameter zu identifizieren, unterschiedliche Defekt- beziehungsweise Porositätszustände gezielt einzustellen und stabile und reproduzierbare Fertigungsbedingungen sicherzustellen. Die systematische Variation der Prozessparameter, die Herstellung geeigneter Referenz- und Prüfproben sowie die quantitative metallographische Bewertung der Defektzustände waren erforderlich, um den Einfluss der Ausgangsporosität und der nachfolgenden L-HIP-Behandlung belastbar beurteilen zu können. Die für höhere Schichtdicken beobachteten stärkeren Schwankungen begründeten die Konzentration des mechanischen Hauptprüfprogramms auf $D_5 = 60 \mu\text{m}$.

Die Entwicklung und Inbetriebnahme des L-HIP-Prüfstands waren mit einem erheblichen konstruktiven, modellierungstechnischen und sicherheitstechnischen Aufwand verbunden. Insbesondere die gleichzeitige Beaufschlagung mit hohen Drücken und erhöhten Temperaturen stellte hohe Anforderungen an die Auslegung des Prozessraums, des Fluidkreislaufs sowie der Hochdruck-, Heiz-, Mess- und Regelungstechnik. Die FEM- und CFD-gestützte Dimensionierung und Bewertung der Prüfstandskomponenten waren daher sowohl zur Sicherstellung der mechanischen und thermischen Belastbarkeit als auch zur Gewährleistung eines reproduzierbaren und sicheren Anlagenbetriebs erforderlich und dem Entwicklungsrisiko angemessen.

Gegenüber der ursprünglichen Antragstellung mussten die realisierbaren Prozessrandbedingungen des L-HIP-Prüfstands auf eine maximale Prozesstemperatur von 200°C und einen maximalen Prozessdruck von 2.000 bar angepasst werden. Vor diesem Hintergrund war die zusätzliche Fertigung und Prüfung von Probekörpern für Warmzugversuche und Druckrelaxationsuntersuchungen erforderlich. Diese Untersuchungen dienten dazu, das Verformungs- und Relaxationsverhalten von AlSi10Mg unter den angepassten thermomechanischen Randbedingungen zu charakterisieren und zu prüfen, ob eine für den Porenverschluss hinreichende Werkstoffplastizität grundsätzlich gegeben war. Die zusätzlichen Versuche stellten eine methodisch erforderliche Anpassung des Untersuchungsprogramms zur wissenschaftlich belastbaren Bewertung der unter den realisierbaren Anlagenbedingungen durchgeführten L-HIP-Behandlungen innerhalb der übergeordneten Zielsetzung des Forschungsvorhabens dar.

Die Kombination aus systematischer Parametervariation, metallographischer Defektbewertung, mechanischer Werkstoffprüfung sowie modellgestützter Prüfstandsentwicklung war geeignet und erforderlich, um die Reproduzierbarkeit der Versuche, die Betriebssicherheit des Prüfstands und die wissenschaftliche Aussagefähigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die Einschränkungen hinsichtlich der gegenüber dem Antrag reduzierten L-HIP-Probenzahl sowie des nicht im ursprünglich vorgesehenen Umfang realisierten Vergleichs mit einer konventionellen Gas-HIP-Behandlung werden bei der Ergebnisbewertung berücksichtigt und als projektbedingte Grenzen transparent ausgewiesen.

Der für die Bearbeitung eingesetzte Personalaufwand war aufgrund der engen Verknüpfung von Prozessentwicklung, Prüfstandsauslegung, Versuchsdurchführung, Werkstoffcharakterisierung, Modellierung und wissenschaftlicher Auswertung angemessen. Die durchgeführten Arbeiten entsprechen in ihrer grundsätzlichen Zielsetzung der im Forschungsantrag festgelegten Planung. Die im Projektverlauf vorgenommenen methodischen Anpassungen waren erforderlich, um die Forschungsziele unter den tatsächlich realisierbaren technischen und sicherheitsrelevanten Anlagenrandbedingungen zu bearbeiten und wissenschaftlich belastbare Ergebnisse zu erzielen.

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

Der wissenschaftlich-technische Nutzen des Vorhabens liegt in der durchgängigen Verknüpfung gezielt eingestellter PBF-LB/M-Ausgangszustände mit einem flüssigkeitsbasierten Hochdruck-Nachbehandlungsprozess für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Durch die Herstellung und Charakterisierung definierter Porositätsklassen sowie deren anschließende L-HIP-Behandlung konnten grundlegende Zusammenhänge zwischen der Ausgangsporosität, der Aufbaurichtung, den thermomechanischen Behandlungsbedingungen und den resultierenden Werkstoffeigenschaften untersucht werden.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die Porositätsklasse beziehungsweise die Ausgangsdichte einen maßgeblichen Einfluss auf die statischen mechanischen Eigenschaften und insbesondere auf die Bruchdehnung von PBF-LB/M-gefertigtem AlSi10Mg besitzt. Gleichzeitig weisen die Untersuchungen darauf hin, dass die Wirkung der L-HIP-Behandlung sowohl von der Porositätsklasse als auch von der Aufbaurichtung der Proben abhängt. Für einzelne Probenzustände, insbesondere für horizontal aufgebaute Proben bestimmter Dichteklassen, wurden positive Tendenzen festgestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl L-HIP-behandelter Proben und der daraus resultierenden eingeschränkten statistischen Absicherung lassen sich daraus jedoch noch keine allgemeingültigen Prozess-Eigenschafts-Beziehungen oder belastbaren Auslegungskennwerte für eine industrielle Serienanwendung ableiten. Die Ergebnisse liefern vielmehr eine wissenschaftlich begründete Ausgangsbasis für weiterführende Prozessoptimierungen und bauteilspezifische Qualifikationsuntersuchungen.

Der innovative Beitrag des Vorhabens besteht insbesondere in der projektspezifischen Übertragung des heißisostatischen Pressens von einem gasbasierten auf einen flüssigkeitsbasierten Ansatz und dessen Kopplung mit der additiven Fertigung von Aluminiumbauteilen. Der entwickelte Prüfstand zeigt, dass ein probenbeziehungsweise bauteilangepasster L-HIP-Prozess unter Verwendung kommerziell verfügbarer Hochdruck-, Heiz-, Mess- und Regelungskomponenten sowie eines vergleichsweise kompakten beheizten Prozessraums technisch realisiert werden kann. Damit wurde ein Entwicklungsansatz geschaffen, der gegenüber großvolumigen Gas-HIP-Anlagen potenziell geringere kompressible Fluidvolumina, kompaktere Anlagenstrukturen und potenziell verkürzte Druckaufbauzeiten ermöglicht.

Die Entwicklung des Prüfaufbaus hat zudem gezeigt, dass ein bauteilspezifisches beziehungsweise probenangepasstes L-HIP-Konzept mit einem im Vergleich zu industriellen Großanlagen begrenzten apparativen und investiven Aufwand entwickelt und untersucht werden kann. Für Unternehmen und insbesondere für KMU kann es daher perspektivisch wirtschaftlich sinnvoll sein, das entwickelte Konzept an ausgewählte Bauteile, Werkstoffe oder Chargengrößen anzupassen. Dadurch könnten die technologischen und finanziellen Einstiegshürden gegenüber der Nutzung beziehungsweise Beschaffung großvolumiger industrieller HIP-Anlagen reduziert werden.

Ein konkreter Kostenvorteil gegenüber kommerziellen HIP-Anlagen lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse jedoch noch nicht quantifizieren. Für eine belastbare wirtschaftliche Bewertung müssten neben den Investitionskosten insbesondere der Energiebedarf, die Zykluszeiten (Aufheiz- und

Abkühlzeiten), der Bauteildurchsatz, die Fluidaufbereitung, die Standzeiten der Dichtungs- und Hochdruckkomponenten sowie die Anlagenverfügbarkeit berücksichtigt werden.

Für KMU aus den Bereichen additive Fertigung, Werkstoffprüfung, Wärmebehandlung, Hochdruck- und Fluidtechnik stellt das entwickelte Verfahren einen anwendungsnahen und potenziell skalierbaren Entwicklungsbaustein dar. Die Ergebnisse unterstützen die Auswahl geeigneter Ausgangsdichten, die Abschätzung potenziell geeigneter Prozessfenster und die Auslegung weiterführender Qualifikationsversuche. Der Nutzen liegt somit weniger in einer unmittelbar verfügbaren und vollständig qualifizierten Serienprozessroute als in der Bereitstellung einer technologischen Grundlage für die bauteil- und werkstoffspezifische Nachverdichtung additiv gefertigter Aluminiumbauteile.

Den potenziellen Vorteilen des L-HIP-Ansatzes stehen derzeit noch technische Einschränkungen gegenüber. Hierzu gehören insbesondere die langen thermischen Aufheiz- und Abkühlzeiten, die hohen Anforderungen an das Thermofluid und die Dichtungstechnik sowie die begrenzte Probenkapazität des entwickelten Demonstrators. Eine unmittelbare Serienfreigabe oder eine pauschale Substitution des konventionellen Gas-HIP-Verfahrens lässt sich aus der vorliegenden Datenbasis daher nicht ableiten.

Der wirtschaftliche Nutzen hängt wesentlich davon ab, ob der L-HIP-Prozess auf höhere Durchsätze, kürzere thermische Zykluszeiten und eine robuste Fluid-, Dichtungs- und Hochdrucktechnik skaliert werden kann. Besonders aussichtsreich erscheint der Ansatz für hochwertige, geometrisch komplexe Aluminiumbauteile, bei denen innere Defekte durch konventionelle mechanische Nachbearbeitungsverfahren nicht beseitigt werden können und eine bauteilspezifische Nachverdichtung einen höheren Mehrwert als eine großvolumige Standardbehandlung bieten kann. Potenzielle industrielle Anwendungsfelder ergeben sich insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau, in der Mobilitäts- und Automatisierungstechnik sowie in weiteren Bereichen, in denen mechanisch beanspruchte und funktionsintegrierte Aluminiumbauteile eingesetzt werden.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft erfolgte während der Projektlaufzeit fortlaufend über den projektbegleitenden Ausschuss. In den regelmäßigen Sitzungen wurden die Zielsetzung und der jeweilige Bearbeitungsfortschritt des Vorhabens, die PBF-LB/M-Prozess- und Probenentwicklung, das Prüfkörperdesign, die Entwicklung des L-HIP-Prüfstands, Änderungen der technischen Randbedingungen sowie die Ergebnisse und die weitere Planung der mechanischen Untersuchungen vorgestellt und mit den beteiligten Unternehmen diskutiert. Dies umfasste insbesondere die Anpassung des Referenzzustands, die Überarbeitung des mechanischen Prüfprogramms, die Reduktion der untersuchten Probenorientierungen, die Planung und Auswertung der Zug- und Ermüdungsprüfungen sowie offene Fragestellungen zur experimentellen Nachweisführung.

Die Rückmeldungen des projektbegleitenden Ausschusses flossen unmittelbar in die weitere Projektbearbeitung ein. Sie wurden insbesondere bei der Auswahl und Anpassung der Referenzzustände, der Festlegung des Prüfkörper- und Untersuchungsumfangs sowie bei der Weiterentwicklung des Prüfstandskonzepts und der experimentellen Vorgehensweise berücksichtigt. Auf diese Weise wurden die wissenschaftlichen Arbeiten kontinuierlich mit den technischen Anforderungen und Anwendungsperspektiven der beteiligten Unternehmen abgeglichen.

Der Wissenstransfer richtete sich an Unternehmen und Dienstleister entlang der relevanten Prozess- und Wertschöpfungskette, darunter insbesondere aus den Bereichen Pulverherstellung, PBF-LB/M-Anlagenbau und Prozessentwicklung, additive Fertigungsdienstleistungen, Bauteilanwendung in der Luft- und Raumfahrt, Wärmebehandlung, Ofen- und Anlagenbau, Hochdruck- und Fluidtechnik sowie mechanische Werkstoffprüfung und metallographische Charakterisierung. Die Zusammensetzung des projektbegleitenden Ausschusses ermöglichte damit sowohl die Einbindung potenzieller Anwender als auch von Unternehmen, die Komponenten, Werkstoffe und technisches Wissen für die Weiterentwicklung des L-HIP-Verfahrens bereitstellen können.

Die für die Sitzungen aufbereiteten und bereitgestellten Unterlagen dokumentieren die Zielsetzung und den Arbeitsplan des Vorhabens, die wesentlichen Entwicklungsstände, die getroffenen Entscheidungen sowie die erzielten Versuchsergebnisse. Darüber hinaus bilden sie die PBF-LB/M-Probenfertigung, das Prüfkörperdesign sowie die im Projektverlauf vorgenommenen Anpassungen des Referenzzustands, des mechanischen Prüfprogramms und der experimentellen Vorgehensweise ab. Dadurch wurde den beteiligten Unternehmen eine frühzeitige Bewertung der Übertragbarkeit und der industriellen Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse ermöglicht.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Die während und nach der Projektlaufzeit tatsächlich durchgeführten Transfermaßnahmen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Maßnahmen, die nach Ende des Bewilligungszeitraums durchgeführt wurden, sind entsprechend gekennzeichnet. Den zentralen Transferweg bildeten die Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, in denen die jeweiligen Entwicklungsstände und Versuchsergebnisse vorgestellt, diskutiert und hinsichtlich ihrer industriellen Relevanz bewertet wurden.

Ergänzend wurden in fachlich fokussierten Abstimmungsterminen ausgewählte Fragestellungen zur PBF-LB/M-Prozessentwicklung, zur Auslegung und Umsetzung des L-HIP-Verfahrens sowie zur mechanischen und metallographischen Charakterisierung vertieft. Die Probenfertigung, das Prüfkörperdesign und die Prüfkörperzuordnung, die angewandten Prüf- und Auswertungsmethoden sowie die erzielten Ergebnisse wurden hierfür in einer für die beteiligten Industrieunternehmen nachvollziehbaren Form aufbereitet.

Die Zielsetzung, die methodische Vorgehensweise und der Projektansatz wurden zudem im Jahresbericht 2023 des Fraunhofer ILT öffentlich dargestellt. Die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse flossen darüber hinaus in die wissenschaftliche Qualifizierung der beteiligten Mitarbeitenden und studentischen Hilfskräfte ein.

Vermittelt und vertieft wurden insbesondere Kenntnisse zur PBF-LB/M-Prozessentwicklung, zur Werkstoff- und Porositätscharakterisierung, zur mechanischen Prüfung additiv gefertigter Aluminiumlegierungen sowie zur Entwicklung und Bewertung flüssigkeitsbasierter Hochdruckprozesse. Dieser Transfer in Wissenschaft und Lehre ergänzte den unmittelbar auf die Unternehmen gerichteten Ergebnistransfer.

Tabelle 4: Während und nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Kategorie A Weiterbildung /	Weiterbildung von Mitarbeitenden von KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	Fokus-Termine zu PBF-LB/M-Prozess und HIP-Verfahren	04/24 08/24 12/24

Transfer in die Industrie			04/25 08/25 (nach Projektende 12/25)
Kategorie D Online- Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	Projektvorstellung im Jahresbericht 2023 des Fraunhofer ILT	12/23
Kategorie F Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse	Projektbegleitender Ausschuss	02/24 06/24 11/24 04/25 (nach Projektende 11/25 03/26)
Kategorie G	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	Betreuung studentischer Hilfskräfte	2024 2025

**Die Termine im November und Dezember 2025 sowie im März 2026 wurden nach Ende des Bewilligungszeitraums durchgeführt.*

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Nach Abschluss des Vorhabens sollen die erzielten Ergebnisse zielgruppengerecht aufbereitet und über verschiedene geeignete Transferkanäle verbreitet werden. Hierzu ist vorgesehen, die verfügbaren Ergebnisse zur PBF-LB/M-Prozessführung, zu den eingestellten Ausgangsdichten, zu den statischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften sowie zu den realisierten L-HIP-Prozessrandbedingungen in einem kompakten Anwenderleitfaden zusammenzuführen.

Der Leitfaden soll Unternehmen bei der Auswahl geeigneter Ausgangszustände, der Abschätzung potenzieller L-HIP-Prozessfenster und der Festlegung erforderlicher werkstofftechnischer Nachweise unterstützen. Neben den nachgewiesenen Zusammenhängen sollen auch die Grenzen der vorliegenden Datengrundlage und der daraus resultierende weitere Qualifizierungsbedarf transparent dargestellt werden. Der Leitfaden stellt dabei keine verbindliche Auslegungs- oder Prozessrichtlinie dar, sondern eine technisch begründete Orientierung für weiterführende bauteil- und anwendungsspezifische Untersuchungen.

Darüber hinaus ist die Veröffentlichung ausgewählter wissenschaftlich-technischer Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie deren Präsentation auf einschlägigen Fachtagungen und Messen vorgesehen. Im Mittelpunkt sollen die ermittelten Zusammenhänge zwischen Ausgangsporosität, Aufbaurichtung, L-HIP-Behandlung und mechanischen Eigenschaften von PBF-LB/M-gefertigtem AlSi10Mg sowie die gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung eines flüssigkeitsbasierten Hochdruck-Nachbehandlungsprozesses stehen. Fachveröffentlichungen, Tagungs- und Messebeiträge sowie die Integration der Ergebnisse in die akademische Lehre entsprechen den im Forschungsantrag vorgesehenen Transferwegen.

Ergänzend ist ein an KMU gerichteter Anwenderworkshop vorgesehen, in dem die entwickelte Prozesskette, die verwendeten Prüf- und Auswertungsmethoden, die erzielten Werkstoffkennwerte sowie die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen einer möglichen industriellen Umsetzung vorgestellt und diskutiert werden. Adressiert werden insbesondere Unternehmen aus den Bereichen additive Fertigung, Wärmebehandlung, Werkstoffprüfung sowie Hochdruck- und Fluidtechnik. Ziel ist es, die Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf industrielle Anwendungsfälle zu bewerten und die Initiierung weiterführender Entwicklungs- und Anwendungsvorhaben zu unterstützen.

Die Projektergebnisse sollen außerdem in die akademische Lehre und in die wissenschaftliche Qualifizierung des Nachwuchses einfließen. Hierdurch werden die gewonnenen Erkenntnisse zur PBF-LB/M-Prozessentwicklung, zur Defekt- und Werkstoffcharakterisierung sowie zur flüssigkeitsbasierten Hochdrucknachbehandlung langfristig verbreitet und für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nutzbar gemacht.

Tabelle 5: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Zielgruppe	Ziel und erwartetes Ergebnis	Verantwortliche Forschungsstelle/ geplanter Zeitraum
Anwenderleitfaden	PBF-LB/M-Anwender, Nachbehandlungsdienstleister, Werkstoffprüfer und KMU	Zusammenführung der Ergebnisse, Prozessrandbedingungen, ehAnwendungsgrenzen und erforderlichen Nachweise	ifas und ILT / bis Ende 2026 angestrebt
Fachveröffentlichung	Fachöffentlichkeit und industrielle FuE	Veröffentlichung der Prozess–Defekt–Eigenschafts-Zusammenhänge und der Ergebnisse zur L-HIP-Entwicklung	ifas und ILT / Einreichung des Manuskripts bis Anfang 2027 vorgesehen
Tagungs- oder Messebeitrag	Industrieunternehmen, Anlagenhersteller und Dienstleister	Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion industrieller Anwendungsmöglichkeiten	ifas und ILT / Präsentation im Verlauf des Jahres 2027 vorgesehen
KMU-Anwenderworkshop	KMU aus additiver Fertigung, Wärmebehandlung, Werkstoffprüfung und Fluidtechnik	Vermittlung der Projektergebnisse und Initiierung weiterführender Anwendungsvorhaben	ifas und ILT / bis Ende 2026 angestrebt

Integration in die akademische Lehre	Studierende und wissenschaftlicher Nachwuchs	Nachhaltige Vermittlung der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse	ifas und ILT / zum Wintersemester 2026/2027 vorgesehen
--------------------------------------	--	---	--

Weiterführender Forschungs- und Qualifizierungsbedarf

Über die geplanten Transfermaßnahmen hinaus ergibt sich aus den Projektergebnissen weiterer Forschungs- und Qualifizierungsbedarf. Für eine weiterführende industrielle Qualifizierung des im Vorhaben untersuchten L-HIP-Ansatzes sind insbesondere eine breitere statistische Absicherung der statischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften, korrelative Defektuntersuchungen vor und nach der L-HIP-Behandlung, ergänzende fraktographische Analysen sowie Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit des Thermofluids erforderlich. Darüber hinaus ist eine belastbare technische und wirtschaftliche Bewertung unter Berücksichtigung von Bauteildurchsatz, Energiebedarf, Zykluszeiten, Anlagenverfügbarkeit und Betriebskosten notwendig. Die Übertragung der entwickelten Prüf- und Auswertansätze auf weitere PBF-LB/M-verarbeitete Aluminiumlegierungen stellt einen möglichen Gegenstand weiterführender Forschungs- und Industrievorhaben dar.

8 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03, Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie.
- [2] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.: Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117 (2016), 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [3] Aboulkhair, N. T.; Simonelli, M.; Parry, L.; Ashcroft, I.; Tuck, C.; Hague, R.: 3D printing of aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium Alloys using selective laser melting. *Progress in Materials Science* 106 (2019), 100578. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- [4] Read, N.; Wang, W.; Essa, K.; Attallah, M. M.: Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design* 65 (2015), 417-424. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044.
- [5] Kempen, K.; Thijs, L.; Van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Processing AlSi10Mg by selective laser melting: Parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology* 31 (2015), 917-923. DOI: 10.1179/1743284714Y.0000000702.
- [6] Aboulkhair, N. T.; Everitt, N. M.; Ashcroft, I.; Tuck, C.: Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* 1-4 (2014), 77-86. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001.
- [7] Maskery, I.; Aboulkhair, N. T.; Corfield, M. R.; Tuck, C.; Clare, A. T.; Leach, R. K.; Wildman, R. D.; Ashcroft, I. A.; Hague, R. J. M.: Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography. *Materials Characterization* 111 (2016), 193-204. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.12.001.
- [8] Tang, M.; Pistorius, P. C.: Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue* 94 (2017), 192-201. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.002.
- [9] Brandl, E.; Heckenberger, U.; Holzinger, V.; Buchbinder, D.: Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting: Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* 34 (2012), 159-169. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067.
- [10] Takata, N.; Kodaira, H.; Sekizawa, K.; Suzuki, A.; Kobashi, M.: Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments. *Materials Science and Engineering A* 704 (2017), 218-228. DOI: 10.1016/j.msea.2017.08.029.
- [11] Aboulkhair, N. T.; Tuck, C.; Ashcroft, I.; Maskery, I.; Everitt, N. M.: On the precipitation hardening of selective laser melted AlSi10Mg. *Metallurgical and Materials Transactions A* 46 (2015), 3337-3341. DOI: 10.1007/s11661-015-2980-7.
- [12] Atkinson, H. V.; Davies, S.: Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A* 31 (2000), 2981-3000. DOI: 10.1007/s11661-000-0078-2.
- [13] Hirata, T.; Kimura, T.; Nakamoto, T.: Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys. *Materials Science and Engineering A* 772 (2020), 138713. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138713.

- [14] Finfrock, C. B.; Exil, A.; Carroll, J. D.; Deibler, L. A.: Effect of hot isostatic pressing and powder feedstock on porosity, microstructure, and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 7 (2018), 443-456. DOI: 10.1007/s13632-018-0456-z.
- [15] Tagirov, D.; Kaibyshev, R.: Elimination of Shrinkage Cavities by Liquid Hot Isostatic Pressing in Aluminum Alloys under Superplastic Conditions. *Materials Science Forum* 838-839 (2016), 261-266.
- [16] Chandley, G. D.: Origin of the Liquid Hot Isostatic Pressing Process. *Metallurgical Science and Technology* 19 (2001), 3-5.
- [17] Gallo, R.: Liquid Hot Isostatic Pressing. *Metallurgical Science and Technology* 19 (2001).
- [18] DIN EN ISO 6892-1:2020-06, Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
- [19] DIN EN ISO 6892-2:2018-09, Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur.
- [20] DIN 50125:2022-08, Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben.
- [21] DIN EN 6072:2011-06, Luft- und Raumfahrt - Metallische Werkstoffe - Prüfverfahren - Ermüdungsversuch bei konstanter Amplitude.