Projektträger für das

DLR Projektträger

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Schlussbericht vom 31.01.2026

zum IGF-Vorhaben FKZ 01IF22357N

Thema

Bionisch optimierte, additiv gefertigte Kühlkanäle zum Druckgießen einschaliger Gehäuse für den elektrischen Antriebsstrang (BioniCast)

Berichtszeitraum

01.03.2022 bis 31.08.2025

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.
Wallstraße 58/59
12205 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Wiener Straße 12
28359 Bremen

Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IAPT

IGF-VORDRUCK DLR-PT Stand: Januar 2025

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse 3

1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsprofil 3

1.2 Arbeitspaket 2: Simulation und Optimierung 6

1.3 Arbeitspaket 3: Additiver Fertigungsprozess 6

1.4 Arbeitspaket 4: Gießprozess 13

1.5 Arbeitspaket 5: Bauteilcharakterisierung 13

1.6 Arbeitspaket 6: Technologietransfer und Validierung 22

1.7 Arbeitspaket 7: Projektmanagement 22

2 Verwendung der Zuwendung 26

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 26

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten 26

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft 27

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen 27

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit 28

8 Literaturverzeichnis 29

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Der grundlegende Ansatz des Projekts BioniCast beruht auf der Hypothese, dass durch additive Fertigung, insbesondere mittels des Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahrens - im Folgenden gemäß aktueller Normung bezeichnet als PBF-LB/M-Prozess (Powder Bed Fusion-Laser Based/Metal) - das Eingießen von Hohlstrukturen aus Aluminium im Druckguss ohne die Notwendigkeit einer stabilisierenden Füllung möglich wird. Der primäre Anwendungshintergrund sind Kühlkanäle, wie sie etwa in Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs benötigt werden. Derlei medienführende Kanäle aus Stahl sind im Druckguss Stand der Technik. Aufgrund höherer Wärmeleitfähigkeit, besserer Passung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten zum Guss und zwecks Minderung des Risikos von Kontaktkorrosion besteht jedoch eine starke Motivation, derartige Einleger wie das Gussteil aus Aluminiumlegierungen zu fertigen. Aufgrund der kombinierten thermischen und mechanischen Belastung während des Druckgießprozesses ist dies jedoch in aller Regel nur mittels einer stabilisierenden Füllung möglich, die nach dem Guss entfernt werden muss. Die Vorteile und damit das Potenzial der additiven Fertigung für dieses Anwendung ergeben sich aus der aufgrund der charakteristischen, extrem schnellen Abkühlung höheren Festigkeit des so verarbeiteten Werkstoffs und aus der Möglichkeit, innere Stützstrukturen einzubringen, die in einer Doppelfunktion überdies zur Verbesserung der Wärmeübertragung beitragen können. Die diesbezüglichen Untersuchungen folgen einem iterativen Vorgehen, das neben der Optimierung von Strömungswiderstand und Wärmeübergang mittels CFD-Simulation die simulative Bewertung der Stabilität sowie die Überprüfung der Vorhersagen im Experiment einschließt. Die grundlegende Vorgehensweise ist in Abb. 1 skizziert.

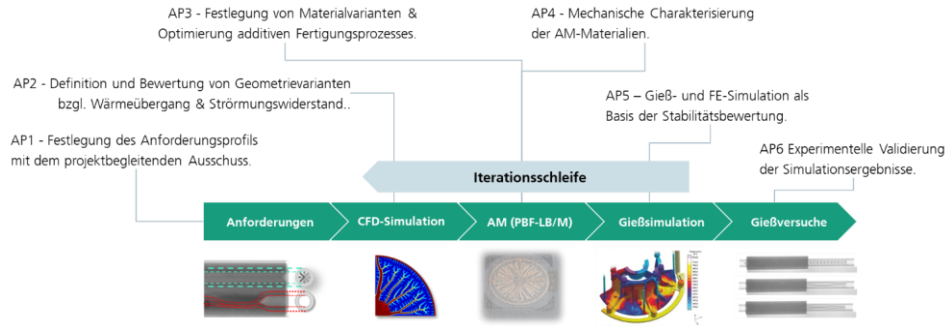


Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise im Projekt zu Entwurf und Evaluierung von Kühlkanal-Konzepten inklusive Iteration.

Den Abschluss des Projekts bildet die Übertragung der Ergebnisse auf ein seriennahes Demonstratorbauteil und die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Fertigungskonzepts.

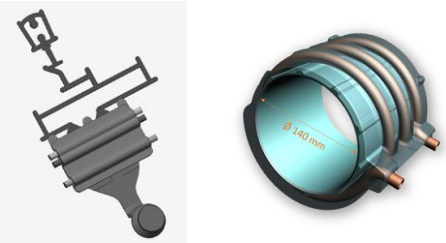
1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsprofil

Zielstellung: Erfassung realistischer Randbedingungen für und Anforderungen an Druckguss-integrierte Kühlkanäle, einschließlich Bestimmung geeigneter Versuchs- und Demonstratorgeometrien.

Arbeitspaket 1.1: Festlegung der Versuchs- und Demonstratorbauteile

Durchgeführte Arbeiten: Im Rahmen des KickOff-Meetings (vgl. Abschnitt 1.7.1) wurden Randbedingungen für Versuchs-/Demonstratorbauteile mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) diskutiert und mit vorhandenen Werkzeugen und Prüfmöglichkeiten abgeglichen. Dabei war zu berücksichtigen, dass im Projekt keine Mittel für umfangreiche Werkzeuganpassungen bzw. Neubeschaffungen vorhanden waren.

Erzielte Ergebnisse: Bezüglich des Versuchswerkzeugs fiel die Entscheidung für die Nutzung des in Abb. 2 links dargestellten Bauteils, das für Versuche zur Bewertung eines alternativen Stabilisierungskonzepts im Rahmen des AiF-ZIM Projekts „CoolCast“ (AiF-ZF4466210PO8) entwickelt worden war und mit dem bereits umfangreiche Erfahrungen in einem vergleichbaren Kontext gesammelt wurden. Als Versuchsgeometrie zur vergleichenden Bewertung von Stabilität und Wärmeübergang zwischen Kühlmedium und Gussteil bot sich dieses Werkzeug auch deshalb an, weil am IFAM bereits ein auf die betreffende Bauteilgeometrie abgestimmter Prüfstand zur Analyse des Wärmeübergangs verfügbar war. Dieser musste lediglich an das im Rahmen des Projekts neu festgelegte Anforderungsprofil angepasst werden (Pumpenleistung, Steuerung, Algorithmik der Auswertung etc., vgl. Abschnitt zu AP5.2). Die Entscheidung für dieses Werkzeug erlaubte damit sowohl in Hinblick auf Stabilität wie auch bezogen auf den Wärmeübergang einen direkten Vergleich mit früheren Ergebnissen und damit eine bessere Einordnung der erzielten Resultate.



(a) (b)

Abbildung 2: (a) Virtueller Schuss des Versuchsbauteils zur Integration dreier Rohre, (b) CAD-Modell der Fallback-Option für den Demonstrator mit Darstellung der Lage konventioneller Kühlkanäle [LEH21].

Eine Entscheidung über den Demonstrator wurde zunächst auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, um einerseits auf neue Erkenntnisse aus der Projektbearbeitung, andererseits aber auch auf aktuelle Produktentwicklungen im PA reagieren zu können. Als Rückfalloption wurde dennoch frühzeitig das in Abb. 2 (b) rechts gezeigte angenäherte Elektromotorgehäuse, für das bei dem PA-Mitglied ae group AG ein Werkzeug zur Verfügung stand, ausgewählt. Auch in diesem Fall hätte sich die Möglichkeit eines direkten Vergleichs eines additive gefertigten Kühlkanals mit der in der Abbildung gezeigten konventionellen Lösung (Rohr $d_{außen}$ /d_{innen} 14/10 mm, Länge ca. 1400 mm) ergeben. Aufgrund der zwischenzeitlichen Insolvenz der ae group AG wurde in einer späteren Projektphase eine Abfrage bei den weiteren PA-Mitgliedern Georg Fischer, Schüle Druckguss und G.A. Röders gestartet. Unter den von den betreffenden Firmen vorgeschlagenen Alternativen wurde letztlich das in Abb. 3 gezeigte Bauteil der Fa. G.A. Röders ausgewählt (vgl. auch Abschnitt zu AP6.1).

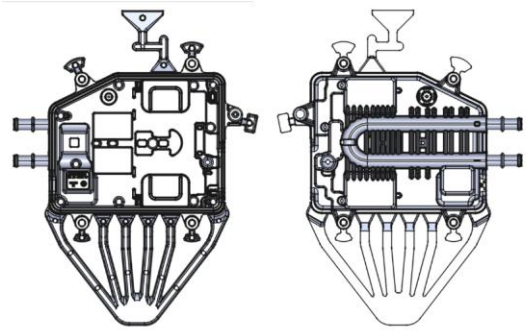


Abbildung 2: Das ausgewählte Demonstratorbauteil der Fa. G.A. Röders (vgl. auch Abschnitt 1.6 zu AP6.1).

Arbeitspaket 1.2: Definition mechanischer und thermischer Anforderungen

Durchgeführte Arbeiten: In der initialen Projektphase wurden im Rahmen der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie in bilateraler Abstimmung mit den Mitgliedern dieses Gremiums die an die einzugießenden Kühlkanäle zu stellenden Anforderungen sowie typische Randbedingungen einer Beispielanwendung, namentlich der Kühlung eines Statorgehäuses eines Elektromotors im elektrischen Pkw-Antriebsstrang, diskutiert.

Ergebnisse: Auf dieser Basis wurde ein allgemeines Anforderungsprofil für die zu entwickelnden Kühlkanal-Konzepte aufgestellt, das in der folgenden Tab. 1 zusammengefasst ist.

Tabelle 1: Anforderungsprofil und Randbedingungen für die Beispielanwendung Kühlung eines Statorgehäuses im elektrischen Pkw-Antriebsstrang.

Kriterium	**Zielwert bzw. -merkmal**
Kühlmedium	Glykol-Wasser-Gemisch im ungefähren Verhältnis 48:52.
Volumenstrom	5 l/min @ 70°C
Wärmestromdichte	234000 W/m^2 (über äußere Wandung)
Druckverlust max.	125 mbar / 12500 Pa @ 5 l/min (bez. auf Rohrlänge 188,5 mm im Versuchswerkzeug)
Stabilitätsgrenze	min. 500 bar (Niveau des Nachdrucks im Druckgießprozess)

Arbeitspaket 1.3: Fixierung des Prüf- und Bewertungskonzepts

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden die allgemeinen Bedingungen für die Bewertung der Eigenschaften der additiv gefertigten Materialien wie auch der Gussteile mit integriertem Kühlkanal festgelegt.

Ergebnisse: Für die für die Stabilitätsbewertung erforderliche Ermittlung der mechanischen Eigenschaften additiv gefertigter Materialien wurden als Prüfverfahren quasistatische Zugversuche bei abgestuften Temperaturen im Bereich von Raumtemperatur bis ca. 400°C festgelegt. Die experimentelle Bewertung der Stabilität der Kühlkanäle basiert auf Gießversuchen mit abgestuftem Niveau des Nachdrucks im in AP1.1 festgelegten Versuchswerkzeug. Die Überprüfung auf Kollaps erfolgt mittels Röntgendurchstrahlung. Die Bewertung des Wärmeübergangs erfolgt unter Nutzung des ursprünglich im Rahmen des bereits erwähnten

Projekts „CoolCast“ entwickelten Prüfstandes, der in Bezug auf Medium, Pumpenleistung und Auswerteelektronik an die in AP1.2 festgelegten Randbedingungen angepasst wurde (vgl. hierzu AP5.2).

1.2 Arbeitspaket 2: Simulation und Optimierung

Zielstellung: Etablierung eines Simulations- und Optimierungs-Workflows zur Identifikation strömungsmechanisch und wärmetechnisch optimierter Lösungen für innere Strukturen in Kühlkanälen.

Arbeitspaket 2.1: Identifikation der Gewichtung der konkurrierenden Optimierungsziele zueinander

Durchgeführte Arbeiten: Die Optimierungsziele wurden anhand der vom PA definierten Randbedingungen für Kühlkanäle in E-Motorgehäusen (Wärmeabfuhr, Druckverlust) bewertet.

Ergebnisse: Der Druckverlust von 125 mbar über die Rohrlänge wurde als limitierendes Kriterium stärker gewichtet als die Effektivität der Kühlung. Die Ermittlung der Werte der Kriterien für unterschiedliche Designvarianten erfolgte über Strömungssimulationen.

Arbeitspaket 2.2: Optimierung der inneren Geometrien gemäß konkurrierender Ziele (Strukturstabilität, Wärmeübertragung, Durchströmbarkeit)

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Rohre mit Variation von Wandstärken und inneren Strukturen konstruiert (vgl. Abb. 3) für hohe Wärmeübertragung und Strukturstabilität bei guter Durchströmbarkeit und unter Berücksichtigung von Potenzial und Restriktionen additiver Fertigung. Für alle Varianten wurden Druckverlust und Wärmeübergang unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils über CFD-Simulationen ermittelt. Die gefundenen Werte dienten weiterer Strukturanpassung mit dem Ziel optimierter Eigenschaftskombinationen.

Ergebnisse: Die in der ersten Iterationsstufe untersuchten Kühlkanal-Varianten zeigt Abb. 3, die Ergebnisse der simulativen Bewertung bezüglich Strömungswiderstand und Wärmeübergang – ausgedrückt über die dimensionslose Nußelt-Zahl – verdeutlicht Abb. 4.

Abbildung 3: Kühlkanal-Geometrien für das Versuchswerkzeug, erste Iterationsstufe.

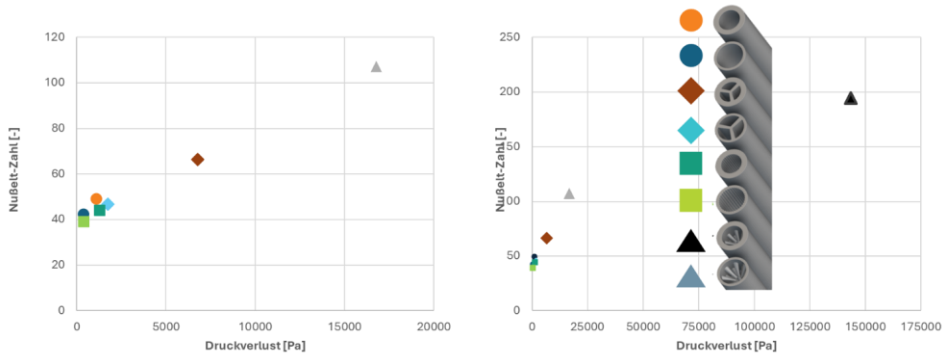


Abbildung 4: Ergebnisse der Bewertung der ersten Iterationsstufe der Kühlkanal-Geometrien, Gesamtübersicht rechts, Detailansicht des Bereichs unterhalb 20 kPa links. Zu beachten ist die Grenze des zulässigen Druckverlusts von 12,5 kPa.

Die Simulation zeigt wenig ausgeprägte Unterschied zwischen glatten Rohren und Varianten mit Rippenstrukturen auf der inneren Oberfläche. Hohe Nußelt-Zahlen erzielen die Varianten mit auf der inneren Rohrwandung aufgesetzten, geneigten Kegeln, allerdings nur auf Kosten eines nicht akzeptablen Druckverlustes. Die dünnwandige Lösung mit Trennwänden in Form eines „Mercedes-Sterns" unterscheidet sich kaum von den Rohren ohne Innenstruktur. Die korrespondierende Variante mit größeren Wandstärken zeigt dagegen eine Erhöhung der Nußelt-Zahl um ca. 60% und verbleibt innerhalb der zulässigen Grenzen des Druckverlustes.

Arbeitspaket 2.3: Re-Design für additive Fertigung, Simulation des Re-Designs bezüglich Performance

Durchgeführte Arbeiten: Es wurde ein Re-Design der Kühlkanäle unter Berücksichtigung der konkurrierenden Optimierungsziele und der in AP3.1 ermittelten Fertigungsrestriktionen.

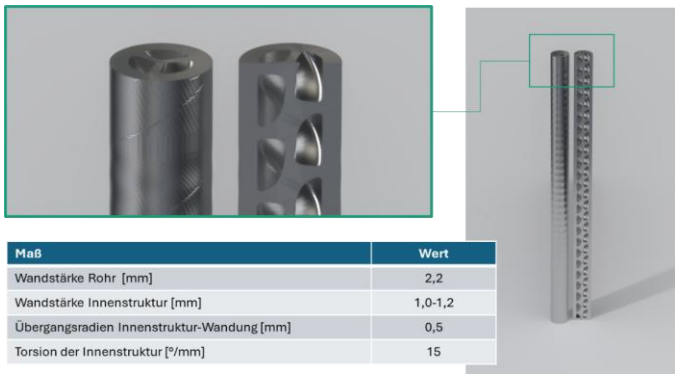
Ergebnisse: Die in Betracht gezogenen Strukturen wurden hinsichtlich der inneren Geometrien an die geltenden Fertigungsrestriktionen angepasst. Im Endeffekt ergaben sich aus diesen keine kritischen Einschränkungen, da Lösungen mit einer Auflösung an den Grenzen der fertigungstechnischen Möglichkeiten zu nicht akzeptablen Werten des Druckverlustes geführt hätten. Die betreffenden neu gestalteten Strukturen wurden einer simulativen Bewertung der fluidmechanischen, wärmetechnischen und stabilitätsbezogenen Merkmale unterzogen. Die finalen Geometrievarianten sind im Abschnitt zu AP2.4 dargestellt.

Arbeitspaket 2.4: Iterativer Ansatz, Einbeziehung von Ergebnissen aus AP4 (Gießsimulation)

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Untersuchungen zur Abbildung der thermischen und mechanischen Belastung der Rohre in der Gießsimulation des Versuchswerkzeugs mittels MAGMASOFT® durchgeführt, sowie alternativ die Übertragung der ermittelten Temperaturwerte und -verteilungen auf FEM-Modelle betrachtet.

Ergebnisse: Die Kühlkanäle wurden als Einleger in MAGMASOFT® modelliert, die Ableitung eines für die Gießsimulation erforderlichen Materialdatensatzes mit den thermophysikalischen Eigenschaften der additiv gefertigten Werkstoffe erfolgte basierend auf Messungen der Zusammensetzung über optische Emissions-Spektroskopie mittels JMatPro®. Die Ergebnisse der Bewertung der Kühlkanal-Geometrien wurden an das Fraunhofer IAPT zwecks Anpassungskonstruktion der Kühlkanäle zurückgespielt. Die Vorgehensweisen zur

Ermittlung der Stabilität sind im Abschnitt 1.5 zu AP5.1 zusammengefasst. In der letzten Iterationsstufe ergab sich aus der theoretischen (simulativen) Bewertung eine Abwandlung der bereits in der ersten Iterationsstufe betrachteten Variante eines Dreikammerprofils: Statt des geradlinigen Verlaufs der Trennwand wurde eine Torsion um 15°/mm eingeführt, die zusätzliche Stabilität liefert und gleichzeitig den Grenzwert des Volumenstroms, ab dem die Strömung mit positiven Auswirkungen auf den Wärmeübergang turbulent wird, nach unten verschiebt. Simulative Betrachtungen zu Wärmeübergang, Druckverlust und Stabilität führten letztlich zu der in Abb. 5 gezeigten Variante, deren detaillierte Untersuchung bezüglich Stabilität in AP5.1 erfolgte.



Maß	Wert
Wandstärke Rohr [mm]	2,2
Wandstärke Innenstruktur [mm]	1,0-1,2
Übergangsradien Innenstruktur-Wandung [mm]	0,5
Torsion der Innenstruktur [°/mm]	15

Abbildung 5: Abschließende Iterationsstufe der Kühlkanalgeometrie für das Versuchswerkzeug. Die grundsätzlich gleich Struktur wurde mit Anpassungen an abweichende Gießbedingungen und äußere Abmessungen auch für das Demosntratorbauteil verwendet., vgl. AP6.1.

1.3 Arbeitspaket 3: Additiver Fertigungsprozess

Zielstellung: Ermittlung fertigungstechnischer Grenzen der Strukturdarstellung mittels additiver Fertigung, Optimierung der Prozessparameter für unterschiedliche Legierungen bezüglich des Spannungsfeldes Bauteilqualität vs. Produktivität, Bereitstellung von Probekörpern für die Ermittlung temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Fertigung von Einlegern für Versuchs- und Demonstratorwerkzeug. Als additiver Fertigungsprozess wird im gesamten Projekt das Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahren betrachtet, im Folgenden gemäß Normung bezeichnet als PBF-LB/M-Prozess (Powder Bed Fusion-Laser Based/Metal).

Arbeitspaket 3.1: Entwicklung eines Katalogs für Designrestriktionen für additiv gefertigte Kühlkanalstrukturen aus AlSi10Mg

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Probekörper mit unterschiedlichen geometrischen Merkmalen wie Überhängen, Bohrungen etc. in abgestufter Größe hergestellt und anhand der Ausprägung der Strukturen die Grenzen der Fertigbarkeit ermittelt.

Ergebnisse: Abb. 6 unten zeigt beispielhaft einige der zur Bewertung der Darstellbarkeit bestimmter Geometriemerkmale gefertigten Strukturen.

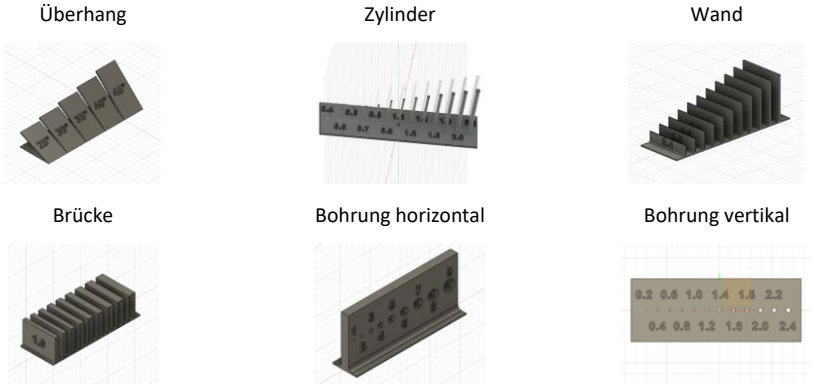


Abbildung 6: Darstellung der zur Ermittlung fertigungstechnischer Grenzen erstellten Teststrukturen.

Die Ergebnisse dieser Bewertung und der sich ergebenden fertigungstechnischen Grenzen sind für alle Geometriemerkmale in Tab. 2 zusammengefasst. Basis der Bewertung ist die Legierung AlSi10Mg.

Tabelle 2: Fertigungstechnische Grenzen für die Verarbeitung von AlSi10Mg.

Strukturvariante	Ermittelte Grenzen
Überhang	25° ohne Supportstruktur fertigbar
Zylinder	Ab Durchmesser < 0,8 mm Abweichungen bis 20%, oberhalb 0,8 mm < 5%.
Wand	Abweichungen < 10% für Wandstärken > 1 mm, zwischen 0,6 und 1 mm ca. 15%, unterhalb 0,6 mm bis zu 35% Abweichung.
Brücke	Horizontale Überhänge ohne Supportstruktur nicht darstellbar (Anhaftungen a.d. Unterseite).
Bohrung horizontal	Durchmesser <= 1 mm nicht fertigbar, 2 bis 7 mm Durchmesser Anhaftungen von bis zu 1 mm. Lediglich Bohrungen > 8 mm Durchmesser ohne Einschränkungen fertigbar.
Bohrung vertikal	Durchmesser <= 0.4 mm nicht fertigbar. Ab 0,6 mm Durchmesser mit Abweichungen zwischen 5 und 10% darstellbar.

Arbeitspaket 3.2: Iterative Konstruktion / Fertigung von Kühlkanälen

Durchgeführte Arbeiten: Erstellung von Kühlkanal-Lösungen und simulativer Abgleich mit den in AP1.2 festgeschriebenen Anforderungen bezüglich Wärmeübergang, Durchströmungswiderstand bzw. Druckverlust und Stabilität im Gießprozess. Iterative Anpassung der Ausgestaltungen bei mangelnder Zielerreichung.

Ergebnisse: Die iterative Anpassung der Geometrievarianten ergab die im Abschnitt zu AP2.2 vorgestellten Optionen, die anschließend im Rahmen von AP4.1 simulativ und in AP5.1 experimentell bewertet wurden. Dabei dienten die Rohre ohne innere Struktur mit Wandstärken von 1,5 mm bis 3 mm in Schritten von 0,5 mm dem Vergleich der betrachteten Stabilitätskriterien unter vereinfachten Bedingungen (vgl. AP4.1).

Als Ergebnis stellte sich die Strukturvariante mit tordiertem „Mercedes-Stern“ als am geeignetsten bezüglich Erfüllung der drei Anforderungsklassen heraus. Auch von dieser Variante wurden verschiedene Abmessungen untersucht, und zwar sowohl bezogen auf die äußere Wandstärke, als auch in Hinblick auf die Stärke der inneren Strukturen. Tab. 3 liefert einen Überblick über die additiv gefertigten Bauteile.

Tabelle 3: Übersicht über die additiv gefertigten und im Projektverlauf bewerteten Bauteile.

Druckkampagne	Probentyp	Bauhöhe [mm]	Anzahl
#1 (AlSi10Mg)	Zugproben-Rohlinge (Prüfung IFAM, BDG Services)	120 mm	50
	Rohr mit äußerer Struktur „Dreieck“	189,7 mm	8
	Rohr mit äußerer Struktur „Sechseck“	189,7 mm	8
	Rohr ohne äußere Struktur, Wandstärke 1,5 mm	189,7 mm	12
	Rohr ohne äußere Struktur, 2,0 mm	189,7 mm	12
	Rohr ohne äußere Struktur, 2,5 mm	189,7 mm	15
	Rohr ohne äußere Struktur, 3,0 mm	189,7 mm	21
	Prüfkörper zur Validierung des Teststandes	191,7 mm	12
#2 (AlSi10Mg)	Zugproben-Rohlinge (Prüfung bei Leibniz IWT)	97 mm	70
	Rohr Kegelstumpf Wandstärke WS 2 / Radien 0,5 mm	188,5 mm	10
	Rohr, zentrale Trennwand 15°/mm tordiert (Wandstärke außen 2 mm / Trennwand 1,2-1,5 mm)	188,5 mm	10
	Rohr, zentrale Trennwand 15°/mm tordiert (1,5 mm / 1,2-1,5 mm)	188,5 mm	10
	Rohr, zentrale Trennwand 15°/mm tordiert (1 mm / 1,2-1,5 mm)	188,5 mm	10
	Rohr, zentrale Trennwand 15°/mm tordiert (1 mm / 1,0-1,2 mm)	188,5 mm	10
#3 (AlSi10Mg)	Rohr, „Mercedes-Stern“ 15°/mm tordiert (2,2 mm / 1,2-1,5 mm)	188,5 mm	16
	U-Rohr für Demonstrator-Bauteil, „Mercedes-Stern“ 15°/mm tordiert (2,93 mm / 1,35-1,6 mm)	250 mm	6
#4 (AlNi7,5)	Zugproben-Rohlinge (Prüfung bei IEHK/RWTH Aachen)	60 mm	12

Die Fertigungsparameter entsprechen für AlSi10Mg dem in AP3.5 angegebenen Referenz-Parametersatz. Die gefertigten Proben wurden den weiterführenden Arbeitspaketen für deren Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 3.3: Oberflächenstrukturen für form-/stoffschlüssige Anbindung an das Gussteil

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Rohrvarianten für das Versuchswerkzeug mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen erstellt, namentlich Rippenmustern mit einer Rippenhöhe von ca. 0.3 mm und Dreieck- bzw. Sechseck-Geometrie.

Ergebnisse: Erwartet wurde eine über die erhöhte Rohroberfläche verbesserte Wärmeübertragung zwischen Gussteil und Einleger, ferner die Möglichkeit eines lokalen Anschmelzens der erhabenen Rippen und damit ein zumindest teilweise stoffschlüssiger Verbund. Keiner der betreffenden Effekte konnte im Experiment nachgewiesen werden. Die Untersuchung des Wärmeübergangs mittels des in Abschnitt 1.5 vorgestellten Prüfstandes zeigte keine Verbesserung des Wärmeübergangs, vgl. AP5.2. Im Gegenteil bedeutet die

Oberflächenstrukturierung das Risiko eines erhöhten Maßes an Porosität durch Verwirbelung der Schmelze. Generell erweist sich für den Wärmeübergang als kritisch, dass der kalte Einleger im Zuge der Formfüllung erwärmt wird und ab einem bestimmten Punkt im Verlauf der Erstarrung abzukühlen beginnt. Dies damit einhergehende Volumenkontraktion verstärkt die durch die Erstarrung des Gussteils von der Formwandung her bedingten mechanischen Spannungen senkrecht zum Übergang zwischen Gussteil und Einleger zusätzlich. Dieser Effekt kann zur Spaltbildung zwischen beiden Komponenten und damit zu einer signifikanten Beeinträchtigung des Wärmeflusses führen. Dem Effekt ist über die Prozessführung nur bedingt entgegenzuwirken.

Arbeitspaket 3.4: Ergebnistransfer auf alternative Al-Legierung

Durchgeführte Arbeiten: Es wurde eine Literaturrecherche durchgeführt mit dem Ziel, geeignete Al-Legierungen mit herausragenden Hochtemperatur-Eigenschaften bei gleichzeitig kaum beeinträchtigter Wärmeleitfähigkeit zu identifizieren. Für die ausgewählte Legierung wurden die Parameter des PBF-LB/M-Prozesses optimiert und mittels dieser Proben zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften erstellt.

Ergebnisse: Im Rahmen der Literaturrecherche wurden unter anderem Legierungen der Typen Al-Mg-Sc-Zr (Scalmalloy, [4]), Al-Mn-Sc [5], Al-Ce-Mn [10], Al-Si-Ni-Fe [12], Al-Zn-Mg-Cu [14], Al-Ni-Cu [7] und Al-Ni [RÖD21, OES22] betrachtet. Analyse der vorhandenen Studien führte auf Basis von Parametern wie Verarbeitbarkeit in der additiven Fertigung, Erhalt der Festigkeit bei erhöhten Temperaturen und Materialkosten zur Entscheidung für die Legierung AlNi7.5, die gemäß Simulation mittels JMatPro® eine gegenüber AlSi10Mg nur geringfügig verschlechterte Wärmeleitfähigkeit aufweist und bei der gewählten übereutektischen Zusammensetzung ein hohes Festigkeitsniveau bis zu Temperaturen von 500°C versprach. Zwecks Bewertung der Legierung wurde eine Inertgas-Verdüsung in Auftrag gegeben. Eine Prozessparameter-Optimierung wurde in Analogie zum Vorgehen für AlSi10Mg (siehe unten, AP 3.5) über Einzel- und Mehrfachspuren mit konstanter Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei variiertem Hatch-Abstand sowie über Fertigung von Würfelproben (vollfaktorieller Ansatz) und metallografische und bildanalytische Bewertung der Porosität der Letzteren durchgeführt. Ergebnis dieser Untersuchungen war der in Tab. 4 dargestellte Parametersatz, der zu einer nahezu perfekten relativen Bauteildichte von 99,97% führte.

Tabelle 4: Ergebnis der Anpassung der Prozessparameter an die Legierung AlNi7,5.

Laserleistung [W]	Scangeschw. [mm/s]	Hatchabstand [µm]	Aufbaurate [mm³/s]	rel. Dichte [%]	Konfidenzintervall [%]
390	1500	80	7,2	99,97	0,12

Der betrachtete Parameterraum erstreckte sich von 280 W bis 390 W Laserleistung bei Scangeschwindigkeiten von 500 mm/s bis 1600 m/s und Hatchabständen von 60 µm bis 80 µm, die relative Dichte lag im ungünstigsten Fall bei 94,23 %.

Arbeitspaket 3.5: PBF-LB/M-Prozessentwicklung mit dem Optimierungsziel einer hohen Aufbaurate

Durchgeführte Arbeiten: Durchführung einer Prozessentwicklung auf Basis von single-track-Versuchen und Aufbau von Würfelproben mit dem Anspruch, bei gleichbleibender Bauteilqualität höhere Aufbauraten zu erreichen.

Ergebnisse: Um eine grobe Einschätzung des Prozessfensters zu ermitteln, wurde als erstes single track Versuche durchgeführt mit folgenden Parameterkombinationen:

Tabelle 5: Parametervariation im Rahmen der single track-Versuche zur Parameteroptimierung der Fertigung von AlSi10Mg mit dem Ziel der Maximierung der Aufbaurate unter Beibehaltung der Qualität.

Laserleistung [W]	Scan-Geschwindigkeit [mm/s]									
100	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
200	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
300	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
350	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500

Die Einzelspuren, die mit einer Laserleistung von P = 350 W und einer Belichtungsgeschwindigkeit von jeweils 600 bis 1500 mm/s generiert wurden, sind in Abb. 7 dargestellt. Hierzu wurde eine Absenkung mit einer Tiefe von 60 µm auf der Substratplatte gefräst, sodass einen Pulverschicht mit einer Schichtdicke von 60 µm aufgetragen werden konnte. Die Substratplatte wurde auf 200 °C vorgeheizt.

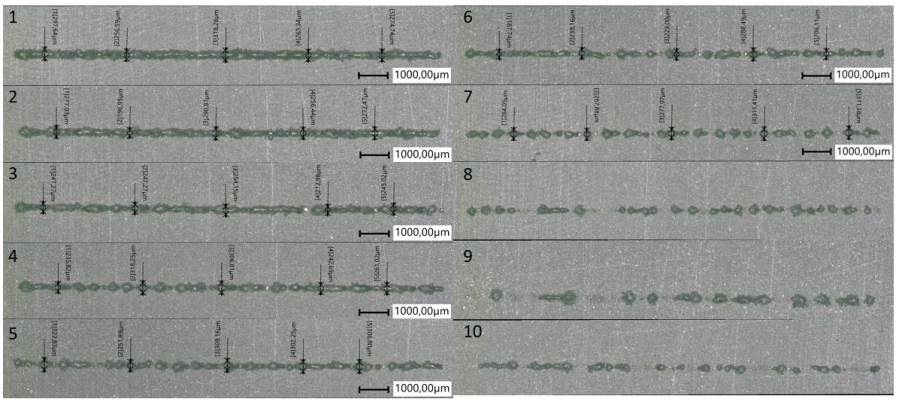


Abbildung 7: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Einzelspuren für P = 350 W, v = 600 - 1500 mm/s Pulverschichtdicke 60 µm.

Mit aufsteigender Belichtungsgeschwindigkeit sinkt die Energie, die eingebracht wird. So ist es zu erkennen, dass ab einer Belichtungsgeschwindigkeit von v = 900 mm/s (Nummer 4) keine durchgehenden Spuren erzeugt werden konnten – die Bildung einzelner kugelförmigen Schmelzklumpen wird in den Literaturen „balling effect“ genannt. In dieser Phase der Prozessentwicklung wird angenommen, dass die maximale Belichtungsgeschwindigkeit bei der Laserleistung von 350 W unter 900 mm/s beträgt. Weiterführende Untersuchungen auf Basis der Fertigung von Würfeln mit Vermessung der Dichte in Abhängigkeit von der Parameterkombination führten letztlich zu dem in Tab. 6 dargestellten Ergebnis. Es konnte bei noch akzeptabler Porosität (0,76 % gegenüber 0,08 %) eine Steigerung der Aufbaurate um ca. 60 % erzielt werden. Dagegen konnte unter Beibehaltung des Porositätsniveaus keine Steigerung der Aufbaurate gegenüber den Referenzparametern erzielt werden, da diese bereits Ergebnis internen Optimierungen waren.

Tabelle 6: Ergebnis der Parameteroptimierung für AlSi10Mg im Vergleich zum Referenz-Parametersatz.

Parametersatz	Laserleistung [W]	Scangeschw. [mm/s]	Schichtstärke [µm]	Hatchabst. [µm]	Aufbaurate [mm^3/s]	rel. Dichte [%]
Referenz	370	2000	60	90	10,8	99,92
Optimierung	370	1500	60	180	16,2	99,24

Die Ergebnisse wurden im projektbegleitenden Ausschuss zur Diskussion gestellt und der Beschluss gefasst, für die Fertigung der Versuchsbauteile etc. die Referenzparameter zu nutzen. Im Vergleich zur alternativen Legierung AlNi7,5 folgt aus dem vorliegenden AP, dass sich für die Legierung AlSi10Mg bei identischer Qualität um 50 % höhere Aufbauraten erzielen lassen. Dies hat auch Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit.

Arbeitspaket 3.6: Validierung der in AP1 definierten mech./therm. Eigenschaften

Durchgeführte Arbeiten: Fertigung von Zugversuchsproben und Wärmebehandlung derselben als Grundlage der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei erhöhter Temperatur für die Standardlegierung AlSi10Mg – bzgl. der alternativen Legierung AlNi7,5 vgl. AP3.5.

Ergebnisse: Es wurden Zugversuchsproben der Legierung AlSi10Mg gefertigt und spannungsarm geglüht (Zustand SR, 2h @ 350°C) bzw. warmausgelagert (Zustand WA bzw. T5, 6h @ 170°C). Die Wahl der Wärmebehandlungszustände ergab sich im Fall SR aus dem Wunsch, Eigenspannungen zu minimieren, um Verzug während des Gießprozesses zu vermeiden. Untersuchungen von Van Cauwenbergh et al. zum Vergleich von Warmauslagerung und Spannungsarmglühen in Hinblick auf mechanische Eigenschaften und verbleibendes Eigenspannungsniveau zeigten jedoch, dass bereits unter den Bedingungen der Warmauslagerung Eigenspannungen weitgehend abgebaut werden und das Festigkeitsniveau des unbehandelten Materials gehalten oder sogar gesteigert werden kann [VAN18], so dass diese Variante die bevorzugte Wahl darstellte. Erste Zugversuche wurden mit konvektiver Erwärmung am Fraunhofer IFAM (bis 250°C) und von der BDG Services GmbH (350°C und 450°C) durchgeführt. Aufgrund der Dauer der Erwärmung und des Prüfzeitraums selbst musste speziell für die bei hohen Temperaturen geprüften Proben von einer Gefügeveränderung ausgegangen werden [OGR02], die tatsächlich anhand metallurgischer Schliffe der betreffenden Proben auch nachgewiesen werden konnten [LEH22]. Die Relevanz der gemessenen Kennwerte für den Anwendungsfall im Druckguss mit Hochtemperatur-Exposition unter Druckbelastung im Bereich von Sekunden stand damit in Frage. Aus diesem Grund wurden weitere Zugversuchsproben zur Prüfung mittels eines Gleeble-Systems am Leibniz Institut für Werkstofforientierte Technologien, Bremen, gefertigt. Auch in diesem Fall wurden die beiden Wärmebehandlungszustände SR und WA/T5 verglichen. Die Ergebnisse sind der Darstellung von AP5.2 zu entnehmen.

1.4 Arbeitspaket 4: Gießprozess

Zielstellung: Etablierung von Kriterien und Workflows zur Prognose der Stabilität von Hohlstrukturen im Druckguss und Validierung der Vorhersagen im Experiment; Erstellung von Probekörpern zur experimentellen Bewertung des Wärmeübergangs zwischen Kühlmedium, Kühlkanal und Gussteil.

Arbeitspaket 4.1: Simulation des Gießvorgangs und Prognose der lokalen Belastung

Durchgeführte Arbeiten: Durchführung von vorbereitenden und begleitenden Simulationen der Gießversuche sowie von simulationsgestützten Versuchen zur Ermittlung eines realistischen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Einleger und Gussteil mittels des Softwarepakets MAGMASOFT®.

Ergebnisse: Die Gießsimulation erfolgte mittels des Softwarepakets MAGMASOFT®, für das als vorhabenbezogene Aufwendung von Fa. MAGMA Gießereitechnologie GmbH zusätzliche Lizenzen für die Aktivitäten im Projekt bereitgestellt wurden.

Es wurden begleitende Gießsimulationen zu den unter AP4.3 beschriebenen Versuchen zur Eingrenzung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Einleger und Guss durchgeführt, dessen Wert in der Simulation dergestalt angepasst wurde, dass die experimentell ermittelten Maximaltemperaturen der mit Thermolacken präparierten Einleger auch in der Simulation getroffen wurden. Es ergab sich eine Wärmeübergangskoeffizient von 7000 W/m^{2}K.

Zusätzlich wurde die Gießsimulation genutzt, um den Moment des Einfrierens des Anschnitts einzugrenzen. Dies ist wichtig, da angenommen werden muss, dass in der Nachdruckphase lediglich bis zu diesem Zeitpunkt Druck auf Restschmelze in der Kavität und damit auf den Einleger ausgeübt werden kann. Zu diesem Zweck wurden zwei unterschiedliche Kriterien herangezogen:

- Absinken des Anteils flüssiger Phase im gesamten Anschnittsquerschnitt unter 30% (Grenze des Nachspeisevermögens für die vergossene Legierung AlSi10MnMg).
- Nogowizin-Kriterium – Ableitung des Zeitpunkts aus thermophysikalischen Daten der Gusslegierung, der Geometrie des Anschnitts und der Temperatur der Form im Bereich des Anschnitts, letztere aus der Gießsimulation [NOG10].

Zwischen beiden Kriterien ergeben sich deutliche Unterschiede – während das Nogowizin-Kriterium für das Versuchswerkzeug für Schmelzetemperaturen zwischen 660°C und 780°C Zeiten zwischen 75.85 ms und 111.33 ms liefert, folgt aus dem direkt auf der Gießsimulation basierenden Kriterium für eine beispielhaft gewählte Schmelzetemperatur von 720°C ein Wert von 538 ms nach Abschluss der Formfüllung. Dies ist von entscheidender Bedeutung, weil der kalt eingebrachte Einleger sich im gesamten Zeitraum weiter erwärmt und damit an Festigkeit verliert (vgl. AP5.1 bzgl. der zugehörigen Ergebnisse zur Strukturstabilität).

Abschließend wurden prozessbegleitende Gießsimulationen durchgeführt, um aus diesen Maximaltemperaturen und Temperaturverteilungen für den als kritisch identifizierten Zeitpunkt zu extrahieren, die für die Bewertung der Stabilität der Einleger genutzt werden konnten (vgl. AP5.1). Dabei wurden entsprechend den im Rahmen der Stabilitätsbewertung verglichenen Ansätze einerseits Maximaltemperaturen ermittelt, andererseits die sich insgesamt ergebende, heterogene Temperaturverteilung über das in MAGMASOFT® integrierte Softwaremodul MAGMALink® auf ein FEM-Modell übertragen.

Arbeitspaket 4.2: Ersatzmodelle des thermischen Verhaltens der inneren Strukturen während des Gießvorgangs

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Gießsimulationen durchgeführt zur Abbildung des thermischen Verhaltens innerer Strukturen mittels Ersatzmodellen mit angepassten Leitfähigkeiten und Wärmeübergangskoeffizienten bei vollständiger Füllung des Rohrinnenraums durch das Ersatzmodell.

Ergebnisse: Der erwartete Vorteil einer vereinfachten Modellierung konnte nicht bestätigt werden. Im Gegenteil führt die Nutzung von Ersatzmodellen in der skizzierten Form zu einer inkorrekten Abbildung der Temperaturverteilung im Rohr, da die durch die Schmelze eingebrachte Wärme homogen über die Rohrinnenfläche in dessen Inneres abgeleitet wird und damit stabilitätskritische Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung verschmiert werden. Dagegen ist die Modellierung auch komplexer Innenstrukturen mittels gängiger Gießsimulation (Hier: MAGMASOFT®) problemlos möglich und liefert für Stabilitätsaussagen relevantere Informationen, so dass dieser Weg eindeutig zu bevorzugen ist.

Arbeitspaket 4.3: Gießversuche zur Ermittlung der Prozessfenster für Strukturen aus AP3

Durchgeführte Arbeiten: Durchführung von insgesamt 3 Gießkampagnen zur Bewertung der Stabilität unterschiedlicher Struktur- und Werkstoffvarianten, inklusive Versuchen zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Einleger und Guss während des Formfüllungs- und Erstarrungsprozesses.

Ergebnisse: Sämtliche Gießversuche mit dem Versuchswerkzeug wurden auf der Bühler SC/N 66 Druckgießanlage des Fraunhofer IFAM durchgeführt. Als Gusslegierung wurde Silafont-36 (Fa. Aluminium Rheinfelden), chemisch AlSi10MnMg, gewählt, da dieser Werkstoff für Anwendungen wie Stator- oder Leistungselektronik-Gehäuse nicht unüblich ist. Eine Variation der Prozessparameter wurde im Experiment lediglich in Bezug auf das Druckniveau in Phase 3 des Druckgießprozesses berücksichtigt. Die ansonsten gewählten Parameter sind der nachfolgenden Tab. 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Fixe Parameter der Gießversuche mit dem Versuchswerkzeug.

Schmelzetemperatur im Tiegel [°C]	Form- und Gießkammer-temperatur [°C]	Gießkolbengeschw. Formfüllung [m/s]	Zuhaltezeit [s]
730	220	2,5	7

Zur Anpassung der Prozesssimulation in Hinblick auf realistische Wärmeübergangskoeffizienten wurden Einleger (Aluminiumstäbe) an den Enden mit Thermolacken versehen, die einen Farbumschlag bei einem jeweils charakteristischen Temperaturwert zeigen. Damit konnte die maximal im betreffenden Bereich auftretende Temperatur eingegrenzt werden und die Wärmeübergangskoeffizienten in der Simulation so angepasst werden, dass die betreffenden Temperaturen auch in dieser erreicht wurden. Es ergaben sich Werte von 7000 W/m^2K, die in den folgenden Simulationen standardmäßig genutzt wurden.

Gießversuche wurden sowohl mit Rohren ohne und mit innerer Strukturierung durchgeführt. Für erstere wurden auch die Materialzustände AlSi10Mg-SR und -T5 verglichen. Aufgrund der hohen Materialkosten war eine Durchführung von Gießversuchen mit Einlegern der Legierung AlNi7,5 nicht möglich. Die Bewertung des Potenzials dieser Legierung erfolgte auf simulativer Basis anhand der Ergebnisse der Materialcharakterisierung (vgl. AP 5.2). Die Ergebnisse der Gießversuche sind im folgenden Abschnitt zu AP5.1 zusammengefasst, in dessen Rahmen die Charakterisierung der Bauteile erfolgte.

1.5 Arbeitspaket 5: Bauteilcharakterisierung

Zielstellung: Untersuchung der Versuchs- und Demonstratorbauteile in Hinblick auf Stabilität und Wärmeübergang; Ermittlung temperaturabhängiger Materialeigenschaften additiv gefertigter und wärmebehandelter Al-Basislegierungen.

Arbeitspaket 5.1: Beurteilung von Anbindungs- und Gussteilqualität sowie Strukturstabilität

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Schliffe erstellt sowie Röntgen-Untersuchungen durchgeführt, um die Anbindung der Einleger an das Gussteil sowie die Stabilität derselben in Abhängigkeit von den Parametern der Gießversuche zu ermitteln. Zum Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen wurden verschiedene theoretische Ansätze zur Prognose der Stabilität unter den Bedingungen des Druckgießprozesses implementiert und bewertet. Dabei wurde auf die Ergebnisse von AP4.1 und AP5.2 zurückgegriffen.

Ergebnisse: Zwecks Prognose der Stabilität wurden folgende Ansätze untersucht:

1. Allgemeine Näherungsformel für Rohre unter äußerer Druckbelastung.
2. Finite Elemente (FE)-Simulation für homogene Temperatur des Einlegers
3. FE-Simulation für inhomogene Temperaturverteilung im Einleger gemäß den Ergebnissen der Gießsimulation

Die Formel zur Stabilität von Rohren unter Außendruck (Ansatz 1) ist in Abb. 8 veranschaulicht. Kritisch neben geometrischen Merkmalen ist die Dehngrenze, die im vorliegenden Fall temperaturabhängig angenommen werden muss. Naturgemäß unterschätzt dieser Ansatz die Stabilität von Rohren, die eine innere Struktur aufweisen, sie kann aber auch in diesem Fall für eine näherungsweise Abschätzung genutzt werden.

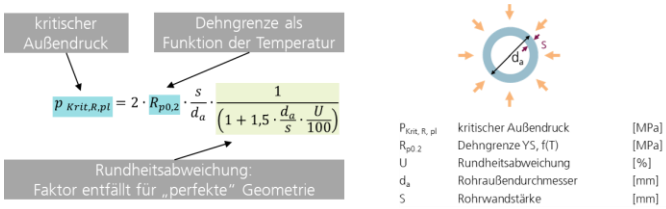


Abbildung 8: Formel zur Berechnung der Stabilität von Rohren unter Außendruck.

Ansatz 1 wurde im Projekt einerseits manuell ausgewertet, indem aus der Gießsimulation die Maximaltemperatur ermittelt, aus den Zugversuchsergebnissen die zugehörige Dehngrenze abgeleitet und die Stabilitätsgrenze berechnet wurde. Alternativ wurde die Formel auch direkt als sogenanntes User Result in MAGMASOFT® implementiert. Abb. 9 zeigt die abgeleitete allgemeine temperaturabhängige Stabilität für Rohre der Werkstoffe AlSi10Mg-T5 und AlNi7,5-F von 12 mm Außendurchmesser und Wandstärken von 1,5 bis 3 mm unter der Annahme einer Rundheitsabweichung des Querschnitts von 1,5%. Zusätzlich sind im Diagramm die Maximaltemperaturen der betreffenden Rohre bei Einsatz in anschnittnächster Position im Versuchswerkzeug und einer Schmelzetemperatur von 720°C eingetragen, sowie die sich ergebenden Stabilitätsniveaus in MPa.

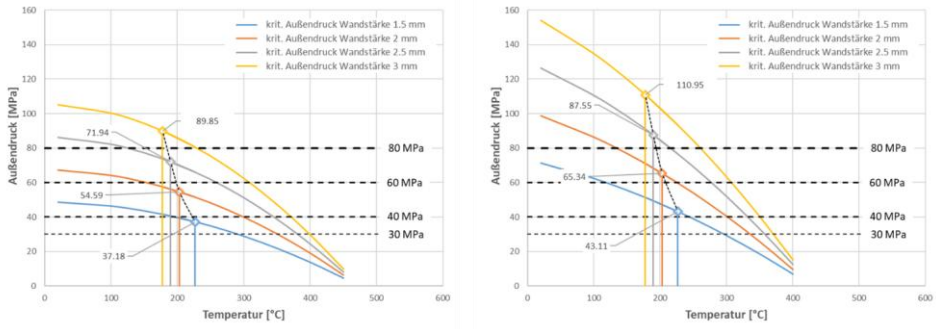


Abbildung 9: Ergebnisse zur temperaturabhängigen Stabilität von Rohren der Legierungen AlSi10Mg-T5 (links) und AlNi7,5 (rechts) unter Außendruck. Die schwarze gestrichelte Kurve verbindet die Kombinationen aus Maximaltemperatur und abgeleiteter Stabilität, die sich für den Einsatz der Rohre im Versuchswerkzeug und bei einer Schmelzetemperatur von 720°C ergeben. Basis für die Bestimmung des Zeitpunkts der Ermittlung der kritischen Temperatur ist hier das Nogowizin-Kriterium.

Abb.10 unten veranschaulicht die direkte Implementierung der Näherungsformel als *User Result* in MAGMASOFT®. Verglichen werden AlSi10Mg-Rohre von 2,5 mm Wandstärke in den Zuständen SR und WA/T5 bei Einsatz im Versuchswerkzeug. Zusätzlich wird der Einfluss der Wahl des kritischen Zeitpunkts gemäß Nogowizin-Kriterium und Schmelzeanteil im Anschnitt gemäß MAGMASOFT®-Simulation gegenübergestellt. In beiden Fällen ist zu beachten, dass sich der abgeleitete Stabilitätswert bei Betrachtung der Maximaltemperatur aus der impliziten Annahme eines unendlichen Rohres mit dieser Temperatur über den gesamten Querschnitt und die gesamte Länge ergibt. Da dies real nicht gegeben ist, sondern die Maximaltemperatur nur punktuell auftritt, unterschätzt dieser Ansatz tendenziell die Stabilität.

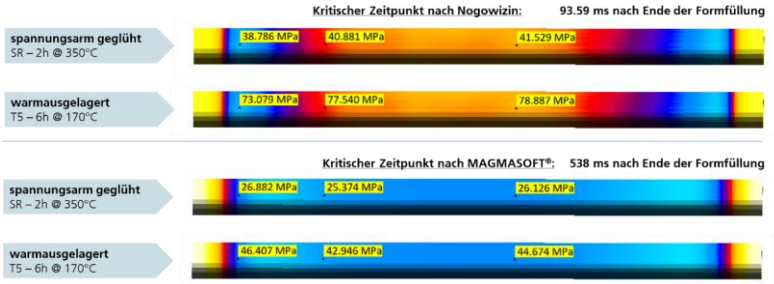


Abbildung 10: Darstellung der lokalen Stabilitätsniveaus als User Result in MAGMASOFT®. Oben, Stabilitätsniveau für Annahme des Nogowizin-Kriteriums als kritischer Zeitpunkt, unten, kritischer Zeitpunkt gemäß MAGMASOFT®-Simulation und Unterschreitung des Flüssigphasenanteils von 30% im Anschnitt. Für beide Fälle Vergleich der Wärmebehandlungszustände SR und WA/T5 der Legierung AlSi10Mg (Randbedingungen Rohrwandstärke 2,5 mm, Schmelzetemperatur 720°C).

Ansatz 2 stützt sich ebenfalls auf die Temperaturwerte aus der MAGMASOFT®-Simulation und überträgt die jeweiligen Maximalwerte homogen auf ein FEM-Modell des Kühlkanals. Dabei wird unterschieden zwischen der Temperatur im Kontaktbereich mit dem Guss und in der Einspannung in der Form. Nach Beaufschlagen des FEM-Modells mit der Temperatur wird der Druck in der Simulation kontinuierlich erhöht, bis die Dehngrenze lokal erstmals überschritten wird. Abb. 11 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse gemäß Ansatz 1 und Ansatz 2 mit experimentellen Ergebnissen zur Stabilität. Das Diagramm bestätigt die Erwartung, dass Ansatz 1 die Stabilität unterschätzt, während Ansatz 2 gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen zeigt. Der Zustand der Rohre nach dem Gießvorgang wurde jeweils über Röntgendurchstrahlung bestimmt. Die Druckwerte entsprechen den von der Anlagensteuerung der Druckgießanlage ausgegebenen Druckwerten am Gießkolben zum Zeitpunkt des Erreichens des Nogowizin-Kriteriums.

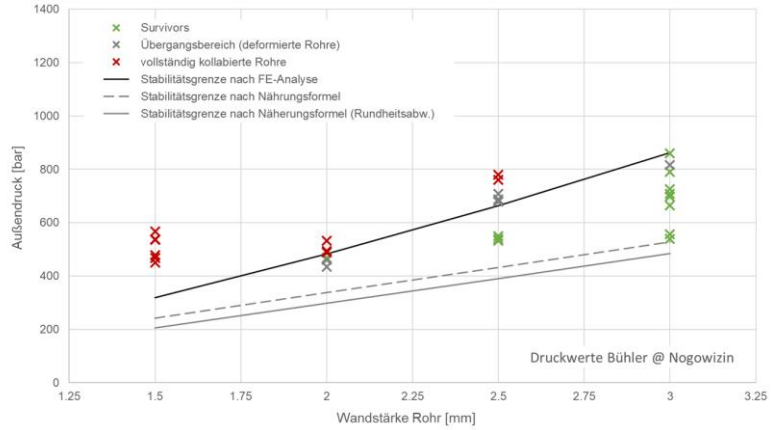


Abbildung 11: Vergleich zwischen prognostiziertem Stabilitätsniveau nach Ansatz 1 und Ansatz 2 und experimentellen Ergebnissen, hier für Rohre der Materialvariante AlSi10Mg-SR (Randbedingungen Schmelzetemperatur 730°C, Nogowizin-Kriterium).

Nachteil des Ansatzes 1 ist dessen fehlende Eignung für Kühlkanäle mit inneren Stützstrukturen. Diese können durch Ansatz 2 abgebildet werden, die Annahme einer homogenen Temperaturverteilung weicht aber in diesem Fall aufgrund der in der Realität geringeren Temperatur der inneren Strukturen gegenüber der Wandung noch stärker von der Realität ab als dies für einfache Rohre der Fall wäre. Daher ist für eine möglichst exakte Vorhersage des lokalen Stabilitätsniveaus immer Ansatz 3 zu bevorzugen, zumal dieser tatsächliche, lokale Schwachstellen aufzeigen kann, die dank der Flexibilität des additiven Fertigungsprozesses gezielt verstärkt werden können. Ein Beispiel für eine Rechnung gemäß Ansatz 3 ist Abb. 12 zu entnehmen. In diesem Fall wurde für das finale Rohrdesign mit der realen Temperaturverteilung (links im Bild angegeben in Grad Kelvin) und einem temperaturabhängigen Elastizitätsmodul linear-elastisch gerechnet, während die Dehngrenze mit einem fixen Wert von 150 MPa angenommen wurde, der dem für den Zustand AlSi10Mg-T5 geltenden Niveau bei der Maximaltemperatur des Rohres entspricht. Die Simulation wurde beendet, sobald dieser Wert lokal überschritten wurde. Dies ist bei den Rohren mit innerer Strukturierung initial im Bereich der Radien zwischen innerer Struktur und Außenwand der Fall. Auch bei dieser Beispielrechnung ist somit davon auszugehen, dass die reale Stabilität unterschätzt wird – konkret ergibt sich ein Druckniveau von ca. 490 bar. Damit wird der Wert, der sich für ein Rohr ohne Innenstruktur mit ca. 2.2 mm Wandstärke gemäß Abb. 11 für die Rechnung mit homogener Temperatur ergibt, aufgrund der lokalen Spannungskonzentration unterschritten. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Ansatz 3 um den Aspekt temperaturabhängige Fließkurven erweitert werden muss und die Rechnungen nicht rein linear-elastisch, sondern stattdessen unter Berücksichtigung plastischer Verformung durchgeführt werden sollten.

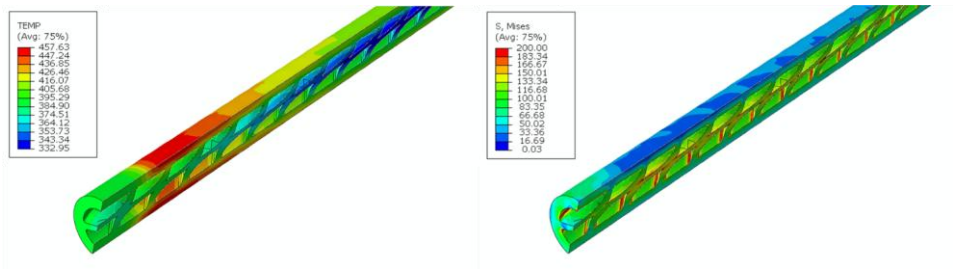


Abbildung 12: FEM-Simulation des finalen Kühlkanal-Designs. Links, Darstellung des aus der Gießsimulation übernommenen Temperaturprofils für den durch das Nogowizin-Kriterium vorgegebenen Zeitpunkt. Rechts, v. Mises-Vergleichsspannung bei einem Druckniveau von 490 bar, bei dem für linear-elastische Rechnung in den Übergangsradien zwischen inneren Strukturen und Kanalwandung erstmals die auf die Maximaltemperatur bezogene Dehngrenze des Werkstoffzustandes AlSi10Mg-T5 überschritten wird.

Abb. 13 ergänzt die gezeigten Simulationsergebnisse um eine Auswertung der Gießversuche. Gezeigt ist jeweils eine Röntgenaufnahme des Rohres in anschnittnächster Position. Die Abbildung deutet auf eine Stabilitätsgrenze im Bereich zwischen 650 bar und 900 bar hin.

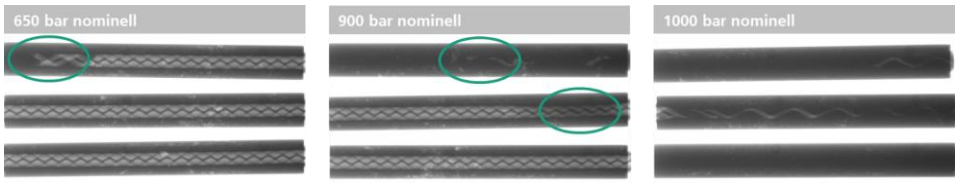


Abbildung X: Röntgenaufnahmen des finalen Strukturdesigns nach Gießversuchen. Die Auslegung erfolgte auf ein Stabilitätsniveau von 630 bar mit bzw. 707 bar ohne Rundheitsabweichung. Die Probe oben links zeigt keinen Kollaps, sondern ein Einströmen von Schmelze vom Ende her (Abdichtungs- statt Stabilitätsproblem). Der Übergangsbereich der Stabilität zeigt sich beim Druckniveau 900 bar. Der obere Kanal ist vollständig kollabiert, der mittlere am Ende leicht eingedrückt, während der untere keine signifikante Schädigung zeigt. Das Niveau von nominell 1000 bar führt in allen Fällen zum Kollaps. Die Temperatur der Schmelze betrug in diesem Fall 720°C.

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Workflow aus MAGMASOFT®-Simulation, Übertragung des Temperaturprofils auf ein FEM-Modell und anschließender FEM-Simulation eine sehr gute Näherung der erreichbaren Stabilität eines Kühlkanals beliebiger Geometrie erlaubt. Dem steht allerdings ein vergleichsweise hoher Rechenaufwand gegenüber. Eine interessante Alternative stellt möglicherweise die Identifikation kritischer Querschnitte anhand der Gießsimulation und deren anschließende Bewertung in einer 2D-FEM-Simulation dar. Dies zur erproben war im Rahmen des abgeschlossenen Projekts nicht mehr möglich.

Arbeitspaket 5.2: Beurteilung des mechanischen und thermischen Verhaltens

Durchgeführte Arbeiten: Zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens der additiv gefertigten Einleger wurden quasistatische Zugversuche durchgeführt. Das thermische Verhalten der eingegossenen Kühlkanäle wurde mittels eines an das Versuchswerkzeug angepassten Prüfstandes ermittelt, der im Rahmen dieses APs an die in AP1.2 festgelegten Anforderungen und Randbedingungen angepasst wurde. Die Prüfstandsversuche wurden in der CFD-Simulation nachgebildet, um die Ergebnisse der simulativen Auslegung des thermischen und Strömungsverhaltens der Kühlkanäle abzusichern.

Ergebnisse: Kenntnis der temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften der additiv gefertigten Werkstoffe ist zentrale Voraussetzung für die Stabilitätsbewertung. Die in AP3.4 und AP3.6 erstellten

Zugversuchsproben der Legierungen AlSi10Mg (Zustände „spannungsarm geglüht/SR“ und „warmausgelagertWA bzw. T5“) und AlNi7.5 (Zustand „F“) wurden im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 450°C charakterisiert. Für die erstere Legierung wurde die Charakterisierung mittels eines Gleeble-Systems und konduktiver (Joule’scher) Erwärmung durchgeführt, um Gefügeveränderungen infolge ausgedehnter Erwärmungs- und Prüfzeiten zu minimieren. Diese wären laut Literatur bei höheren Prüftemperaturen zu erwarten gewesen [OGR02] und konnten in metallografischen Schliffen an zuvor mittels konventioneller, konvektiver Erwärmung geprüften Proben auch nachgewiesen werden [LEH22]. Aufgrund abweichender Geometrie war für die AlNi7.5-Proben eine Prüfung mit dem Gleeble-System nicht durchführbar, aufgrund der gemäß JMatPro®-Simulationen erwarteten höheren thermische Stabilität des Gefüges konnte dieses Manko jedoch akzeptiert werden. Die Ergebnisse der Charakterisierung sind für alle Werkstoffe in Abb. 14 anhand der Dehngrenze und der Zugfestigkeit wiedergegeben.

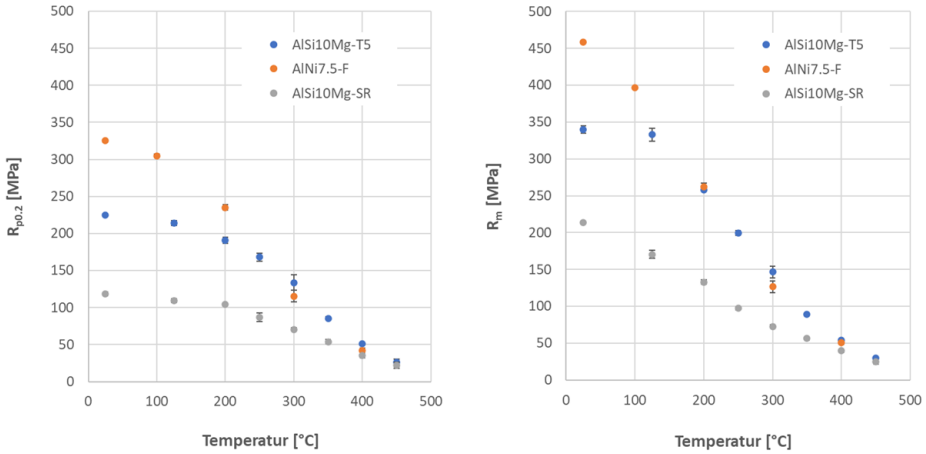


Abbildung 14: Temperaturabhängige Dehngrenze (links) und Zugfestigkeit (rechts) der Legierungen AlSi10Mg in den Zuständen „SR“ und „WA/T5“ sowie AlNi7.5 im Zustand „F“.

Die Bewertung des thermischen Verhaltens der eingegossenen Kühlkanäle erfolgte mittels des in Abb. 15 dargestellten Prüfstandkonzepts. Dessen Prinzip beruht auf dem skizzierten Heraustrennen des Bereichs mit dem zu bewertenden Kühlkanal aus dem Gussteil. Die plane Fläche wird anschließend über eine Heizmatte und eine Wärmeüberträgerplatte erhitzt, während gleichzeitig das Kühlmedium mit definiertem Volumenstrom und Temperatur durch den Kühlkanal geleitet wird. Der Wärmeübergang zwischen Kühlkanal und Guss kann anschließend einerseits über die gemessene Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausströmendem Fluid, alternativ aber auch anhand der sich einstellenden stationären Temperatur der Wärmeüberträgerplatte abgeschätzt werden. Der Prüfstand wurde zudem in der CFD-Simulation abgebildet und die Simulationsparameter im Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen kalibriert.

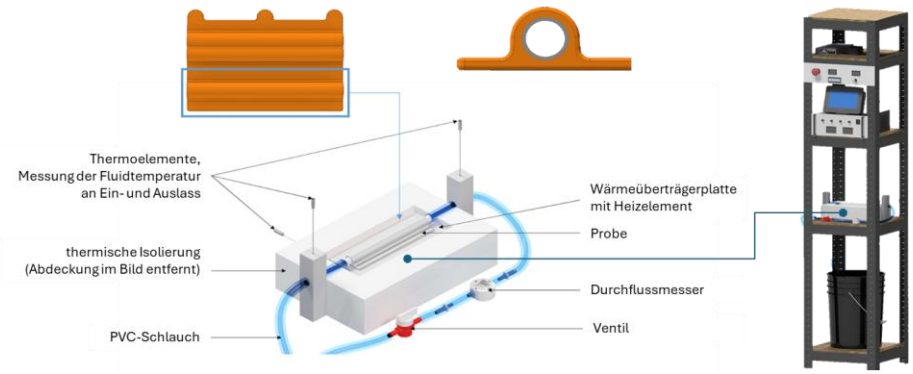


Abbildung 15: Prüfstand zur Bewertung des Wärmeübergangs zwischen eingegossenem Kühlkanal und Gussteil. Die Abbildung oben illustriert die Probenentnahme aus dem Gussteil.

Untersucht wurden Proben mit 8 mm Innendurchmesser bei 150 W Heizleistung und zwei verschiedenen Volumenströmen: 3 l/min , um in Rohren ohne Innenstruktur eine laminare Strömung zu erzielen, 5 l/min, um turbulente Strömung zu erreichen, die den Bedingungen in der Automobilbranche entspricht. Als Kühlmittel kam Ultra-Freeze AF 45 (Fa. Petrofer) zum Einsatz, ein glykolbasiertes Wärmeträgermedium. Abb. 16 fasst beispielhaft Ergebnisse der Messungen zusammen. Als Referenz wurden eine aus Aluminium-Gussmaterial gefräste Probe sowie sechs vollständig additiv gefertigte Proben ohne innere Struktur untersucht. Drei der letzteren (A6-A8) wurden direkt mit 8 mm Innendurchmesser gefertigt, drei weitere (A2-A4) mit reduziertem Innendurchmesser und aufgebohrt, um den Einfluss der Rauheit der Rohrinnenseite zu bewerten. Im Ergebnis zeigt sich ein positiver Einfluss der durch den Fertigungsprozess bedingten, gegenüber einem stranggepressten Rohr erhöhten Rauheit. Probe 225 stellt eine Vergleichsprobe mit einem eingegossenen Stahlrohr dar.

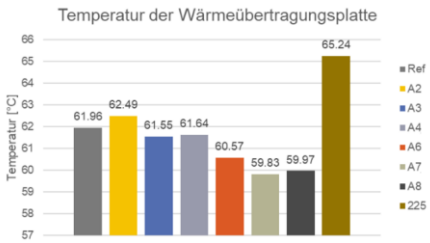


Abbildung 16: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Wärmeübergangs-Prüfstand am Beispiel des Kriteriums stationäre Temperatur der Wärmeübertragungsplatte: Niedrige Temperaturen sind gleichbedeutend mit guter Wärmeabfuhr. Die aus Gussmaterial gefräste Referenzprobe A1 verhält sich analog den additiv gefertigten Proben mit glatter innerer Oberfläche (A2-A4). Die sich aus der additiven Fertigung ergebende raue Oberfläche der Rohrinnenwandung verbessert die Wärmeabfuhr (A6-A8). Der Vergleich mit dem Stahlrohr bestätigt die Erwartungen bezüglich des Potenzials aluminiumbasierter Kühlkanäle.

Ergebnisse der Prüfstandsversuche an den in AP3.3 erstellten Einlegers mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen zeigt Abb. 17 wiederum anhand der Temperatur der Wärmeüberträgerplatte. Positive Effekte der Strukturen (im Bild sind die Dreieck- und Sechseck-Strukturen dargestellt) sind nicht nachweisbar.

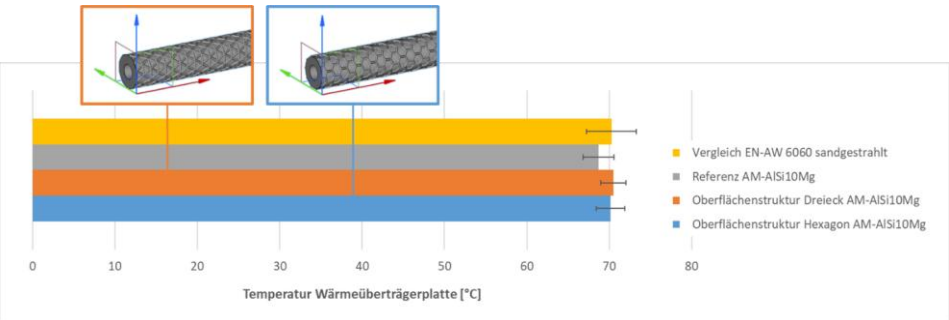


Abbildung 17: Ergebnisse der Untersuchungen mittels Wärmeübergangs-Prüfstand für Einlegeteile mit äußerer Struktur im Vergleich mit Referenzbauteilen. Ein Effekt der äußeren Strukturierung ist nicht erkennbar.

1.6 Arbeitspaket 6: Technologietransfer und Validierung

Zielstellung: Übertragung der mittels des Versuchswerkzeugs ermittelten Ergebnisse auf ein seriennahes Bauteil; Analyse der Wirtschaftlichkeit der Fertigungskette PBF-LB/M-Druckguss.

Arbeitspaket 6.1: Übertragung der Ergebnisse auf komplexe Rohrgeometrie

Durchgeführte Arbeiten: Für das in AP1.1 ausgewählte Demonstratorbauteil wurde angelehnt an die final festgelegte innere Geometrie des Kühlkanals für das Versuchswerkzeug eine an die Randbedingungen dieses Bauteils (u. a. Außendurchmesser des Kanals 16 statt 12 mm, abweichende Gießbedingungen) angepasste Geometrie entwickelt und in der Gießsimulation sowie über Ansatz 1 zur Stabilitätsbewertung iterativ verändert. Anschließend wurde die Struktur am Fraunhofer IAPT in der Variante AlSi10Mg-T5 in 6 Exemplaren gefertigt und bei Fa. Röders eingegossen. Die resultierenden Bauteile wurden mittels Röntgendurchstrahlung analysiert.

Ergebnisse: Die Randbedingungen des Gießprozesses sind in Tab. 8 zusammengefasst. Die Auslegung erfolgte für ein Stabilitätsniveau von ca. 700 bar unter der Annahme idealer Rundheit, bzw. 630 bar mit 1,5% Rundheitsabweichung. Tab. 9 zeigt den Vergleich zwischen der Auslegung, auf identisches Stabilitätsniveau, für das Versuchs- im Gegensatz zum Demonstratorwerkzeug.

Tabelle 8: Randbedingungen des Gießprozesses für das Demonstratorbauteil.

Legierung	Schmelzetemperatur [°C]	Formtemperatur [°C]	Nachdruck [bar]
AlSi12(a)	650°C	165°C	650

Tabelle 9: Vergleich der Auslegung und Dimensionierung des Kühlkanals für das Eingießen im Versuchs- gegenüber dem Demonstratorwerkzeug. Das angegebene Stabilitätsniveau bezieht sich auf die Annahme einer Rundheitsabweichung von 1,5% bzw. (in Klammern) ohne Rundheitsabweichung.

Einleger für …	Außendurchmesser [mm]	Wandstärke außen [mm]	Wandstärke innen [mm]	Übergangsradien [mm]	Verdrehung Innenstruktur [°/mm]	Angestrebte Stabilität
Versuchswerkzeug	12	2,2	1,0-1,2	0,5	15	630 bar (707 bar)
Demonstratorwerkzeug	16	2,93	1,35-1,6	0,5	15	629 bar (706 bar)

Abb. 18 zeigt Geometrie und Abmessungen des Einlegers für das Demonstratorbauteil.

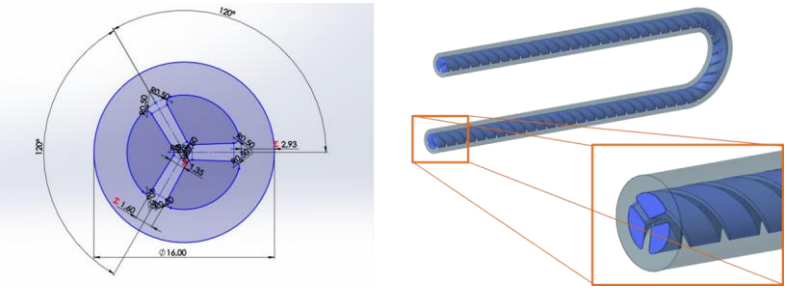


Abbildung 18: CAD-Modell des Kühlkanals für das Demonstratorbauteil.

Abb. 19 belegt das Erreichen der Stabilität des Einlegers im Demonstratorbauteil anhand einer Röntgenaufnahme. Ausgehend von der Anlagensteuerung der Druckgießanlage betrug das mittlere Druckniveau bei Erreichen des Nogowizin-Kriteriums 711 +/- 12 bar und entsprach damit dem Auslegungskriterium für

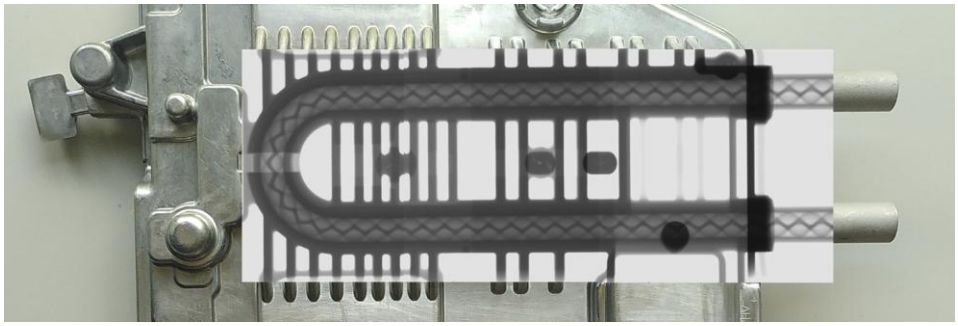


Abbildung 19: Fotografie des bei Fa. Röders abgegossenen Demonstratorbauteils mit überlagerter Röntgenaufnahme des Bereichs mit dem Kühlkanal.

Arbeitspaket 6.2: Erstellung kombiniert komplexer Kühlstruktur-Designs

Durchgeführte Arbeiten: Die Ableitung komplexer Kühlstruktur-Designs wurde im Zusammenhang mit der Übertragung der Projektergebnisse auf das Demonstratorbauteil abgehandelt, vgl. AP6.1. Als Basis für die ökonomische Bewertung des untersuchten Technologiekonzepts wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, gestützt auf das bereits in Abbildung 2 gezeigte Demonstratorbauteil, durchgeführt.

Ergebnisse: Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist in Abb. 20 zusammengefasst. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Materialoption AlNi7,5 für den Kühlkanal um keinen Standardwerkstoff handelt.

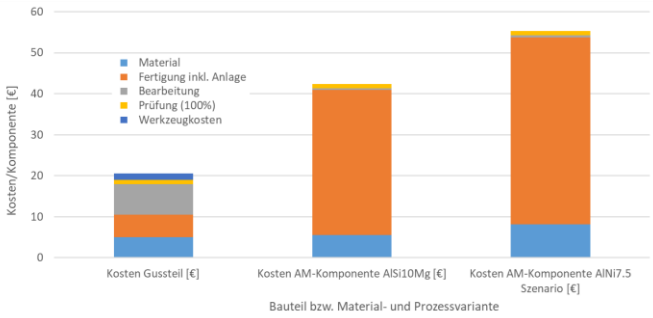


Abbildung 20: Kostenschätzung und Kostenanteile für die Fertigung des Demonstrator-Gussteils im Druckguss inklusive Endbearbeitung und die Fertigung der additiv gefertigten Einleger, letzteres für die Legierungen AlSi10Mg und AlNi7,5, wobei im letzteren Fall eine Schätzung der bei Serienfertigung zu erwartenden Materialkosten zu Grunde gelegt wurde.

Aktuelle Preise für Sonderanfertigungen liegen daher mehr als eine Größenordnung über den für AlSi10Mg aufgerufenen. Für den Vergleich wurde angenommen, dass sich diese Materialkosten bei Serienfertigung auf einem Niveau von ca. 25% oberhalb des für AlSi10Mg etablierten einpendeln. Dennoch dominieren Material und Fertigung die Kosten der additiv gefertigten Komponente, die überdies dem Doppelten derjenigen des Gussteils entsprechen. Hinzu kommt die gegenüber dem Gießprozess erhöhte Zykluszeit der additiven Fertigung. Für eine Wirtschaftlichkeit der Verfahrenskombination sind daher folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Maximales Ausnutzen der geometrischen Flexibilität der additiven Fertigung – u.a. für folgende Zwecke, die durch Strangpressen nicht oder nur über zusätzliche Prozesse erschließbar sind:
    - Lokal angepasste, über die Länge variierte Wärmeabfuhr.
    - Querschnittsveränderungen über die Länge.
    - An den Gießprozess angepasste lokale Ausgestaltung der Stabilisierung.
    - Realisierung von Variantenkonstruktionen über den additiven Fertigungsanteil.
- Einsatz neuer Anlagentechnik mit größerem Bauraum zur Reduzierung der Zykluszeiten.
- Nutzung von Standardwerkstoffen wie AlSi10Mg-T5 wo immer durch Bauteilgestaltung und Prozessführung zu ermöglichen.
- Nutzung von AlNi7.5 nur, wenn aufgrund erhöhter Anforderungen erforderlich. Generell aufgrund der Nivellierung des Festigkeitsunterschiedes zu AlSi10Mg-T5 ab ca. 150-200°C nur für Situation mit niedrigen kritischen Temperaturen sinnvoll.

Zusätzlich kann auch die Nutzung alternativer additiver Fertigungsverfahren mit höherer Produktivität wie binder jetting erwogen werden. Allerdings geht damit der Vorteil der höheren Grundfestigkeit des

Materials infolge hoher Abkühlraten verloren, der für den PBF-LB/M-Prozess charakteristisch ist. In diesem Fall müsste folglich eine Neubewertung der temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe durchgeführt werden.

1.7 Arbeitspaket 7: Projektmanagement

Zielstellung: Koordination der Zusammenarbeit im Projekt und Sicherstellung der Erreichung der Projektziele, inklusive der Verbreitung der Ergebnisse. Zusätzlich Bereitstellung der für die Projektüberwachung durch Forschungsvereinigung und Projektträger erforderlichen Unterlagen.

Arbeitspaket 7.1: Projektsteuerung, Controlling etc.

Durchgeführte Arbeiten: Überwachung des Projektfortschritts, Organisation der Zusammenarbeit zwischen den Forschungsstellen und mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, Einberufung und Organisation der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses.

Ergebnisse: Die PA-Mitglieder wurden über Projektstatus und jeweils geplante nächste Schritte informiert. Während des 1./2. Treffens wurden Anforderungsprofil sowie Prüf- und Bewertungskonzept gemeinsam festgelegt. Im weiteren Verlauf wurde der Arbeitsplan auf Basis der erzielten Ergebnisse an neue Erfordernisse angepasst. Dies betraf unter anderem die Steigerung der Anzahl der separaten Drcuk- und Gießkampagnen.

Arbeitspaket 7.2: Dissemination

Durchgeführte Arbeiten: Koordination der Aktivitäten zur Kommunikation und Verbreitung der Ergebnisse des Projekts.

Ergebnisse: Im Rahmen des Projekts wurden verschiedenste Aktivitäten zur Kommunikation der Projektergebnisse geplant und durchgeführt. Dies schließt Vorträge im Rahmen von Fachausschuss-Sitzungen und auf nationalen wie internationalen Tagungen ebenso ein wie Beiträge für technologische und wissenschaftliche Fachzeitschriften. Darüber hinaus wurden Aspekte des Projekts in die akademische Lehre an der Universität Bremen aufgenommen. Eine Gesamtübersicht der betreffenden wie auch der noch geplanten Aktivitäten ist den Tabellen in Abschnitt 6 dieses Berichts zu entnehmen.

Arbeitspaket 7.3: Berichtswesen/Abschlussbericht

Durchgeführte Arbeiten: Erstellen der Zwischenberichte sowie des Abschlussberichtes zum Projekt.

Ergebnisse: Zwischenberichte und der Abschlussbericht sowie die zugehörigen Unterlagen wie Verwendungsnachweise etc. wurden der zuständigen Forschungsvereinigung fristgerecht zugesandt.

2 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) - 2023
    - **IFAM:** WiMi: 23,2 PM, **IAPT:** WiMi: 26,11 PM
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
    - **IAPT:** Unterauftrag BDG-Services, Warmzugversuche - 2.440,00 €

Kommentiert [DL1]: Diese Werte sind wahrscheinlich nicht korrekt, es fehlen die Beträge aus 2025. Ich muss das in der kommenden Woche nachliefern.

Kommentiert [MG2R1]: IFAM: 26,92 / IAPT: 26,85

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden gemäß Arbeitsplan des Antrags ausgeführt, mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt und von diesem als notwendig und angemessen bestätigt. Zeitliche Verschiebungen wurden an den projektbegleitenden Ausschuss kommuniziert und führten nicht zu Veränderungen im Gesamtumfang der Aktivitäten. Allerdings erwies sich aufgrund diverser Personalausfälle sowie Verzögerungen bei der Materialbeschaffung eine zeitliche Streckung sowie eine zweimalige kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit als erforderlich. Damit verlängerte sich die Projektlaufzeit von ursprünglich geplanten 30 auf insgesamt 42 Monate. Die eingetretenen Verzögerungen konnten innerhalb des erweiterten Zeitrahmens kompensiert werden.

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

Die Projektergebnisse eröffnen den beteiligten Unternehmen in erster Linie die Möglichkeit, additiv gefertigte Kühlkanäle für Druckgussbauteile als zusätzliche Option in ihr jeweiliges Produktportfolio aufzunehmen. Die Grundlage hierfür bildet die technologische und wirtschaftliche Analyse des Einsatzes derartiger Strukturen, sowie insbesondere die Entwicklung verallgemeinerter und validierter Workflows zur Auslegung derselben in Hinblick auf die Kriterien Durchströmungswiderstand, Wärmeübergang und nicht zuletzt Stabilität unter den thermischen und mechanischen Randbedingungen des Druckgießprozesses. Damit liefert das Projekt eine direkt nutzbare Grundlage für eine Entscheidung über die Eignung des betreffenden Ansatzes für beliebige Gussteile. Diese Fähigkeit ist von signifikanter Bedeutung speziell für Unternehmen der Druckguss-Branche: Anbieter von Softwarelösungen im Bereich Gießsimulation können die erarbeiteten Ergebnisse als zusätzlichen Nutzen der Anwendung ihrer Produkte vermarkten. Unternehmen im Bereich Werkzeugkonstruktion und -bau ebenso wie Gießer und Endanwender der Gussteile können die Erkenntnisse im Rahmen der Auslegung entsprechender Komponenten sowie der zugehörigen Werkzeuge ebenfalls direkt einsetzen. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die grundlegenden Methodiken nicht auf Kühlkanäle aus additiver Fertigung beschränkt sind, sondern auf beliebige Hohlstrukturen angewendet werden können. Ebenso ist eine Übertragung auf andere Gießverfahren wie etwa Schwerkraft- oder Niederdruck-Guss grundsätzlich denkbar. Bezogen auf die betrachteten additiv gefertigten Materialien liefert das Projekt konkrete Materialkennwerte als Basis für einen Bauteilauslegung. Da die Gießereiindustrie wie auch ihre

Zulieferer im Bereich Werkzeugbau etc. laut Statistiken des Bundesverbandes der deutschen Gießerei-Industrie e. V. vornehmlich mittelständisch strukturiert ist [BDG26], entsteht aus diesen Möglichkeiten vornehmlich ein Nutzen für Unternehmen dieser Kategorie. Dies gilt in ähnlicher Weise für die Branche der additiven Auftragsfertigung, wie auch für Anbieter von Dienstleistungen im Bereich der Auslegung von Kühlstrukturen, wie sie im projektbegleitenden Ausschuss unter anderem mit dem Unternehmen CE-SYS Engineering GmbH vertreten sind.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die getroffenen und geplanten Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft sind in den Tabellen in Abschnitt 6 und Abschnitt 7 aufgeführt.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 10: Übersicht über im Rahmen der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen.

Maßnahme	Ziel	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Intensiver Dialog über Zielsetzung und Zwischenergebnisse. Beitrag des projektbegleitenden Ausschusses zum Abgleich der Arbeiten mit Fragestellungen aus dem industriellen Umfeld.	Projektlaufzeit
Fachausschüsse und Arbeitskreise	FA Druckguss der Forschungsvereinigung Gießereitechnologie e.V. (FVG), Nürnberg: Vorstellung des Projektstandes	15.01.2024
	Forschungsbeirat des Stifterverbands Metall e.V., Hamburg: Vorstellung des Projektstandes	23.06.2025
Fachzeitschriften	Kurzbeitrag im Forschungsspecial der GIESSEREI 11/2022.	November 2022
Wissenschaftliche Zeitschriften	Lehmhus, D.; Li, G.; Czekalla, M.; Fernandes Gomes, L.; Pille, C.; Pleteit, H.; Struss, A.; Toussaint, K.; Irretier, A.; Dalgic, M. Combining Metal Additive Manufacturing and Casting Technology: High Performance Cooling Channels for Electric Powertrain Components. Advanced Engineering Materials 27, 2025, 2500445	14.05.2025
Konferenzen und Tagungen	MAGMASOFT Nationales Anwendertreffen, Aachen, Vortrag „Optimierte Kühlkanäle in E-Motor-Gehäusen durch Kombination von AM und Druckguss: Stabilität von Hohlstrukturen im Gießprozess“	27./28.09.2023
	Euromat 2023, Frankfurt: Vortrag “Combining Metal Additive Manufacturing and Casting Technology: High Performance Cooling Channels for Electric Powertrain Components”	03.-07.09.2023
Messen und Fachausstellungen	Euroguss 2022, Nürnberg: Vorstellung der Projektidee und erster Ergebnisse (Messestand des IFAM).	08.-10.06.2022
	Gießereifachausstellung (GIFA) 2023, Düsseldorf: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IFAM).	12.-16.06.2023
	Euroguss 2024, Nürnberg: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IFAM).	16.-18.01.2024

Kommentiert [MG3]: Hier bitte die Daten der Sitzungen eintragen!

	Formnext 2024, Frankfurt/Main: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IAPT).	19.-22.11.2024
	Formnext 2025, Frankfurt/Main: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IAPT).	18.-21.11.2025
Fachgespräche	Bilat. Ergebnistransfer an Unternehmen außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses.	ab ca. 09/2023
Akademische Lehre	Bachelor-Arbeit zum Thema „Anpassung des Prüfstands zur Wärmeübergangsmessung“.	Abschluss 2023
	2 Masterarbeiten zum Themenfeld „Stabilität von Hohlkörpern im Druckgießprozess“	Abschluss 2024 bzw. 2025
	Aufnahme von Projektergebnissen in die Vorlesungen „Leichtmetallgießen im Automobilbau“ (WiSe) und „Bauteilentwicklung für automobile Gusskomponenten“ (SoSe) an der Universität Bremen	seit Wintersemester (WiSe) 2023

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Die nachfolgende Tabelle liefert einen Überblick über die nach Projektende bereits durchgeführten und noch geplanten Maßnahmen.

Tabelle 11: Übersicht über nach Projektabschluss bereits durchgeführten und geplanten Transfermaßnahmen.

Maßnahme	**Ziel**	**Datum/Zeitraum**
Projektbegleitender Ausschuss	Aufrechterhaltung des Dialogs mit dem projektbegleitenden Ausschuss über die Projektlaufzeit hinaus zur Erschließung von Verwertungsmöglichkeiten für die Projektergebnisse.	kontinuierlich ab Projektende
Fachausschüsse und Arbeitskreise	FA Druckguss der Forschungsvereinigung Gießereitechnologie e.V. (FVG), Nürnberg: Vorstellung des Gesamtprojekts	12.01.2026
Fachzeitschriften	Gesamtüberblick über die Projektergebnisse (vorgesehen für „Automobil Produktion“)	ca. Herbst 2026
Wissenschaftliche Zeitschriften	Temperaturabhängige Materialeigenschaften der Legierung AlNi7.5, verarbeitet im PBF-LB/M-Prozess (vorgesehen für „Advanced Engineering Materials“/Wiley-VCH)	ca. Frühjahr/Sommer 2026
	Temperaturabhängige Materialeigenschaften der Legierung AlSi10Mg in den Zuständen „spannungsarm geglüht“ und „warmausgelagert“, verarbeitet im PBF-LB/M-Prozess (vorgesehen für „JOM“/Springer)	ca. Sommer/Herbst 2026
	Gesamtübersicht über die Prozesskette AM-Druckguss inkl. Auslegung der Druckguss-Bauteile (vorgesehen für „Journal of Materials Processing Technology“/Elsevier)	ca. Herbst 2026
Konferenzen und Tagungen	Euromat 2025, Granada, Spanien: Vortrag “Additive manufactured complex cooling channels for High Pressure Die Cast (HPDC) electric power train components for automotive applications”	14.-18.09.2025
	The International Conference on Additive Manufacturing and Characterization (ICAMC) 2026, Chennai, Tamil Nadhu, Indien: Vortrag „Cooling Channels for High Pressure Die Cast Electric Powertrain Components: An Additive Manufacturing Approach“	26./27.02.2026

Messen und Fachausstellungen	Euroguss 2026, Nürnberg: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IFAM).	13.-15.01.2026
	Formnext 2026, Frankfurt/Main: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IAPT).	17.-20.11.2026
	Gießereifachausstellung (GIFA) 2027, Düsseldorf: Vorstellung von Projektergebnissen (Messestand des IFAM)	21.-25.06.2027
Fachgespräche	Bilat. Ergebnistransfer an Unternehmen außerhalb des PA.	kontinuierlich
Seminare, Workshops, Fortbildung	Transfer der Forschungsergebnisse über den projektbegleitenden Ausschuss hinaus über Seminare, Workshops und Fortbildungsangebote der Forschungsstellen.	Ab ca. 06/2026
6Akademische Lehre	Aufnahme von Projektergebnissen in die Vorlesungen „Leichtmetallgießen im Automobilbau“ (WiSe) und „Nachhaltigkeit in der gießtechnischen Fertigung“ (ab SoSe 2026) an der Universität Bremen	Fortsetzung der bereits laufenden Aktivitäten.
Software	Vermarktung von Software-basierten Dienstleistungen bzw. Software-Tools zur Kühlkanal-Optimierung, falls entwickelt.	kontinuierlich
Konstruktions-katalog	Vermarktung eines Konstruktions- und Design-Katalogs unter Einbeziehung von AM- und gießtechnischen Anforderungen.	ab ca. 06/2026

8 Literaturverzeichnis

Im folgenden Abschnitt sind die im vorliegenden Bericht genutzten Quellen aufgelistet. Eigene Veröffentlichungen der Forschungsstellen zu Ergebnissen des Projekts sind durch Fettdruck hervorgehoben.

[BDG26] https://www.guss.de/organisation/bdg/branche (Aufgerufen am 30.01.2026)

[JIA19] Jia, Q.; Rometsch, P.; Kürnsteiner, P.; Chao, Q.; Huang, A.; Weyland, M.; Bourgeois, L.; Wu, X. Selective laser melting of a high strength Al Mn Sc alloy: Alloy design and strengthening mechanisms. *Acta Materialia* 171 (2019) 108–118.

[LEH21] Lehmhus, D.; Pille, C.; Borheck, D.; Bumbu, F.; Schwegler, T.; Lee, J.; Yoo, J.; Lutze, P.; Vomhof, R.; Weiss, K. Innovationen für die Elektromobilität – Leckagefreie Kühlkanäle für Druckguss-Gehäusekomponenten. *GIESSEREI* 108 (9) (2021) 40-49.

[LEH22] Lehmhus, D.; Rahn, T.; Struss, A.; Gromzig, P.; Wischeropp, T.; Becker, H. High Temperature Mechanical Properties of Stress Relieved AlSi10Mg Produced via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Materials* 15 (2022) 7386.

[LEH25] Lehmhus, D.; Li, G.; Czekalla, M.; Fernandes Gomes, L.; Pille, C.; Pleteit, H.; Struss, A.; Toussaint, K.; Irretier, A.; Dalgic, M. Combining Metal Additive Manufacturing and Casting Technology: High Performance Cooling Channels for Electric Powertrain Components. *Advanced Engineering Materials* 27 (2025) 2500445.

[LON11] Long, A.; Thornhill, D.; Armstrong, C.; Watson, D. Determination of the heat transfer coefficient at the metal-die interface for high pressure die cast AlSi9Cu3. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 3996-4006.

[MAN19] D. R. Manca, D. R.; Churyumov, A.; Pozdniakov, A. V.; Ryabov, D. K.; Korolev, V. A.; Daubarayte, D. K. Novel heat-resistant Al-Si-Ni-Fe alloy manufactured by selective laser melting. *Materials Letters* 236 (2019) 676–679.

[NOG10] Nogowizin, B. Theorie und Praxis des Druckgusses. Fachverlag Schiele & Schoen GmbH, Berlin 2010, ISBN: 978-3-7949-0796-0.

[OES22] Oeser, S.; Preußner, J.; Rödler, G.; Pirch, N.; Weisheit, A. Laser Metal Deposition of a Near-Eutectic Al-Ni Alloy. *Advanced Engineering Materials* 24(12) (2022) 2200696.

[OGR02] Ogris, E.; Wahlen, A.; Lüchinger, H.; Uggowitzer, P.J. On the silicon spheroidization in Al-Si alloys. *J. Light Met.* 2 (2002) 263–269.

[PLO20] Plotkowski, A.; Sisco, K.; Bahl, S.; Shyam, A.; Yang, Y.; Allard, L.; Nandwana, P.; Marquez Rossy, A.; Dehoff, R. R. Microstructure and properties of a high temperature Al–Ce–Mn alloy produced by additive manufacturing. Acta Materialia 196 (2020) 595–608.

[RÖD21] Rödler, G.; Fischer, F.; Preußner, J.; Friedmann, V.; Fischer, C.; Weisheit, A.; Schleifenbaum, J. Additive Manufacturing of high-strength eutectic aluminium-nickel alloys – Processing and mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology 298 (2021) 117315.

[SPI18] A. B. Spierings, A.B.; Dawson, K.; Dumitraschkewitz, P.; Pogatscher, S.; Wegener, K. Microstructure characterization of SLM-processed Al-Mg-Sc-Zr alloy in the heat treated and HIPed condition. *Additive Manufacturing* 20 (2018) 173–181.

[VAN18] Van Cauwenbergh, P.; Beckers, A.; Thijs, L.; Van Hooreweder, B.; Vanmeensel, K. Heat Treatment Optimization via Thermo-Physical Characterization of AlSi7Mg and AlSi10Mg Manufactured by Laser Powder Bed Fusion (LPBF). In Proceedings of the EuroPM 2018 Congress, Bilbao, Spain, October 14th-18th, 2018.

[ZHO20] Zhou, S.Y.; Su, Y.; Wang, H.; Enz, J.; Ebel, T.; Yan, M. Selective laser melting additive manufacturing of 7xxx series Al-Zn-Mg-Cu alloy: Cracking elimination by co-incorporation of Si and TiB2. *Additive Manufacturing* 36 (2020) 101458.