

Abschlussbericht



Design additiv gefertigter Hochleistungsmaterialien für die Automobilindustrie

Zuwendungsempfänger	RWTH Aachen
Förderkennzeichen	03XP0264
Berichtszeitraum	01.03.2020 - 28.02.2025
Projektleiter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Haase

Kurzbericht

Die Technologien der laserbasierten additiven Fertigung (engl. Additive Manufacturing, AM) weisen durch schichtweisen Materialauftrag zahlreiche technologische und ökologische Vorteile gegenüber umformenden und subtraktiven Verfahren auf. Diese Vorteile sind so gravierend, dass im Zusammenhang mit AM oftmals von einer *disruptiven Technologie*, einer *neuen industriellen Revolution* und *scheinbar unendlichen Einsatzmöglichkeiten* gesprochen wird. Diese Aussagen stehen stellvertretend für die zum Projektbeginn herrschende Aufbruchsstimmung in großen Teilen der produzierenden Industrie in Deutschland.

Zur Stärkung Deutschlands als Produktionsstandort und als Vorreiter im Bereich der Hochtechnologiebranche AM bedarf es des kontinuierlichen Aufbaus und der Verbreitung AM-spezifischen Know-hows sowie fortwährender Innovationen und Inventionen. Dies gilt insbesondere für die Verarbeitung metallischer Werkstoffe in den Bereichen Automobilindustrie, Maschinen- und Anlagenbau, Werkzeug- und Formenbau, Turbomaschinenbau, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie Medizintechnik.

Um zukünftig das volle Potential additiv gefertigter Bauteile industriell nutzen zu können, müssen die relevanten Einflussfaktoren Prozess(-kette), Bauteildesign/-geometrie und Material aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Im Gegensatz zu den bereits marktreifen AM-Prozessen, dem in zahlreichen Vorhaben untersuchten „Design for AM“ und der Integration in entsprechende Design-Software wurde der spezifischen Werkstoffentwicklung bisher wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Dementsprechend standen zum Beginn des Forschungsvorhabens MatAM lediglich einige wenige Werkstoffkonzepte zur Verfügung, welche für konventionelle, i.d.R. lange, Prozessrouten entworfen wurden. Durch neue, an AM-Prozesse angepasste Werkstoffe sind vor allem verbesserte mechanische Eigenschaften, erhöhte Prozess- und Ressourceneffizienz und deutlich reduzierte Nachbehandlungen zu erwarten. Folgerichtig stellen die Materialentwicklung und das Mikrostrukturdesign die fehlenden Puzzlestücke zur Optimierung additiv gefertigter Metallkomponenten dar.

Das übergeordnete Ziel des NanoMatFutur-Vorhabens MatAM bestand darin, durch die Erarbeitung einer neuen Methodik zum agilen Werkstoffdesign, neue metallische Werkstoffe für die laserbasierte additive Fertigung von Bauteilen im Automobilbau zu entwickeln. Im

Gegensatz zur weitverbreiteten Programmatik der Anwendung bestehender Werkstoffkonzepte werden hierbei neue Legierungen entwickelt, die infolge der AM-Prozessbedingungen spezielle physikalische Mechanismen während der Herstellung und in der finalen Anwendung aktivieren. Die grundlegende Neuheit beruht auf dem Ziel, die während der Erstarrung (im AM-Prozess) entstehenden Heterogenitäten, die zumeist als unerwünscht betrachtet werden, zu steuern. Es handelt sich somit um ein seigerungsbasiertes Legierungs- und Mikrostrukturdesign, welches einen Paradigmenwechsel im Bereich der Entwicklung neuer Werkstoffe für AM darstellt.

Innerhalb des Projekts wurden mit den Industriepaten Aconity3D, BMW, EOS, GKN Powder Metallurgy und Oerlikon relevante AM-Prozesse, Werkstoffsysteme, Demonstratoren und Zielkriterien erarbeitet. Anschließend wurde eine Werkstoff- und Prozessentwicklungsmethodik aufgebaut, die durch effiziente Verknüpfung von Modellierung, Simulation, Experimenten und Maschinellem Lernen eine Beschleunigung der Entwicklungszyklen für AM-gerechte Werkstoffe ermöglicht. Vielversprechende Werkstoffe wurden mit hohem Durchsatz synthetisiert, geprüft und auf Demonstratorbauteile übertragen.

Unter Verwendung der im Projekt entwickelten Designmethodik konnten einerseits grundlegende physikalische Mechanismen in den untersuchten Werkstoffen besser verstanden werden. Andererseits wurden hierüber neue Aluminiumlegierungen, Stähle und Hochentropielegierungen zur Verarbeitung mittels selektivem Laserschmelzen berechnet und hergestellt. Durch die Verknüpfung der neuen Werkstoffe mit den Möglichkeiten des geometrischen Designs der Demonstratorbauteile, konnten deren Eigenschaften und Leistungsfähigkeit drastisch verbessert werden. So wies das aus der neuen Aluminiumlegierung entwickelte Bauteil ein um 60% reduziertes Bauteilvolumen und -gewicht bei gleichen mechanischen Eigenschaften auf. Das Energieabsorptionsvermögen der Stahlkomponente konnte um über 100% gesteigert werden und die neue Hochentropielegierung erlaubte sowohl eine Verbesserung der Warmfestigkeit (um über 150%) als auch eine deutlich energieeffizientere Wärmebehandlung nach der additiven Fertigung.

Eingehende Darstellung

1. Methodenentwicklung

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens MatAM war es, eine Methodik zur schnellen Entwicklung AM-gerechter Werkstoffe zu erarbeiten. Diese Methodik, bestehend aus einer Verknüpfung experimenteller, computergestützter und daten-getriebener Methoden, ist nachfolgend beschrieben (siehe auch Abbildung 1):

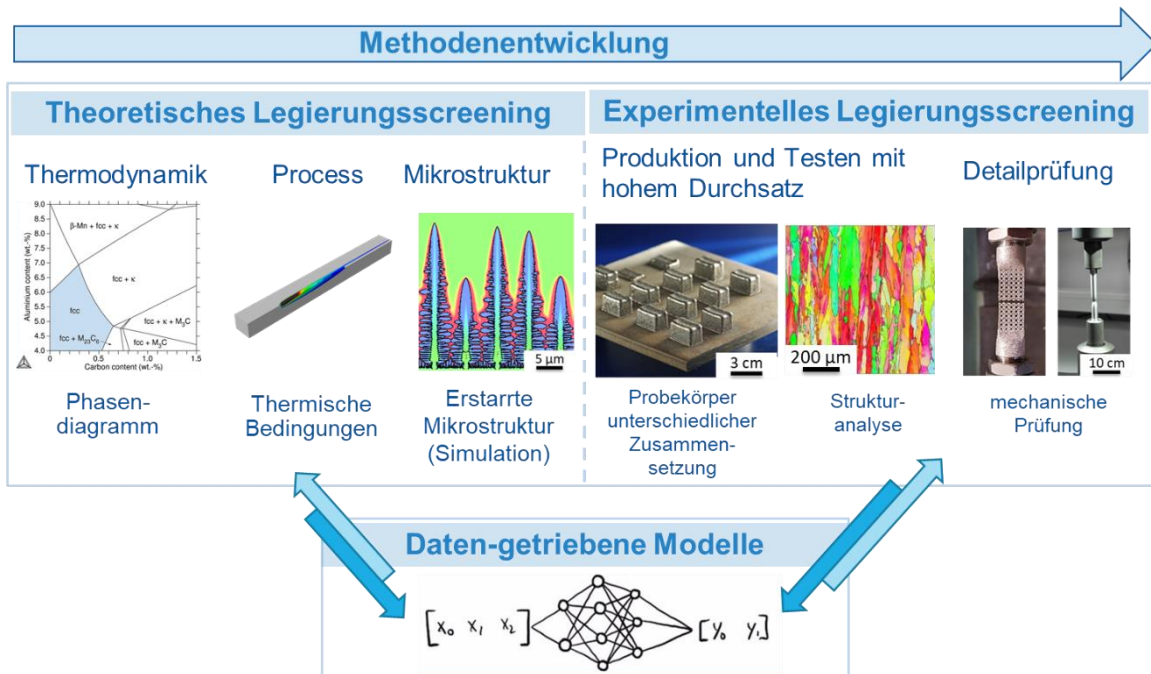


Abbildung 1: Schematische Darstellung der im Vorhaben MatAM erarbeiteten und angewendeten Methodik zum agilen Materialdesign für die laserbasierte additive Fertigung.

1.1 Computer-gestütztes Legierungsscreening

Mittels thermodynamischer Berechnungen (Phasendiagramme, Scheil-Berechnungen) werden zunächst vielversprechende Legierungen abgeleitet und eine daraus ermittelte reduzierte Anzahl durch mikrostrukturaufgelöste Simulationen untersucht (computergestütztes Legierungsscreening). Aus den Berechnungsergebnissen werden chemische Zusammensetzungen für das physische Legierungsscreening ausgewählt und zunächst mit hohem Durchsatz auf Basis von Pulvermischungen hergestellt. Durch das Zusammenspiel von computergestützten und experimentellen Methoden konnte das Verständnis der Prozess-Struktur-Eigenschaften-Beziehungen erarbeitet werden. Weiterhin wurden Methoden des maschinellen Lernens integriert, um diese Beziehungen auf der Basis von Hochdurchsatzsimulationen und -experimenten tiefgreifend zu verstehen.

Abbildung 2 zeigt das Zusammenspiel der Simulationsansätze für das Beispiel des Hochmanganstahls Fe-0,3C-22Mn-1Al (Gew.-%). Mittels thermodynamischer Berechnungen nach der CALPHAD-Methode und ab initio Berechnungen werden zunächst thermodynamische und thermo-physikalische Eigenschaften in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung berechnet. Diese Daten dienen als Grundlage für sämtliche nachfolgenden Simulationsmethoden. Die Auswirkungen der Prozessführung (Interaktion des Laserstrahls mit dem Material während der additiven Fertigung) auf die lokale Entwicklung von Temperatur in Abhängigkeit der Zeit werden mittels FEM-Berechnungen ermittelt. Wie in Abbildung 3 gezeigt ist, bilden die Ergebnisse der FEM-Simulationen die Randbedingungen für die Mikrostruktursimulationen. Auf der Basis der simulierten Mikrostrukturen werden Statistiken der Mikrostrukturbestandteile verwendet, um repräsentative Volumenelemente (RVE) zu erzeugen. Hierzu wird ein aus der Fachliteratur bekannter RVE-Generator genutzt (Dream.3D). Das Verhalten des RVE/Materials unter aufgebrachtener Last (hier einachsiger Zugversuch) wird durch Verwendung eines eigens entwickelten Kristallplastizitätsmodells (ausgehend von der Kristallplastizitätssoftware DAMASK) simuliert (siehe Abbildung 4). Die hierüber ermittelten mesoskopischen mechanischen Eigenschaften dienen als grundlegende Materialkennwerte für die Simulation des makroskopischen Materialverhaltens (Abbildung 5, hier gezeigt für eine additiv gefertigte Gitterstrukturprobe). Die zugrundeliegenden Modelle wurden insbesondere für die Zusammenhänge Thermodynamik-Prozesssimulation-Mikrostruktursimulation auf die anderen im Projekt relevanten Werkstoffsysteme Hochentropie- und Aluminiumlegierungen angepasst und angewendet.

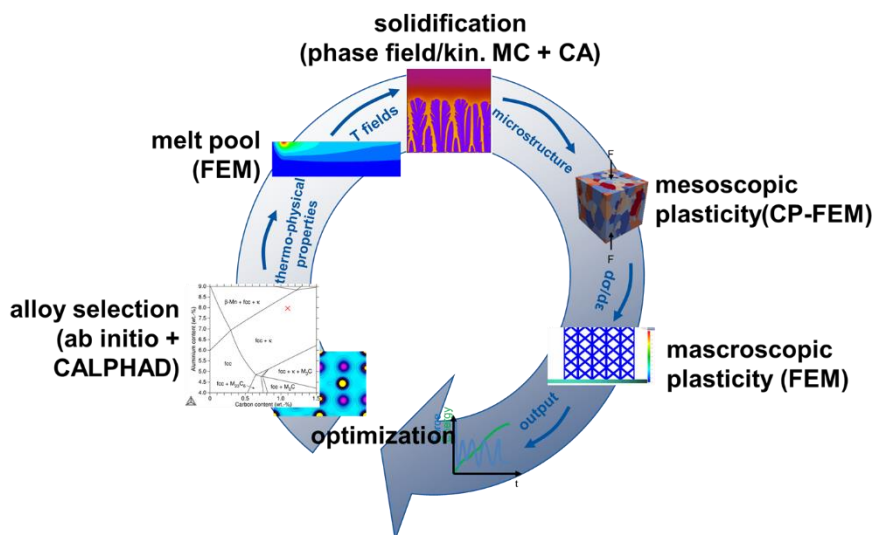


Abbildung 2: Durchgängiger Simulationsansatz ausgehend von thermodynamischen Berechnungen bis zu Werkstoffeigenschaften auf Bauteilebene [A1]. FEM – Finite-Elemente-Methode, MC – Monte-Carlo, CA – Zellularer Automat, CP – Kristallplastizität.

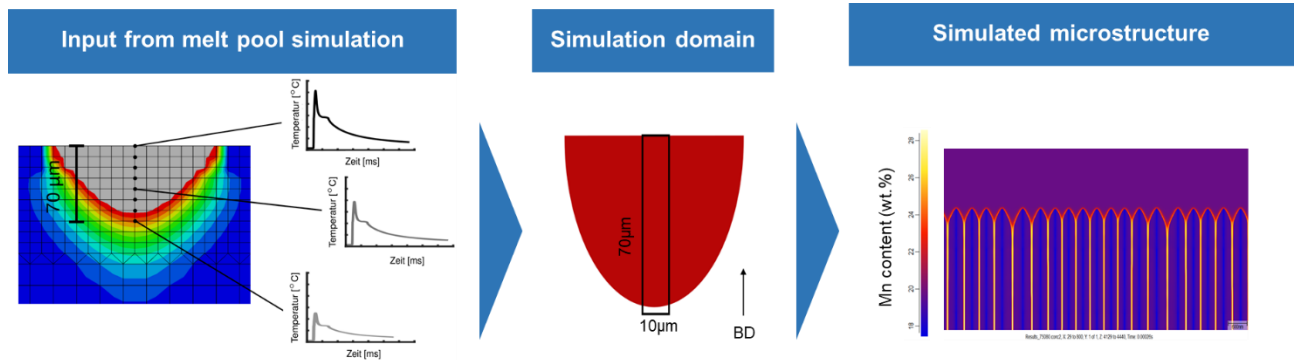


Abbildung 3: Kopplung von AM-Prozesssimulationen (FEM) und Mikrostruktursimulationen (Phasenfeldmethode) [A2]. BD – Aufbaurichtung während AM.

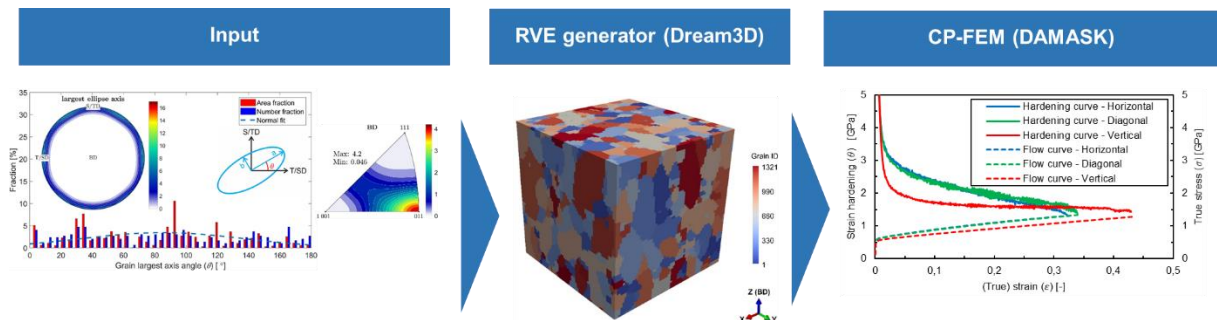


Abbildung 4: Erzeugung von RVEs auf der Basis von Mikrostrukturstatistiken mittels RVE-Generator Dream.3D und anschließende Ermittlung des plastischen Fließverhaltens mittels Kristallplastizitätsmodell [A3].

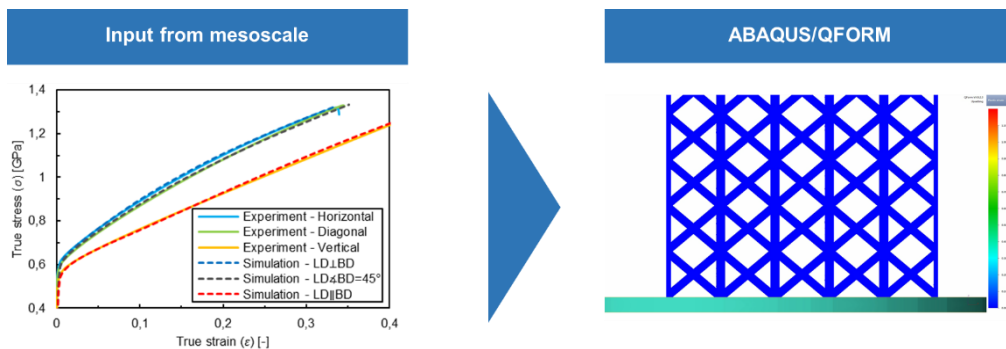


Abbildung 5: Simulation des makroskopischen Verformungsverhaltens mittels FEM-Simulation (Software Abaqus oder QFORM) auf der Basis mesoskopischer Materialeigenschaften aus Kristallplastizitätssimulationen [A1].

1.2 Experimentelles Legierungsscreening

Ausgehend von den im computergestützten Legierungsscreening als vielversprechend bewerteten chemischen Zusammensetzungen wurden experimentelle Untersuchungen zur Validierung der Simulationen und tiefergehenden Analyse vorgenommen. Zur Synthese von Probekörpern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen wurde ein neuer Ansatz etabliert. Mittels des additiven Fertigungsverfahrens extremes Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen (EHLA) können einerseits die sehr hohen Abkühlraten des laserbasierten Pulverbettverfahrens erreicht und somit die

Prozessbedingungen näherungsweise abgebildet werden. Andererseits erlaubt die Verfahrenstechnologie durch Nutzung eines Auftragschweißkopfes und mehrerer Pulverförderer, gradierte Proben mit Bereichen diskreter Zusammensetzung herzustellen. Abbildung 6 zeigt die Vorgehensweise zur schnellen Analyse der Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Prozessparametern, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften. Im gezeigten Beispiel wird der Einfluss von Aluminium in Stahl (Zugabe von reinem Al zu Fe-0,3C -21Mn) und von der genutzten Laserleistung auf die Mikrostruktur und Materialhärte (Nanoindentation) untersucht. Hierdurch lassen sich sowohl direkte lokale Korrelationen als auch statistische Zusammenhänge ableiten. Ferner konnte gezeigt werden, dass sich die ermittelten Trends (z.B. Einfluss von Al-Zugabe auf Phasenanteile, Korngröße, mechanische Eigenschaften) auf Legierungen/Probekörper übertragen lassen, die durch das laserbasierte Pulverbettverfahren verarbeitet/hergestellt wurden. Das Legierungsscreening über das EHLA-Verfahren ermöglicht es, die Anzahl der experimentell untersuchten Legierungen deutlich zu erhöhen und dabei den benötigten Zeitaufwand, Materialverbrauch sowie die Anzahl der Syntheseprozesse deutlich zu reduzieren [A4].

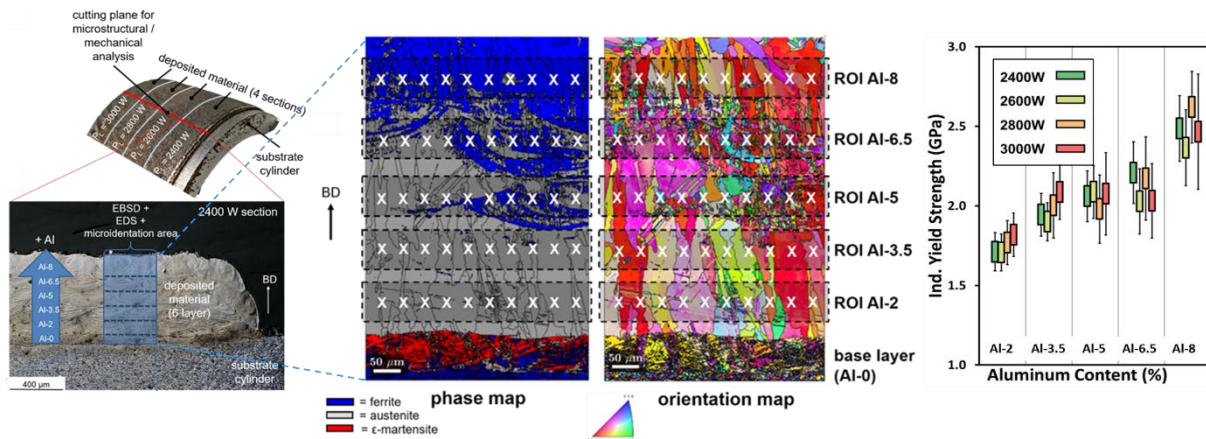


Abbildung 6: Aufbau gradierter Probekörper für das experimentelle Legierungsscreening mittels EHLA. Entwicklung von Chemie-Prozessparameter-Karten durch Beschichtung eines Zylinders mit unterschiedlichen Legierungen und variablen Laserleistungen (links). Hochdurchsatzanalyse der Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Prozessparametern, Mikrostruktur (mittels EBSD-Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop, Mitte) und mechanischen Eigenschaften (mittels Nanoindentation, rechts) [A4].

1.3 Integration von maschinellem Lernen

Sowohl für die Korrelationen zwischen Prozessparametern und der während der additiven Fertigung ausgebildeten Mikrostruktur (PS-Korrelation) als auch zwischen Mikrostruktur und resultierenden mechanischen Eigenschaften (SP-Korrelation) wurden Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt. Für die PS-Korrelationen wurden zunächst auf Basis von

Mikrostruktursimulationen 3-dimensionale Mikrostrukturen für ca. 1000 unterschiedliche Prozessparameterkombinationen erzeugt. Als Mikrostrukturdeskriptor wurden Schnittsegmentlängenverteilungsfunktionen ausgewählt und anschließend durch Hauptkomponentenanalyse hinsichtlich der Datendimensionalität reduziert. Zur Abbildung der PS-Korrelationen wurden die berechneten Hauptkomponenten verwendet, um ein Surrogatmodell (polynomial regression) zu trainieren. Nachfolgende Anwendung eines Modells der erklärbaren künstlichen Intelligenz (SHapley Additive exPlanations) erlaubte es, den Einfluss einzelner AM-Prozessparameter auf die resultierende Mikrostruktur zu quantifizieren [A5].

Ferner wurden auf Basis der Daten aus dem experimentellen Legierungsscreening mittels EHLA-Verfahren und anschließender Charakterisierung (Abschnitt 1.2) SP-Korrelationen ermittelt. Als Trainingsdaten für das Surrogatmodell wurden die chemischen Zusammensetzungen und experimentell ermittelten Mikrostrukturdeskriptoren als Eingangswerte sowie die Härtewerte als Ausgangswerte verwendet. Auch hier wurde durch Nutzung erklärbarer künstlicher Intelligenz der quantitative Einfluss einzelner Mikrostrukturdeskriptoren auf die mechanischen Eigenschaften ermittelt und somit grundlegend verstanden [A4].

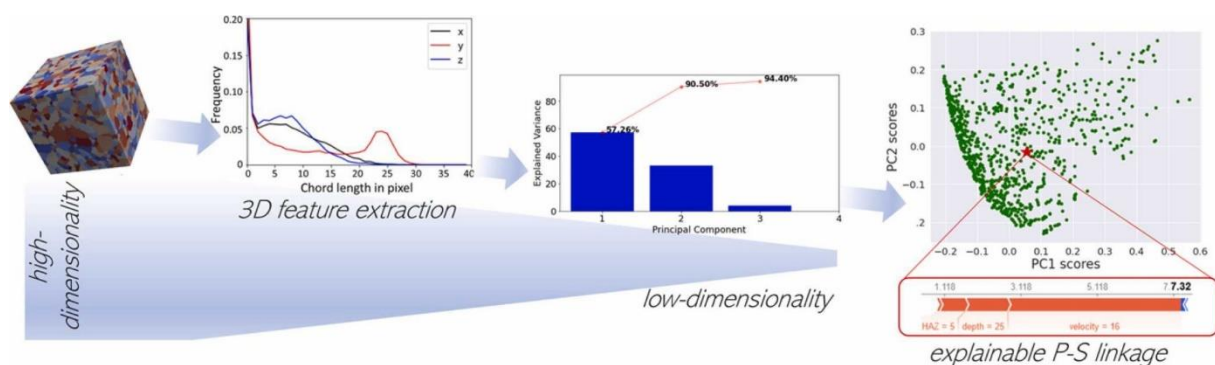


Abbildung 7: Methodik zur Identifizierung von PS-Korrelationen [A5].

2. Entwicklung AM-gerechter Legierungen

Das zweite wesentliche Ziel des Vorhabens MatAM war es, die unter 1. erläuterte Methodik zu nutzen, um AM-gerechte Legierungen zu entwickeln. Hierzu wurden Legierungssysteme und Zielkriterien mit den Industriepartnern identifiziert und formuliert. Die im Laufe des Projekts mit den entwickelten Werkstoffen erzielten Eigenschaften sind ebenfalls in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Zielkriterien und mit den neu entwickelten Legierungen erreichten Eigenschaften.

Hochmanganstahl		
Legierung (Gew.-%)	Zielkriterien	Erreichte Eigenschaften
Fe-0,3C-22Mn	$R_{p0,2} > 500 \text{ MPa}$, $R_m > 850 \text{ MPa}$, $\epsilon_f > 20\%$	$R_{p0,2} = 507 \text{ MPa}$, $R_m = 1088 \text{ MPa}$, $\epsilon_f = 28\%$
Fe-0,3C-22Mn-1Al	$R_{p0,2} > 500 \text{ MPa}$, $R_m > 850 \text{ MPa}$, $\epsilon_f > 20\%$	$R_{p0,2} = 573 \text{ MPa}$, $R_m = 940 \text{ MPa}$, $\epsilon_f = 39\%$
Aluminiumlegierung		
Legierung (Gew.-%)	Zielkriterien	Erreichte Eigenschaften
Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti	$R_{p0,2} > 300 \text{ MPa}$, $R_m > 400 \text{ MPa}$, $\epsilon_f > 6\%$	$R_{p0,2} = 490 \text{ MPa}$, $R_m = 516 \text{ MPa}$, $\epsilon_f = 8,8\%$
Hochentropielegierung		
Legierung (At.-%)	Zielkriterien	Erreichte Eigenschaften
Al _{10,5} Co ₂₅ Fe _{39,5} Ni ₂₅	$R_{p0,2} > 540 \text{ MPa}$, $R_m > 900 \text{ MPa}$, $R_{p0,2}(500 \text{ °C}) > 350 \text{ MPa}$	$R_{p0,2} = 943 \text{ MPa}$, $R_m = 1240 \text{ MPa}$, $R_{p0,2}(500 \text{ °C}) = 890 \text{ MPa}$

Die grundlegenden Mechanismen der Mikrostrukturausbildung in den entwickelten Werkstoffen, der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Leistungsfähigkeit der Demonstratoren sind in den folgenden Kapiteln für die einzelnen Legierungssysteme detailliert dargestellt.

2.1 Stähle

Die für die AM-gerechten Stähle identifizierte Anwendung lag im Bereich energieabsorbierender Komponenten. Demnach wurde bei der Auswahl des Legierungssystems sowohl hohe Festigkeit als auch hohes Verfestigungspotenzial avisiert. Geeignet hierfür sind austenitische Hochmanganstähle, die durch Aktivierung mehrerer plastischer Verformungsmechanismen eine hohe Verfestigung ermöglichen.

Aufbauend auf den beschriebenen computergestützten Studien wurden Hochmanganstähle (Basislegierung Fe-0,3C-22Mn) mit bis zu 5 Gew.-% Al experimentell hergestellt. Die Mikrostrukturen (Abbildung 8) und resultierenden mechanischen Eigenschaften (Abbildung 9) sind nachfolgend dargestellt. Mit zunehmendem Al-gehalt wird neben der fcc-Phase (Austenit) die bcc-Phase (Ferrit) stabilisiert und experimentell ab einem Gehalt ≥ 3 Gew.-% nachgewiesen (siehe Abb. 8(a)), was mit Phasenfeldberechnungen übereinstimmt. Ab einem Al-Gehalt von 4 Gew.-% hat die gebildete bcc-Phase einen signifikanten Einfluss auf die entstehende Mikrostruktur und Textur. Die Korngröße nimmt mit zunehmendem Al-Gehalt deutlich ab und die Textur wird zunehmend schwächer (Abb. 8(b)).

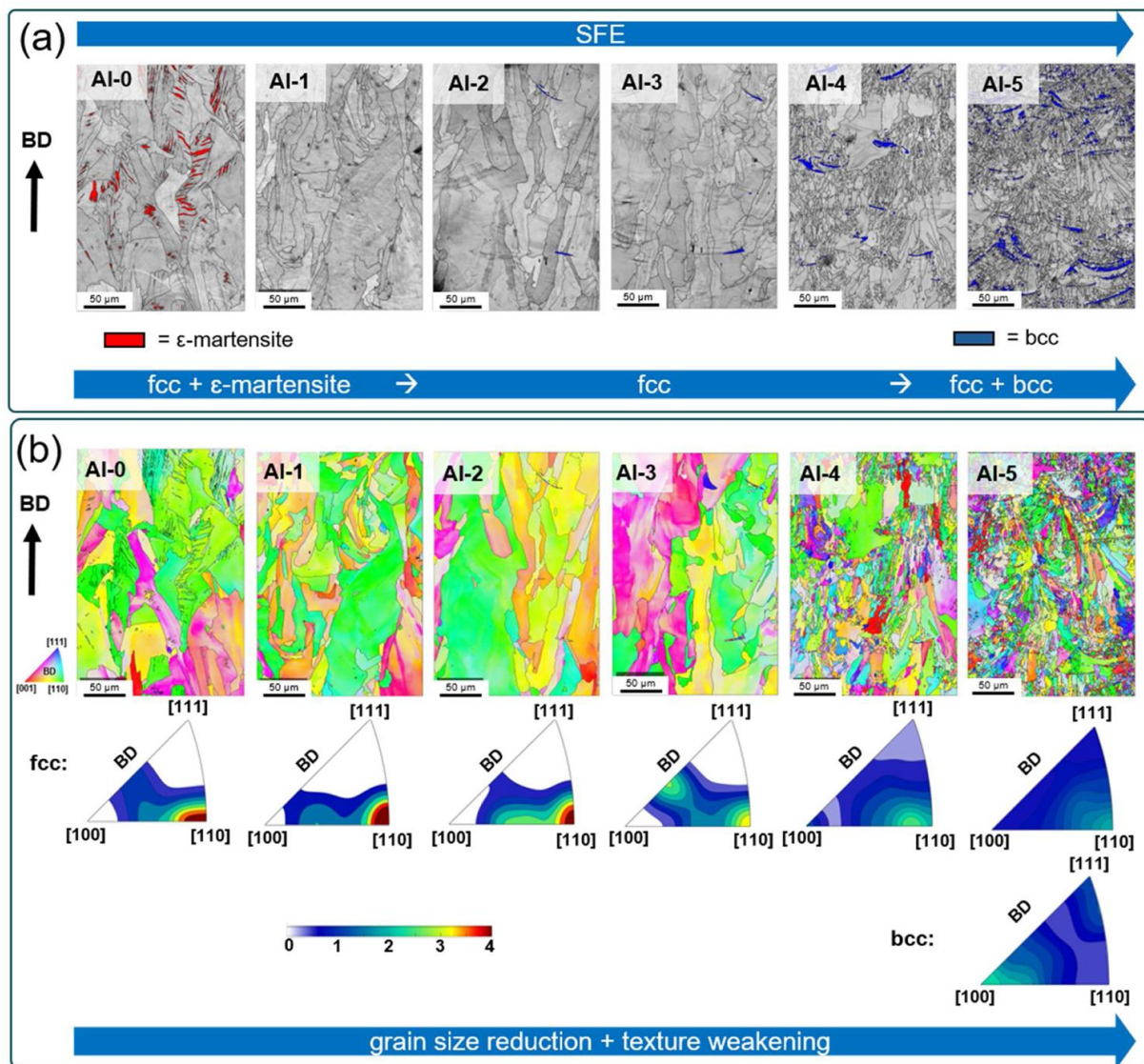


Abbildung 8: Experimentell ermittelte Mikrostrukturentwicklung anhand von Phasenverteilungen (a) und kristallographischer Orientierungen (b) mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) im Elektronenmikroskop [A2].

Als Resultat aus der Erhöhung der Stapelfehlerenergie durch Al-Zugabe, der Verringerung der Korngröße, Zunahme der Ferrit-Phasenanteile und Abschwächung der Textur (Abb. 8) werden die mechanischen Eigenschaften im einachsigen Zugversuch stark beeinflusst (Abb. 9). Mit zunehmendem Al-Gehalt steigt die Streckgrenze, was auf die Mischkristallverfestigung, Mehrphasigkeit und Kornfeinung durch Al-Zugabe zurückzuführen ist. Die Zugfestigkeit nimmt mit zunehmendem Al-Gehalt ab, da der TRIP-Mechanismus bei $\text{Al} \geq 1$ Gew.-% unterdrückt wird, was ebenfalls eine Steigerung der Duktilität bewirkt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch das erfolgte Legierungsdesign im System Fe-Mn-Al-C die im Antrag formulierten Zielkriterien hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von $R_{p0,2} > 500$ MPa (yield strength), $R_m > 850$ MPa (ultimate tensile strength), $\epsilon_f > 20\%$ (fracture strain) für die Werkstoffe mit 0 und 1 Gew.-% Al (Al-0 & Al-1) für Beanspruchung mit TD_LBD erfüllt werden und für Al-2 und Al-5 lediglich

minimal unterhalb $R_m > 850$ MPa liegen. Hieraus ergibt sich, dass die entwickelten Legierungen ein hohes Potenzial für die Anwendung in energieabsorbierenden Bauteilen aufweisen und dabei hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung flexibel sind.

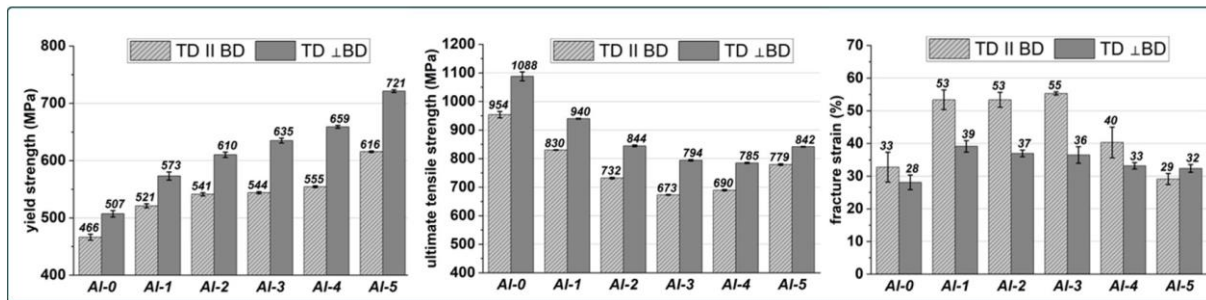


Abbildung 9: Zusammenfassung der experimentell ermittelten mechanischen Eigenschaften im einachsigen Zugversuch für Dehnungen parallel zur Aufbaurichtung (TD//BD) und senkrecht zur Aufbaurichtung (TD⊥BD) [A2].

Im nachfolgenden Schritt wurden die untersuchten chemischen Zusammensetzungen von Standardprobekörpern für Zugproben auf filigrane Gitterstrukturproben (Demonstratoren) übertragen und durch selektives Laserschmelzen gefertigt (Geometrie siehe Abb. 10(b)). Durch Untersuchung der lokal auftretenden Dehnungen innerhalb der Gitterstrukturproben im einachsigen Druckversuch mittels digitaler Bildkorrelation zeigte sich, dass insbesondere die Proben der Legierung Al-0 infolge lokaler Dehnungsspitzen in den Knotenpunkten einzelner Stege ab einer Gesamtdehnung von ca. 20% lokal spröde versagen. Dieses Verhalten konnte durch Analyse der lokalen Mikrostruktur nach der Verformung mit der Entstehung von sprödem Martensit (rote Phase in Abb. 10(b)) korreliert werden. Als Resultat weist die Kraft-Dehnungskurve (Abb. 10(a) für Al-0) bei dieser Dehnung einen starken Spannungsabfall auf, der im Vergleich zu den Werkstoffen Al-1 und Al-5 zu einer geringeren absorbierten Energie führt (Abb. 11(b)). Insgesamt lagen die entwickelten Hochmanganstähle hinsichtlich ihres Energieabsorptionsvermögens oberhalb der gewählten Referenzwerkstoffe Stahl AISI 316L und der Titanlegierung Ti6Al4V (Abb. 11(b)). Im Vergleich zum Stahl AISI 316L konnte die Leistungsfähigkeit um 100% gesteigert werden.

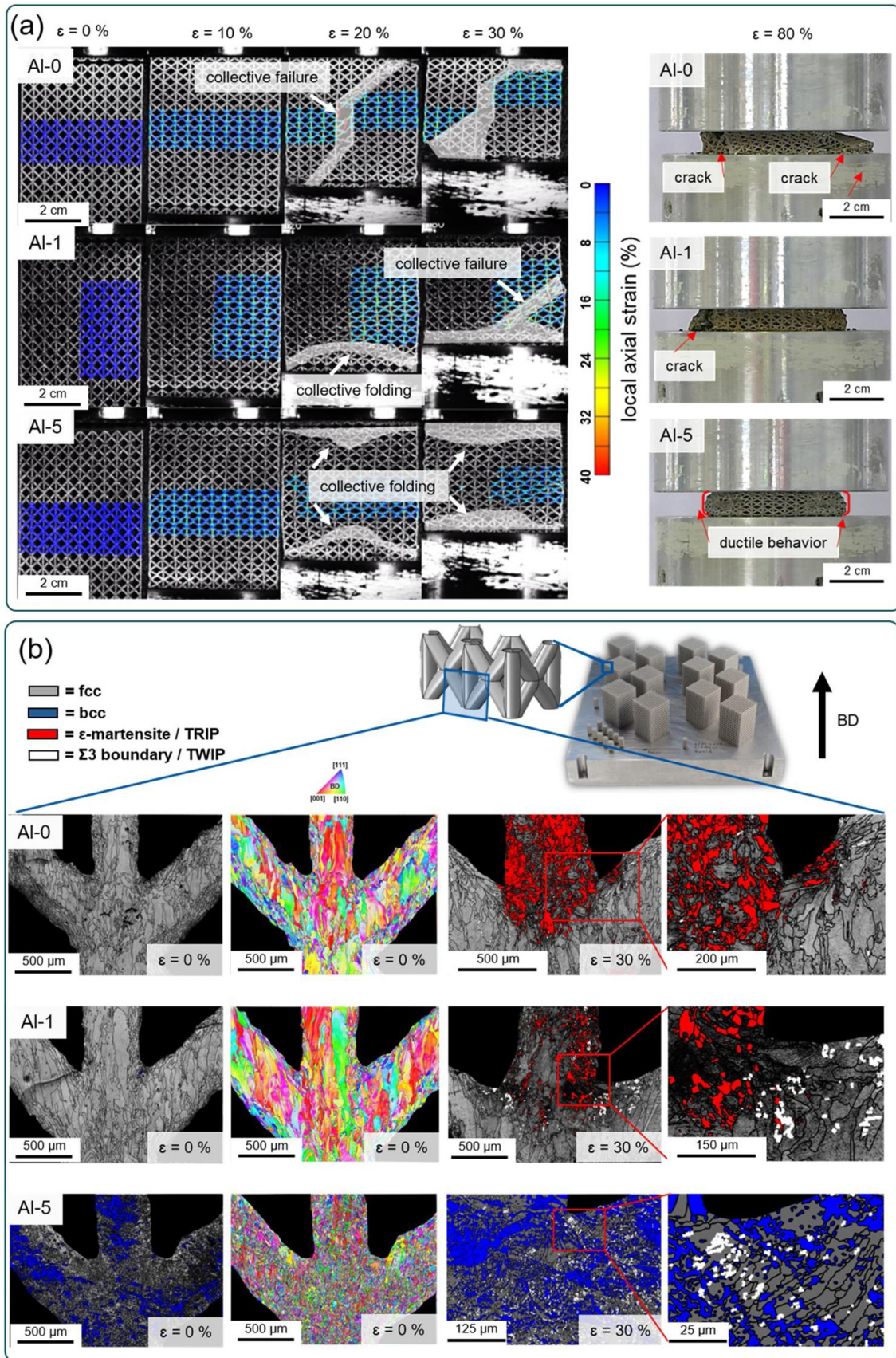


Abbildung 10: Untersuchung des Verformungsverhaltens von additiv gefertigten Gitterstrukturen zur Energieabsorption im Druckversuch mittels digitaler Bildkorrelation (a) und der Mikrostruktur innerhalb der Gitterstrukturen mittels Elektronenrückstreubeugung (b) [A2].

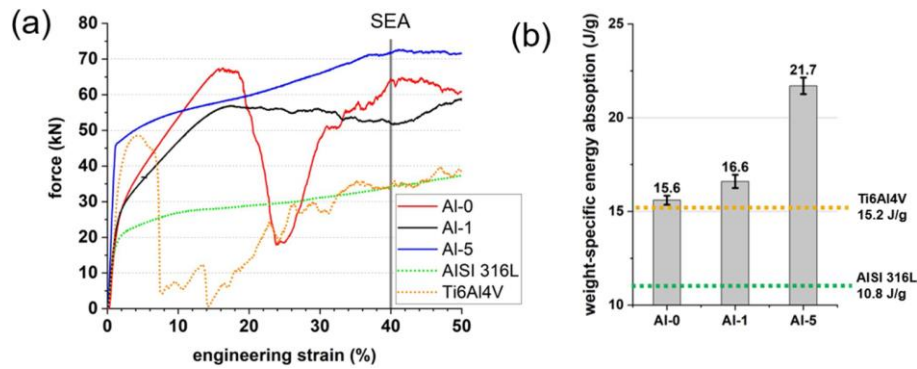


Abbildung 11: Vergleich des Energieabsorptionsverhaltens ausgewählter Hochmanganstähle (Al-0, Al-1, Al-5) mit den Referenzwerkstoffen Stahl AISI 316L und der Titanlegierung Ti6Al4V anhand von Kraft-Dehnungskurven (a) und spezifischer absorbierter Energie (b).

2.2 Aluminiumlegierungen

Die für die AM-gerechten Aluminiumlegierungen identifizierte Anwendung lag im Bereich hochfester Leichtbaustrukturen. Demnach wurde bei der Auswahl des Legierungssystems insbesondere eine hohe Festigkeit bei guter Bruchdehnung avisiert. Weiterhin wurde beim Legierungsscreening die Möglichkeit zur Ausscheidungshärtung, die Unterdrückung der Erstarrungsrissbildung während der AM-Verarbeitung als auch die Vermeidung der Zugabe von Scandium als kritisches Legierungselement berücksichtigt. Demnach wurde das System Al-Mg-Ti-Zr und speziell die Legierung Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti (Gew.-%) als vielversprechend identifiziert.

Abbildung 12 zeigt die Mikrostruktur der Legierung Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti im additiv gefertigten Zustand (selektives Laserschmelzen). Die Zugaben von Zirkon und Titan bewirken zu Beginn der Erstarrung die Bildung feinkörniger Bereiche an den Schmelzbadgrenzen. Hierfür sind primäre Al_3Zr/Ti -Partikel verantwortlich, die als Keimbildungsstellen für Aluminiummischkristallkörner wirken. Mit zunehmender Erstarrungsgeschwindigkeit vom Schmelzbadrand zum -inneren wird die Bildung der Al_3Zr/Ti -Partikel weitestgehend unterdrückt und die Aluminiummischkristallkörner wachsen kolumnar mit höherer Korngröße. Demnach bilden sich durch den schichtweisen Materialauftrag abwechselnde Bereiche sehr feiner und größerer Körner aus. Hierdurch wird weiterhin epitaxiales Wachstum großer kolumnarer Körner über mehrere aufgetragenen Schichten und somit die Bildung von Erstarrungsrissen vermieden.

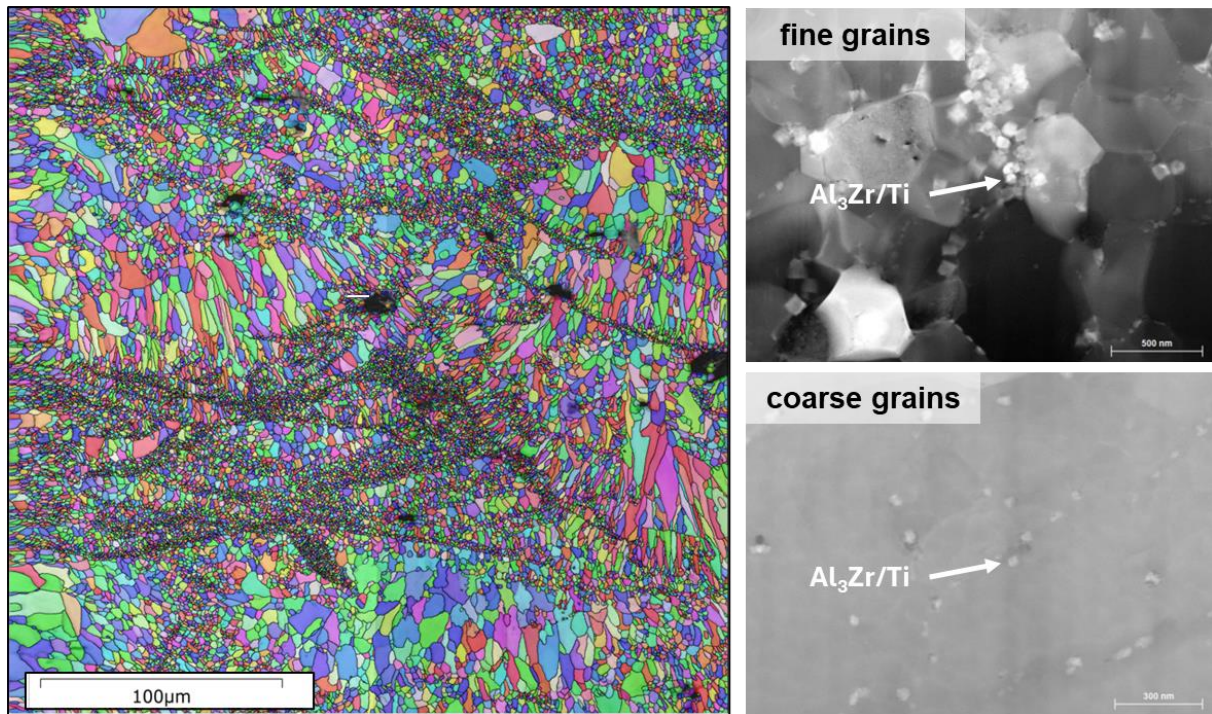


Abbildung 12: Mikrostruktur einer der entwickelten hochfesten Aluminiumlegierungen (Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti) im additiv gefertigten Zustand. Die Kornstruktur weist zusammenhängende Bereiche grober und feiner Körner auf (EBSD-Aufnahme links). Die feinkörnigen Bereiche weisen weiterhin eine hohe Dichte nanoskaliger $\text{Al}_3\text{Zr/Ti}$ -Partikel auf (Hellfeld-TEM-Aufnahme rechts oben). Die Anzahl dieser Partikel ist in den grobkörnigen Bereichen deutlich geringer (Hellfeld-TEM-Aufnahme rechts unten).

Die mechanischen Eigenschaften im einachsigen Zugversuch sind in Abbildung 13 zusammengefasst. Der hohe Anteil gelösten Magnesiums, die bereits vorhandenen $\text{Al}_3\text{Zr/Ti}$ -Partikel und die insgesamt geringe Korngröße wirken festigkeitssteigernd. Durch nachfolgende Wärmebehandlung bei 375/400 °C wird die Dichte feiner $\text{Al}_3\text{Zr/Ti}$ -Ausscheidungen weiter erhöht und somit die Festigkeit gesteigert (siehe Zustände *Heat Treated* in Abb. 13). Neben dem Übertreffen der Zielkriterien (Tabelle 1) konnten die im Projekt entwickelten Sc-freien Legierungen die Eigenschaften einer Sc-haltigen, kommerziell verfügbaren Aluminiumlegierung (Scalmalloy®) erreichen.

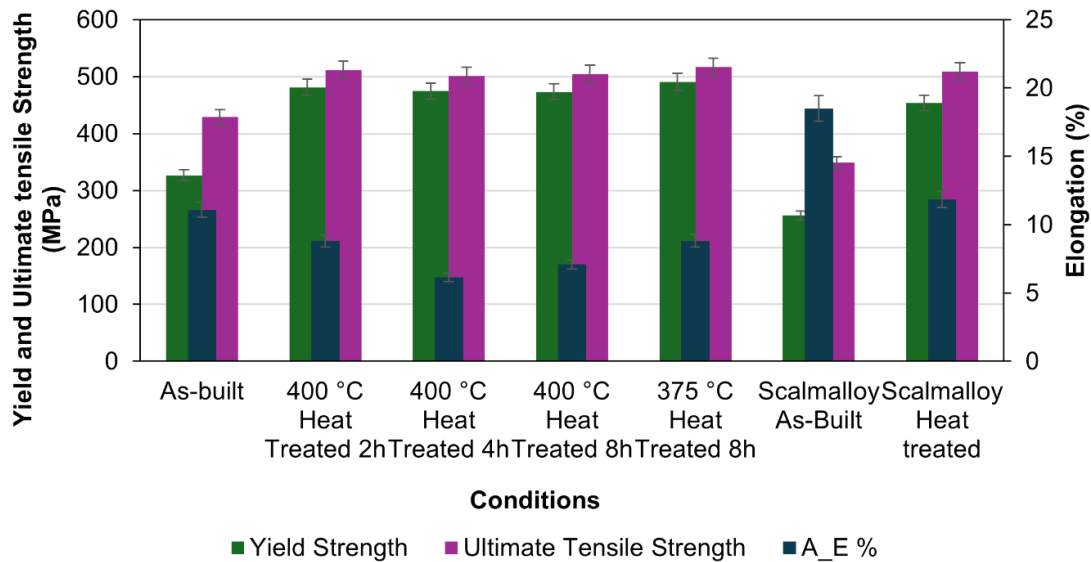


Abbildung 13: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der entwickelten hochfesten Aluminiumlegierung (Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti) mit dem kommerziell verfügbaren Referenzmaterial Scalmalloy®.

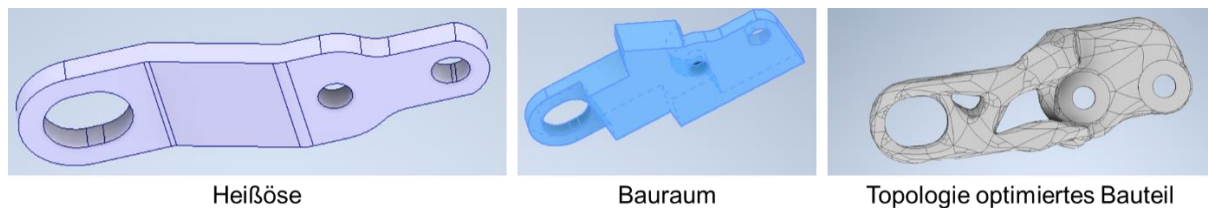


Abbildung 14: CAD-Darstellung des Demonstratorbauteils Heißöse; links: konventionell hergestelltes Referenzbauteil, Mitte: Berücksichtigung der LPBF-Fertigungsbedingungen, rechts: Topologie optimiertes Bauteil.

Unter Berücksichtigung der AM-Fertigungsmöglichkeiten und -restriktionen sowie der mechanischen Eigenschaften der entwickelten Legierung wurde die Topologie des Demonstratorbauteils optimiert (Abb. 14) und das Design an die im Lastfall auftretenden Lastspitzen bei möglichst geringem Bauteilgewicht angepasst (Abb. 15). Die unterschiedlichen Varianten des Demonstratorbauteils wurden experimentell mittels selektivem Laserschmelzen gefertigt (untere Reihe in Abb. 15), optisch hinsichtlich der Maßgenauigkeit vermessen und in einer Zugvorrichtung mechanisch geprüft. Im Vergleich der mechanischen Eigenschaften der optimierten und aus der entwickelten Legierung Al-6,5Mg-0,75Zr-0,75Ti gefertigten Komponente zur Referenzkomponente (aus der Aluminiumlegierung AlSi10) zeigt sich, dass das Bauteilvolumen und -gewicht um 60% reduziert werden kann, ohne eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften (Abb. 16). Demnach eröffnet die entwickelte Aluminiumlegierung ein hohes Leichtbaupotenzial und rissfreie Fertigung.

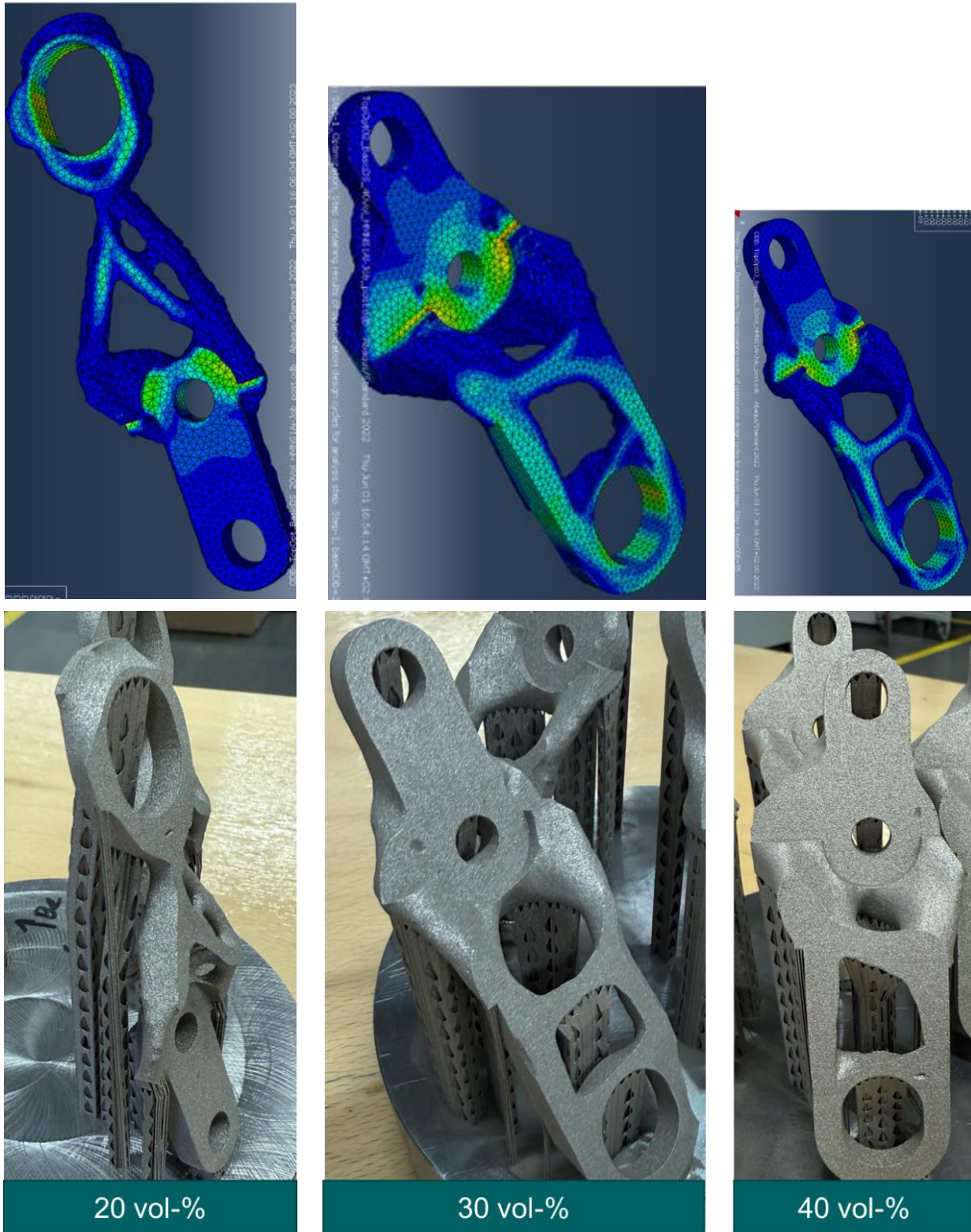


Abbildung 15: Einfluss der schrittweisen Reduzierung des Bauteilvolumens auf die Bauteilgeometrie und entstehende lokale Lastspitzen (FEM-Simulation, obere Reihe). Hergestellte Varianten des Demonstrators Heißöse mit Reduzierungen des Bauteilvolumens (untere Reihe) im Vergleich zum Bauraum der Referenzkomponente auf 20 vol-% (links), 30 vol-% (Mitte) und 40 vol-% (rechts).

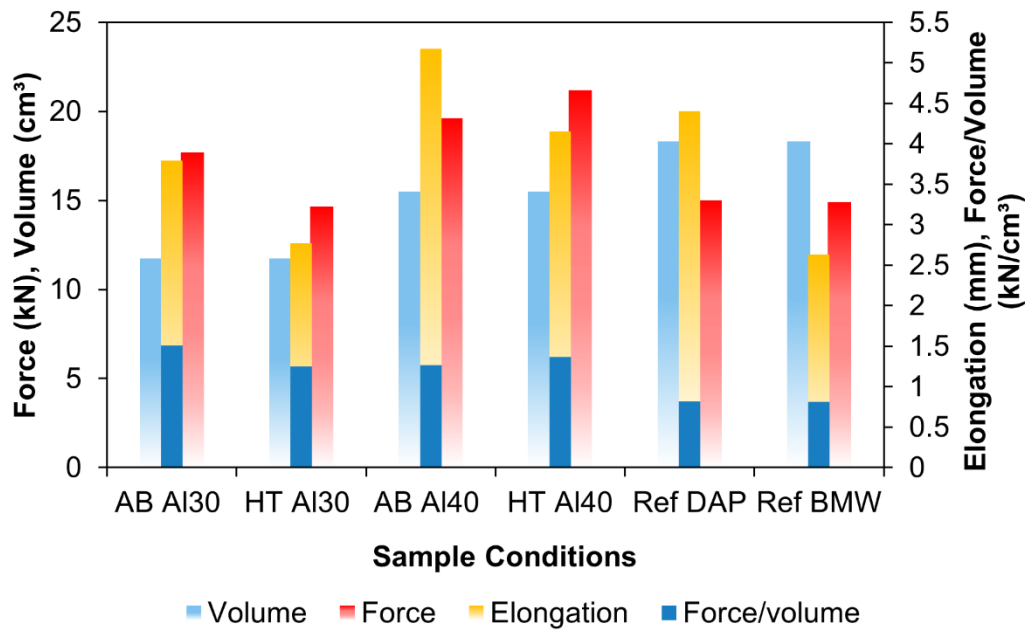


Abbildung 16: Vergleich der Leistung des Demonstrators mit der Referenzlegierung (AlSi10). AB – as built (additiv gefertigter Zustand, HT – heat treated/ausscheidungsgehärteter Zustand, Ref DAP – Referenzdesign im eigenen Labor gefertigt, Ref BMW – Referenzdesign im Labor des Industriepaten BMW gefertigt.

2.3 Hochentropielegierungen

Die für die AM-gerechten Hochentropielegierungen identifizierte Anwendung lag im Bereich thermo-mechanisch belasteter Komponenten. Demnach wurde bei der Auswahl des Legierungssystems insbesondere eine hohe Warmfestigkeit (bei 500 °C) bei guter Bruchdehnung avisiert. Ziel war es daher, eine Legierung mit zäher Matrix und der Möglichkeit zur Bildung thermisch beständiger Ausscheidungen zu entwickeln. Demnach wurde das System Al-Co-Fe-Ni als vielversprechend identifiziert. Die Basislegierung $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{25}$ (At.-%) ist einphasig fcc (kubisch flächenzentriert) und somit zäh. Die Zugabe von Aluminium ermöglicht die Bildung der hochfesten und thermisch beständigen B2 (NiAl)-Phase. Auf Basis des computergestützten Designs konnte ein maximaler Al-Gehalt von 10,5 At.-% identifiziert werden, bei dem die Legierung zunächst einphasig fcc erstarrt und dennoch das maximale Potenzial zur Ausscheidungshärtung aufweist [A6]. Durch Vermeidung der Bildung der B2-Phase während der Erstarrung konnte Rissbildung vermieden werden.

Ein weiterer Aspekt der Hochentropielegierungsentwicklung beinhaltete das Ausnutzen erstarrungsbedingter Mikrostrukturheterogenitäten, insbesondere lokale chemische Gradienten aufgrund von Elementseigerung. Die grundlegende Idee liegt darin, dass durch Anreicherung der Restschmelze während der Erstarrung mit Nickel und Aluminium die

interdendritischen Bereiche eine höhere Triebkraft für die Bildung der B2-Phase aufweisen. Bei den im selektiven Laserschmelzen hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten werden die interdendritischen Bereiche fein in der Mikrostruktur verteilt. Bei direkter Auslagerung kann somit eine ebenfalls feine Verteilung der B2-Ausscheidungen erreicht und auf eine Lösungsglühung bei hohen Temperaturen und langen Glühdauern verzichtet werden.

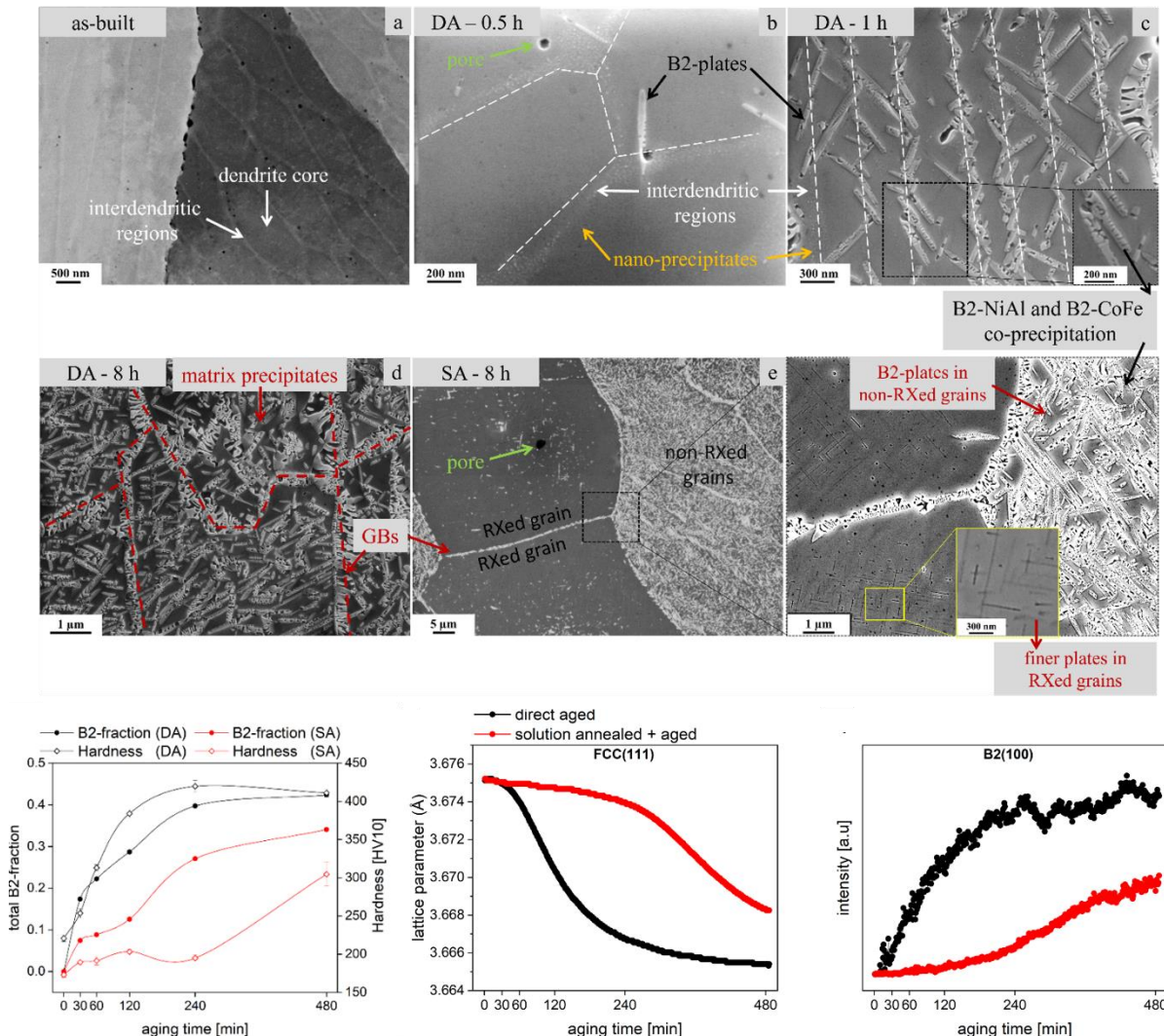


Abbildung 17: Post-mortem Rasterelektronenmikroskopie- (obere und mittlere Reihe) und in-situ SYXRD-Charakterisierung (untere Reihe) der mikrostrukturellen Veränderungen in unterschiedlichen Behandlungszuständen. As-built – additiv gefertigt ohne Wärmebehandlung, DA – direct aged (ausgelagert ohne vorherige Lösungsglühung), SA – solution-annealed + aged (ausgelagert mit vorheriger Lösungsglühung bei 1250 °C). Auslagerungstemperatur = 700 °C bei variierender Glühtemperatur.

Abbildung 17 zeigt die Mikrostruktur der Hochentropielegierung $\text{Al}_{10.5}\text{Co}_{25}\text{Fe}_{39.5}\text{Ni}_{25}$ (At.-%) im additiv gefertigten Zustand sowie deren Entwicklung während der Wärmebehandlung. Im additiv gefertigten Zustand ist die Legierung einphasig fcc und zeigt eine Anreicherung von Aluminium und Nickel in den interdendritischen Bereichen. Diese sind außerdem mit einer hohen Versetzungsdichte belegt. Bei anschließender direkter Auslagerung bei 700 °C (ohne

Lösungsglühung) bilden sich bereits nach 30 min nanoskalige B2-Partikel, deren Volumenanteil und Größe mit höherer Glühdauer zunehmen. Dies hat einen signifikanten Einfluss auf die Härte des Werkstoffs. Im Vergleich dazu weist der SA-Zustand (ausgelagert bei 700 °C mit vorheriger Lösungsglühung bei 1250 °C für 6 h) eine deutlich trägere Ausscheidungskinetik auf, was zu einem niedrigeren B2-Phasenanteil und einer geringeren Härte führt (vgl. z.B. die Zustände DA – 8h und SA – 8h).

Die resultierenden mechanischen Eigenschaften im Zugversuch sind in Abbildung 18 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die direkte Auslagerungsglühung zu einer erheblichen Festigkeitssteigerung führt, was auf den hohen B2-Phasenanteil zurückzuführen ist. Aufgrund der zähen fcc-Matrix verbleibt eine ausreichende Bruchdehnung > 10%. Im Zugversuch bei 500 °C konnte ebenfalls eine hohe thermische Stabilität der Festigkeit (aufgrund der Stabilität der B2-Phasenausscheidungen) nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 1). Demnach konnte einerseits die Warmfestigkeit im Vergleich zum Referenzwerkstoff (Warmarbeitsstahl) um mehr als 150% gesteigert werden. Andererseits zeigt das Konzept der gezielten Einstellung der Mikrostruktur über Legierungsdesign und Prozessführung über AM und direkte Ausscheidungsglühung ein hohes Potenzial zur Energieminimierung. So kann die energieintensive Lösungsglühung (1250 °C für 6 h) eingespart werden, was im Projekt für mehrere Legierungssysteme gezeigt werden konnte [A7, A8].

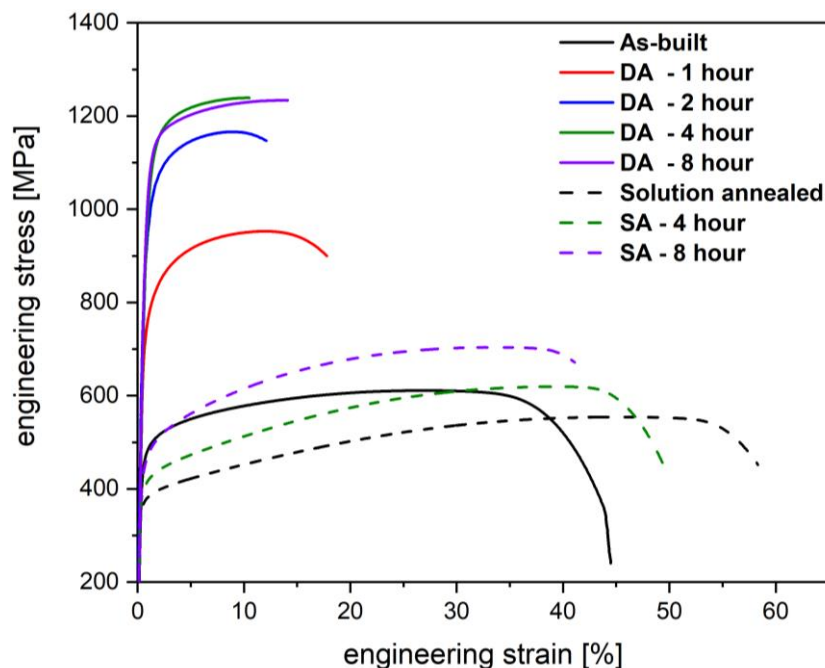


Abbildung 18: Technische Spannungs-Dehnungs-Kurven der entwickelten Hochentropielegierung im additiv gefertigten (as-built) und wärmebehandelten (DA, SA) Zustand. Die Zugrichtung (TD) war parallel zur Aufbaurichtung (TD // BD) [A7].

Die entwickelte Hochentropielegierung wurde anschließend hinsichtlich der Abhängigkeit der Mikrostruktur und Härte von den Bauteildimensionen untersucht (Abb. 19). Dabei zeigte sich, dass sehr geringe Wandstärken (< 1 mm) zu einer feinkörnigen, äquiaxialen Kornstruktur führen. Bei Abmessungen > 1 mm unterliegen die resultierenden Mikrostrukturen und Härtewerte deutlich geringeren Schwankungen. Diese Variationen müssen beim Übertrag auf Komponenten berücksichtigt werden, wie dies am Beispiel des Demonstratorbauteils (Turboladerlaufrad) in Abbildung 20 veranschaulicht ist.

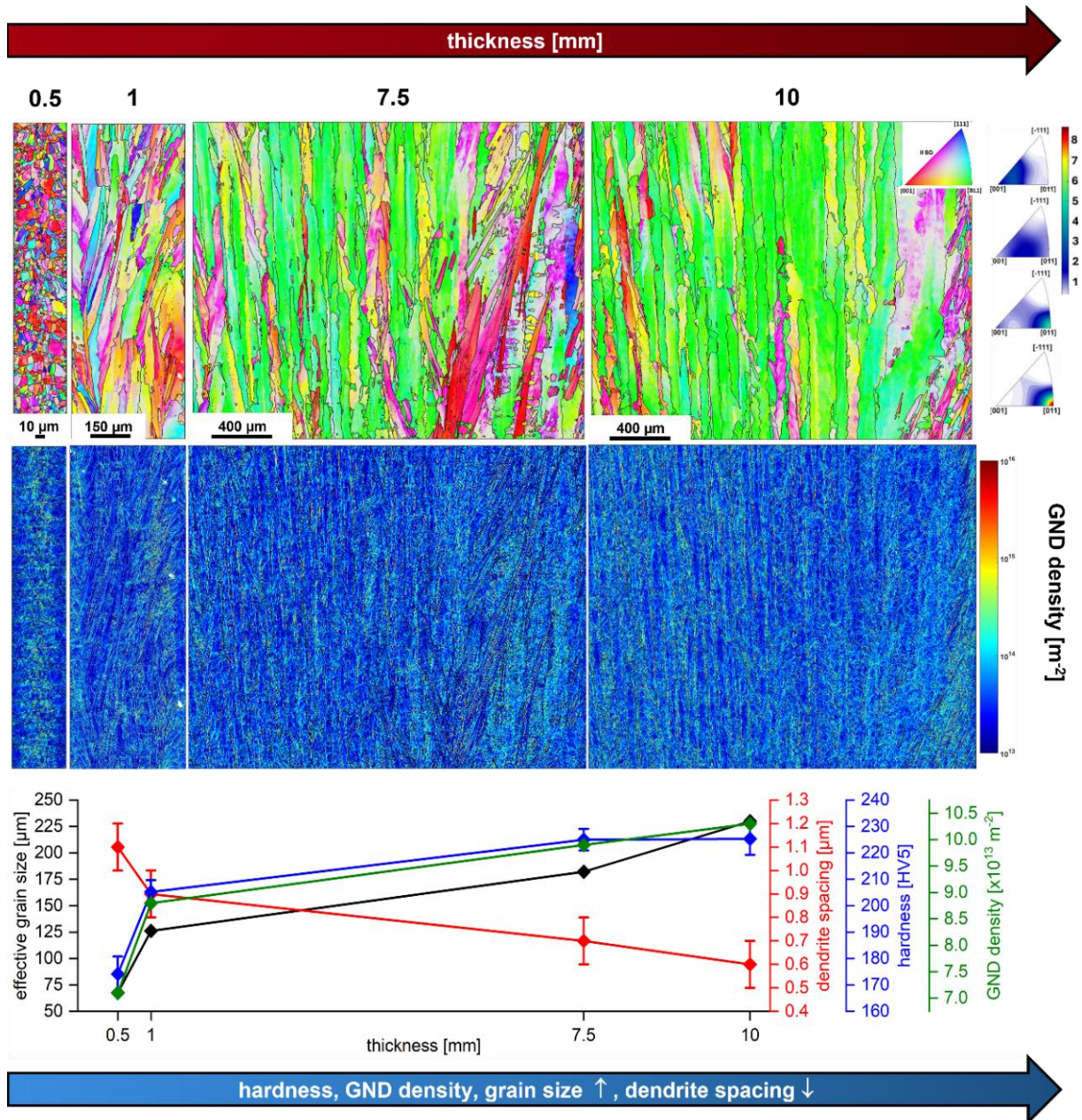


Abbildung 19: Einfluss der Bauteildimensionen auf die Mikrostruktur und Härte der entwickelten Hochentropielegierung. GND density – Dichte geometrisch notwendiger Versetzungen



Abbildung 20: Additiv gefertigte Turboladerlaufräder aus der entwickelten Hochentropielegierung.

3. Wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften

Aus dem Projekt MatAM hervorgegangene und im Bericht referenzierte Publikationen

- [A1] Motaman S., Kies F., Köhnen F., Létang M., Lin A., Molotnikov A., Haase C. (2020): Optimal design for metal additive manufacturing: An integrated computational materials engineering (ICME) approach. *JOM*, vol. 72, 1092-1104.
- [A2] Köhnen P., Ewald S., Schleifenbaum J. H., Belyakov A., Haase C. (2020): Controlling microstructure and mechanical properties of additively manufactured high-strength steels by tailored solidification. *Additive Manufacturing*, vol. 35, 101389.
- [A3] Motaman S., Haase C. (2021): The microstructural effects on mechanical properties of polycrystals: A comparative experimental-numerical study on conventionally and additively manufactured metallic materials. *International Journal of Plasticity*, vol. 140, 102941.
- [A4] Hariharan A., Ackermann M., Koß S., Khosravani A., Köhnen P., Kalidindi S. R., Haase C. (2025): High-speed 3D printing coupled with machine learning to accelerate alloy development for additive manufacturing. *Science Advances*, vol. 12, 2414880.
- [A5] Ackermann M., Haase C. (2023): Machine learning-based identification of interpretable process-structure linkages in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, vol. 71, 103585.
- [A6] Turnali A., Kibaroglu D., Evers N., Gehlmann J., Sayk L., Peter N. J., Elsayed A., Noori M., Allam T., Schleifenbaum J. H., Haase C. (2025): Segregation-guided microstructure design of alloys via tailored solidification behavior. *Materials Today Advances*, vol. 25, 100549.
- [A7] Turnali A., Hariharan A., Polatidis E., Peter N. J., Gehlmann J., Sofras C., Hegedüs Z., Sayk L., Allam T., Schleifenbaum J. H., Haase C. (2025): Harnessing additive manufacturing-induced microstructure and solute heterogeneities for the design of precipitation-strengthened alloys. *Acta Materialia*, 121423.
- [A8] Turnali A., Motaman S., Chang Y., Serafeim A., Sayk L., Peter N. J., Richter S., Höges S., Haase C. (2023): Evolution of microstructural heterogeneities in additively manufactured low-alloy steel. *Additive Manufacturing*, vol. 78, 103859.

Weitere aus dem Projekt MatAM hervorgegangene Publikationen

- [A9] Stich P., Apel M., Megahed M., Bautmans L., Barriobero Vila P., Hans M., Weirich T., Büßenschütt K., Haase C. (2025): A combined experimental and numerical assessment of the role of microsegregation and phase formation on hot cracking susceptibility in PBF-LB/M processed CM247LC. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 37, 671-686.

- [A10] Narayana Samy V. P., Brasche F., Yan F., Šulák I., Bezci B., Nowak B., Berglund I., Krupp U., Haase C. (2024): Understanding the high-temperature deformation behavior of additively manufactured γ' -forming Ni-based alloys by microstructure heterogeneities-integrated creep modelling. *Additive Manufacturing*, vol. 88, 104256.
- [A11] Narayana Samy V. P., Brasche F., Šulák I., Verma B., Nowak B., Chlup Z., Záležák T., Schleifenbaum J. H., Krupp U., Haase C. (2024): The influence of microstructural heterogeneities on high-temperature mechanical properties of additively manufactured γ' -forming Ni-based alloys. *Additive Manufacturing*, vol. 88, 104267.
- [A12] Büßenschütt K., Köhnen P., Kies F., Koß S., Schleifenbaum J. H., Haase C. (2024): High-speed direct energy deposition as a high-throughput design tool for laser-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing Letters*, vol. 8, 100188.
- [A13] Murugesan S., Sayk L., Gehlmann J., Haase C. (2024): Zr-Ti modified high strength Al-Mg aluminum alloy with heterogeneous microstructure specifically developed for laser powder bed fusion process. *Proceedings of the International Conference on Aluminum Alloys (ICAA) 19*, Atlanta, USA.
- [A14] Narayana Samy V. P., Schäfle M., Brasche F., Krupp U., Haase C. (2023): Understanding the mechanism of columnar-to-equiaxed transition and grain refinement in additively manufactured steel during laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, vol. 73, 103702.
- [A15] Busi M., Polatidis E., Samothrakitis S., Köhnen P., Malamud F., Haase C., Strobl M. (2023): 3D characterization of magnetic phases through neutron polarization contrast tomography. *Additive Manufacturing Letters*, vol. 6, 100155.
- [A16] Elsayed A., Haase C., Krupp U. (2023): Additive manufacturing of metal matrix nanocomposites: Novel approach for nanoparticles dispersion by electromagnetic three-dimensional vibration. *Materials Letters*, vol. 344, 134399.
- [A17] Kumara S. N., Sahoo S. K., Haase C., Barrales-Mora L. A., Toth L. S. (2023): Nano-structuring of a high entropy alloy by severe plastic deformation: Experiments and crystal plasticity simulations. *Acta Materialia*, vol. 250, 118814.
- [A18] Chang Y., Haase C., Szeliga D., Madej L., Hangen U., Pietrzyk M., Bleck W. (2021): Compositional heterogeneity in multiphase steels: Characterization and influence on local properties. *Materials Science and Engineering A*, vol. 827, 142078.
- [A19] Klubakov A., Haase C., Allam T., Sparrer Y., Pütz R. D., Krupp U., Münstermann S., Zander D., Springer H. (2021): Metallurgical gradients in structural materials: Potential and challenges in creating artificial segregations in medium manganese steel via roll-bonding. *Steel Research International*, vol. 92(9), 202100429.
- [A20] Bambach M., Sizova I., Kies F., Haase C. (2021): Directed energy deposition of Inconel 718 powder, cold and hot wire using a six-beam direct diode laser set-up. *Additive Manufacturing*, vol. 47, 102269.
- [A21] Ahsan Md. R. U., Seob G.-J., Fan X., Lee K.-S., Liaw P. K., Motaman S., Haase C., Kim D. B. (2021): Effects of process parameters on bead shape, microstructure, and mechanical properties in wire + arc additive manufacturing of Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, 1314-1327.
- [A22] Ewald S., Köhnen P., Ziegler S., Haase C., Schleifenbaum J. H. (2021): Precise control of microstructure and mechanical properties of additively manufactured steels using elemental carbon powder. *Materials Letters*, vol. 295, 129788.
- [A23] Chang Y., Lin M., Hangen U., Richter S., Haase C., Bleck W. (2021): Revealing the relation between microstructural heterogeneities and local mechanical properties of complex-phase steel by correlative electron microscopy and nanoindentation characterization. *Materials & Design*, vol. 203, 109620.

[A24] Allam T., Pradeep K. G., Köhnen P., Marshal A., Schleifenbaum J. H., Haase C. (2020): Tailoring the nanostructure of selective laser melted maraging steel. Additive Manufacturing, vol. 36, 101561.

4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen beinhalteten Personalkosten, Verbrauchsmaterial und Dienstreisen.

Die Personalmittel wurden im Wesentlichen für den Aufbau und die Finanzierung der Nachwuchsgruppe bestehend aus DoktorandInnen und PostdoktorandInnen der Fachbereiche Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Produktionstechnik, Mechanik sowie Computational Materials Science verwendet. Hierdurch konnten die interdisziplinären Fragestellungen des Vorhabens MatAM beantwortet werden. Die wissenschaftlichen Mitarbeitenden wurden durch studentische HilfswissenschaftlerInnen und technisches Personal unterstützt.

Aufgrund des hohen Umfangs experimenteller Arbeiten wurden insbesondere Mittel für Verbrauchsmaterialien für additive Fertigungsprozesse, dafür notwendige Pulverwerkstoffe, für die Nachbehandlung und Präparation der gefertigten Probenkörper sowie für Werkstoffcharakterisierungsmethoden verausgabt.

Weiterhin wurden die beantragten Mittel für Dienstreisen für die Teilnahme der wissenschaftlichen Mitarbeitenden der Nachwuchsgruppe an nationalen und internationalen Konferenzen, Messen, Projekttreffen mit den beteiligten Industriepaten sowie Netzwerktreffen des Förderprogramms genutzt.

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Vorhaben MatAM verfolgte zwei ambitionierte Ziele. Einerseits die Erarbeitung einer Methodik zur schnellen und robusten Legierungsentwicklung für laserbasierte additive Fertigungsprozesse. Andererseits sollte diese Methodik angewendet werden, um neue Legierungen für drei unterschiedliche Anwendungsszenarien zu entwickeln und zu erproben. Diese Ziele wurden vollumfänglich erreicht. Hierzu waren umfangreiche Arbeiten in den Bereichen Komponentendesign, computergestützte Legierungsentwicklung, additive Fertigung samt Probenherstellung, Werkstoffcharakterisierung und Übertrag auf Demonstratoren notwendig.

Die interdisziplinäre Expertise der Projektmitarbeitenden erlaubte es, modernste Methoden der Hochdurchsatzprobenherstellung und -charakterisierung, Prozess- und Werkstoffsimulation und des maschinellen Lernens zu einem gesamtheitlichen Designansatz zu verknüpfen. Die neu entwickelten Legierungen (Stahl, Aluminiumlegierung, Hochentropielegierung) übertrafen die Eigenschaften der Referenzwerkstoffe deutlich (siehe Tabelle 1), konnten mittels additiver Fertigungsverfahren defektfrei verarbeitet werden und steigerten die Leistungsfähigkeit der betrachteten Demonstratoren.

Die geleisteten Projektarbeiten waren daher sowohl zum Erreichen der Projektziele notwendig und angemessen als auch überaus erfolgreich. Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden in die akademische Lehre und Weiterbildungsprogramme integriert. Darüber hinaus erfolgte die Verbreitung durch Fachvorträge, hochrangige Publikationen in Fachzeitschriften und weitere Öffentlichkeitsarbeit.

6. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Akademische Verwertung: Die im Vorhaben MatAM gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Ergebnisse sind in der Vergangenheit und werden in der näheren Zukunft in Bildungs- und Weiterbildungsaktivitäten integriert. Die aus dem Projekt hervorgegangenen Publikationen in Fachzeitschriften sind unter Punkt 3 aufgeführt.

Öffentlich-geförderte Drittmittelprojekte: Die erzielten Ergebnisse dienen bereits während der Projektlaufzeit als auch im Anschluss daran als Grundlage für weitere öffentlich-geförderte Drittmittelprojekte. Die grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der entwickelten Legierungen erfolgt derzeit in mehreren Projekten, die über die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert werden. Die entwickelten Methoden zur Legierungsentwicklung für die additive Fertigung sind wesentlicher Bestandteil eines laufenden europäischen Forschungsprojekts (ERC StG) und sollen weiterhin in anwendungs-orientierte Forschungsprojekte integriert werden. Dabei erfolgt der Transfer der Erkenntnisse, u.a. auf weitere additive Fertigungsprozesse sowie andere Legierungssysteme.

Industrielle Verwertung: Im Zuge des Vorhabens und darüber hinaus wurden gemeinsame Transferaktivitäten der Projektergebnisse initiiert. So wurden z.B. mit einem der Industriepaten innovative Prozess- und Laserstrahlformungskonzepte für die Verarbeitung der neu entwickelten Legierungen erarbeitet und umgesetzt. Weiterhin wird die Kommerzialisierung der Legierungskonzepte geprüft. Eine Patentanmeldung wurde eingereicht. Im Bereich des Wissensübertrags und der Ausbildung kann festgestellt werden, dass mehrere Projektmitarbeitende einen Wechsel in Industrieunternehmen mit Bezug zur additiven Fertigung vollzogen haben.

7. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Gebiet der additiven Fertigung metallischer Komponenten hat sich seit Projektbeginn rasant weiterentwickelt. Neben der Weiterentwicklung der Anlagentechnik, die nicht im Mittelpunkt des Projektvorhabens stand, sind zahlreiche Legierungen als kommerziell verfügbare Pulverwerkstoffe entwickelt worden. Beispiele hierzu beinhalten neue Aluminiumlegierungen der nordamerikanischen Firma NanoAl (Addalloy® Powders) sowie Nickelbasislegierungen der deutschen Firma Electro Optical Systems (EOS) GmbH. Im Bereich öffentlich-geförderter Drittmittelprojekte zur Entwicklung neuer metallischer Werkstoffe für die Verarbeitung mittels additiver Fertigungsverfahren ist ebenfalls weiterhin eine hohe Aktivität zu verzeichnen.

Ebenfalls stark zugenommen hat die Weiter- und Neuentwicklung computergestützter Designansätze, sowohl im Bereich der numerischen Simulation als auch im Bereich des maschinellen Lernens. Hervorzuheben sind Prozessüberwachungssysteme, die in Verbindung mit KI-gestützter Echtzeitdatenauswertung eine Anpassung der Prozessparameter, z.B. zur Defektvermeidung, erlauben. Kommerzielle Lösungen für die Simulation thermischer Prozesse und des Werkstoffverhaltens während der additiven Fertigung finden sich in den meistens etablierten Softwarepaketen als eigene additive Fertigungsmodule.