

Projektplan

LaSaM: Laser-Strahlschmelzen amorpher Metallpulver – Entwicklung einer synergetischen Wertschöpfungskette durch Prozessoptimierung (21227 N)

Metallische Massivgläser (engl.: Bulk Metallic Glasses, kurz: *BMGs*), auch amorphe Metalle genannt, gehören zu den vielversprechendsten und innovativsten Werkstoffentwicklungen des letzten Jahrhunderts. Im Gegensatz zum Gros der bisher industriell genutzten metallischen Werkstoffe verfügen *BMGs* nicht über eine regelmäßige atomare Anordnung in Form eines Kristallgitters. Stattdessen sind die Atome, einer Flüssigkeit entsprechend, ohne weitreichende Ordnung verteilt. Aufgrund dieser amorphen Mikrostruktur weisen solche Legierungssysteme mechanische Eigenschaften auf, welche die Elastizität von Kunststoffen mit der Festigkeit, Härte und Verschleißbeständigkeit herkömmlicher Metalle vereinen und teilweise übertreffen. Um ein metallisches Glas aus der flüssigen Schmelze herzustellen muss diese rasch abgekühlt werden. Zu geringe Abkühlgeschwindigkeiten führen zu Kristallisation und damit zum Verlust der wünschenswerten Eigenschaften. Dies limitiert die durch klassische Gussverfahren umsetzbare Bauteilgröße und -komplexität. Daher werden *BMGs* bis heute nur in Nischenanwendungen industriell genutzt. Beim pulverbettbasiertem Laserschmelzen (engl.: Laser Powder Bed Fusion kurz: *LPBF*) entstehen prozessinhärent, durch die verhältnismäßig kleinen Schmelzbäder und hohen thermischen Gradienten, Abkühlraten von 10^3 - 10^6 K/s. Zusammen mit dem schichtweisen Aufbau und dem selektiven Energieeinträgen können die lokalen Abkühlraten weiterhin weitestgehend von der Bauteilgröße entkoppelt werden. Das *LPBF*-Verfahren ermöglicht somit die Überwindung der bisherigen fertigungstechnischen Restriktionen und birgt damit großes Potenzial, das Anwendungsspektrum metallischer Gläser zu erweitern. Im *LaSaM*-Vorgängerprojekt *OptMetGlas* konnte bereits die Herstellung defektarmer amorpher Strukturen und Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften durch erste Material- und Prozessoptimierungen umgesetzt werden. Jedoch zeigte sich, dass Einflussgrößen entlang der gesamten Prozesskette, von der chemischen Legierungszusammensetzung, den Pulvereigenschaften bis hin zum *LPBF*-Prozess elementaren Einfluss auf die erreichbare mechanisch-technologische Bauteilperformance und Prozessstabilität haben.

Forschungsziel

Das übergeordnete Projektziel ist ein verlässliches industrielles Herstellungsverfahren für hochwertige amorphe Metall-Produkte mit bauteilspezifischer mechanischer Performance zu etablieren. Dazu gilt es ein grundlegendes Verständnis über die wechselseitigen Einflüsse zwischen den Eigenschaften des verwendeten Pulvers und der *LPBF*-Prozessführung aufzubauen. In dem geplanten Vorhaben wird dazu erstmals eine ganzheitliche Betrachtung der vollständigen Prozesskette durchgeführt. Dies beginnt bei den Rohmaterialien, über die Legierungsauswahl und -synthese, die Verdüsung zum Pulver, bis hin zur additiven Fertigung von Bauteilen und deren Evaluierung. In diesem Zusammenhang sollen anhand eines Modell-Legierungssystems (*CuTi*-basiert) die chemische Zusammensetzung, der Zerstäubungs- sowie der *LPBF*-Prozess optimiert und aufeinander abgestimmt werden. Diese umfassende Betrachtung zielt darauf ab, technische und

wirtschaftliche Potenziale innerhalb der Verarbeitung metallischer Gläser auszuschöpfen und Synergieeffekte zu kreieren. So steht die Verwertbarkeit der Technologie in der industriellen Anwendung im Mittelpunkt des Vorhabens. Daher ist es nicht das primäre Ziel, aufwändige und kostenintensive Prototypen unter Laborbedingungen herzustellen. Stattdessen soll eine sinnvolle Balance gefunden werden zwischen den Herstellungskosten und den technologischen Eigenschaften der Produkte. Unter diesen Gesichtspunkten sollen tolerierbare Grenzwerte ermittelt werden, welche eine gesteigerte Ausbringung mit hoher mechanischer Belastbarkeit vereinbaren. So sollen Handlungsempfehlungen für potenzielle Anwender formuliert werden, welche eine wissensbasierte Prozessauslegung in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie ermöglichen. Die zur Verfügung gestellten Projektergebnisse ermöglichen es, zielorientiert Produktpaletten und Anforderungen aufeinander abzustimmen und damit CuTi-basierte amorphe Legierungen auf dem Markt zu etablieren. Neben diesem direkten Ergebnis kann das Vorhaben als Pilotprojekt betrachtet werden, welches exemplarisch für die Qualifizierung anderer amorpher Legierungsklassen, beispielsweise auf Basis von Eisen oder Titan, für die Anwendung im LPBF-Prozess dienen kann.

Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

In bisherigen AiF-Projekten wurden bereits die Pulverherstellung (Amorphe Pulver II, 19291 N) als auch das LPBF-Verfahren (OptMetGlas, 19927 N) durch die Antragssteller beleuchtet. Es gilt nun, die bisher erlangten grundsätzlichen Erkenntnisse zur Herstellung amorpher Pulver auf die additive Fertigung zu adaptieren und die Wechselwirkungen zwischen chemischer Zusammensetzung, Zerstäubung und LPBF-Prozess zu erforschen. Als Ausgangssystem wird die Legierung $\text{Cu}_{47}\text{Ti}_{34}\text{Ni}_8\text{Zr}_{11}$ (Vit101) gewählt. Die Legierungssynthese aus Rohelementen erfolgt am LMW Saarbrücken auf schmelzmetallurgischem Wege. Das fertiglegierte Material wird darauffolgend am IWT Bremen zu Pulver zerstäubt, fraktioniert und hinsichtlich morphologischer Beschaffenheit charakterisiert. Mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie und Kalorimetrie werden die verschiedenen Pulverfraktionen am LMW Saarbrücken hinsichtlich ihrer mikrostrukturellen und thermophysikalischen Eigenschaften analysiert. Dabei ist vor allem das neuartige Verfahren der Flash-Kalorimetrie (FDSC) hervorzuheben, welches am LMW durch die Anschaffung einer entsprechenden Anlage angewendet werden kann. Diese Technik ermöglicht es, die sowohl bei der Pulverherstellung als auch beim LPBF auftretenden sehr schnellen Temperaturänderungen zu reproduzieren und dabei ablaufende thermophysikalische Prozesse zu analysieren. So kann beispielsweise das Kristallisationsverhalten von verdüstem Pulver in Abhängigkeit von Prozessparametern, chemischer Zusammensetzung und Pulvermorphologie nachverfolgt und modelliert werden. Zeitgleich zur Pulvercharakterisierung am LMW erfolgen am IPE FT Duisburg Untersuchungen zum Prozessverhalten der Pulver im LPBF-Verfahren. Neben der Ermittlung der Fließfähigkeit des Pulvers werden auch geeignete Prozessfenster, welche eine defektfreie Verarbeitung ermöglichen, bestimmt. Die gewonnenen Informationen

werden rückkoppelnd zur anforderungsgerechten Optimierung des Verdünnungsprozesses genutzt. Zielgrößen sind insbesondere die Sphärizität und Partikelgrößenverteilung des Pulvers, da diese einen entscheidenden Einfluss auf den nutzbaren Anteil und das Prozessverhalten im Hinblick auf den Schichtauftrag und damit auf Defekte wie Porositäten, bis hin zu Prozessabbrüchen haben. Zur Analyse der thermodynamischen Randbedingungen im LPBF-Prozess wird anhand empirischer und modellgestützter Methodik die Temperatur zeitlich und örtlich in Abhängigkeit der Pulverbeschaffenheit und Prozessführung ermittelt. Gemeinsam mit den Ergebnissen aus der Flash-Kalorimetrie werden die Erkenntnisse zur gezielten Prozess- und Materialauslegung genutzt.

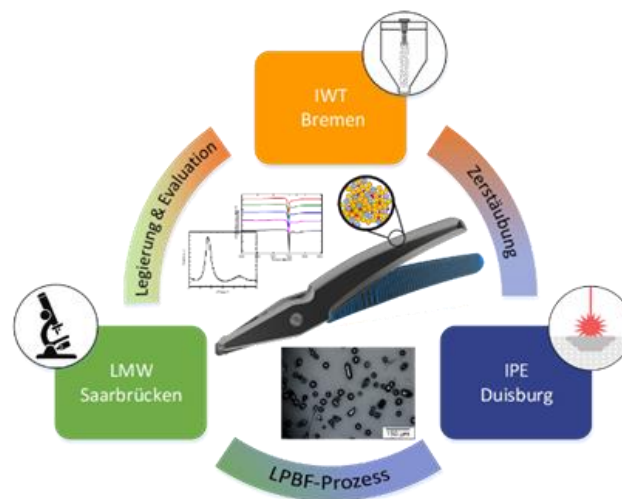


Abbildung 1: Schema der drei Hauptaspekte der Wertschöpfungskette, die vollständig von den beteiligten Forschungsstellen abgedeckt werden kann.

Der gesamte Optimierungsprozess (vergleiche Abb. 1) erfolgt für vier Legierungsvariationen (Ausgangslegierung Vit101 und drei Derivate). Die Anpassungen adressieren die Modifikation der thermischen Stabilität und damit anforderungsgerechte Beständigkeit gegen unerwünschte Kristallisation. Im Zusammenhang mit der vorab beschriebenen In-Situ-Temperaturanalyse soll der Einfluss der thermischen Stabilität auf eine defektfreie Verarbeitung des Pulvers untersucht werden und eine anforderungsgerechte Anpassung der Legierung erfolgen. Sind funktionale und wirtschaftliche Verdünnungsparameter definiert, werden größere Mengen Pulver hergestellt, additiv zu Prüfkörpern verarbeitet und am LMW hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Auf Basis technologischer und wirtschaftlicher Aspekte erfolgt die Auswahl eines Legierungsderivates, welches zur additiven Fertigung von Demonstratorbauteilen verwendet wird. Diese orientieren sich konkret an Produktdesigns der im PA befindlichen Unternehmen, unter Berücksichtigung geometrischer Mehrwerte, welche durch die additive Fertigung umgesetzt werden können. Hier gilt es, innovative Belichtungs- und Supportstrategien sowie Konzepte zur Qualitätssicherung zu entwickeln, die den Übertragungsprozess in die industrielle Fertigung verkürzen. Durch die Zusammenarbeit

des auf Pulvererzeugung spezialisierten IWT Bremen, den LPBF-Spezialisten vom IPE-FT Duisburg und der Material-Expertise des LMW Saarbrücken kann so im Zuge des Projekts die gesamte Wertschöpfungskette hin zum einsatzfähigen additiv gefertigten BMG-Bauteil abgedeckt und evaluiert werden.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Das geplante Vorhaben soll auf Basis der Erkenntnisse des Vorgängerprojekts „OptMetGlas“ und auch des Projektes „Amorphe Metallpulver II“ unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette eine Legierung und Prozessführung entwickeln, welche es ermöglicht, das Eigenschaftsprofil von gegossenen BMG-Bauteilen bei additiv gefertigten Demonstratoren abzubilden. Die Entwicklung neuer Werkstoffe für die additive Fertigung gliedert sich damit in die von der Bundesregierung definierten Handlungsfelder der „Hightech-Strategie 2025“ ein. Die Herstellung amorpher Metallbauteile im LPBF-Prozess birgt Synergieeffekte durch die Ausnutzung der verfahrensinhärenten hohen Abkühlraten bei gleichzeitiger Überwindung bisheriger Restriktionen bezüglich der Verarbeitung metallischer Gläser. Die hohe spezifische Festigkeit und Härte eignen sich insbesondere für den Markt hochfester Kleinteile und chirurgischer Werkzeuge. Die herausragenden Federeigenschaften schaffen eine Reihe von Optimierungspotenzialen für hoch belastete Federelemente oder metallischen Steck- und Schnappverbindungen. Die gestalterischen Freiheiten der additiven Fertigung ermöglicht es auch in Zusammenhang mit der sog. „Mass-Customization“ kundenspezifisch angepasste Einzelteile wirtschaftlich in Kleinserien zu fertigen. Insbesondere in Geschäftsfeldern, die üblicherweise durch KMU bedient werden, ergeben sich dadurch wirtschaftliche und technologische Mehrwerte. Die wirtschaftliche Bedeutung der Erkenntnisse prägt sich dabei in erster Linie für Pulverhersteller, Anlagenherstellern und Anwender und in der additiven Lohnfertigung aus. Bei den Pulverherstellern profitieren besonders KMU, weil sie in der Regel über Anlagengrößen verfügen, in der sich kleinere Mengen von Spezialpulvern wirtschaftlich herstellen lassen. Durch den Zugriff auf im Projekt erarbeitete Prozessparameter lässt sich die Herstellung CuTi-basierter Pulver zeitnah und mit relativ geringem Aufwand umsetzen. Die im Projekt definierten Grenzwerte und Richtlinien dienen ihnen dabei hinsichtlich der Pulverqualität als Benchmark. Der Anlagenbau im Bereich des LPBF ist eine vergleichsweise junge Branche. Der heutige Markt in diesem Segment wird u.a. von deutschen Unternehmen (EOS GmbH, SLM Solutions AG, Trumpf AG) dominiert. Anlagenhersteller können auf Basis des Vorhabens ohne erheblichen Investitionsaufwand die Anlagentechnik hinsichtlich der Anforderungen bei der Verarbeitung von BMG anpassen. Die additiven Lohnfertigung wird überwiegend von KMU ausgefüllt, die als Dienstleister tätig sind und sich auf die Fertigung von Kleinserien, Prototypen und F&E-Dienstleistungen spezialisiert haben (Toolcraft GmbH, FIT Production, Kegelmann Technik GmbH, etc.). Eine Erweiterung des Werkstoffportfolios würde zu einer merklichen Steigerung der Wettbewerbsposition führen. Eigene Forschungsarbeiten übersteigen in der Regel die verfügbaren Kapazitäten. Das beantragte Vorhaben ermöglicht die Reduzierung des wissenschaftlich-technischen Risikos und liefert einen exklusiven Einblick in

die Prozessgestaltung zur Verarbeitung von BMGs durch das LPBF-Verfahren. Gleichzeitig bietet das Projekt eine Plattform zur Vernetzung zwischen Dienstleistern und Anwendern, die erste Erfahrungen mit dem Innovationspotenzial metallischer Gläser anhand der im Projekt erarbeiteten Demonstratorgeometrien sammeln können. Ein Beispiel dafür stellt im Bereich der Medizintechnik die Herstellung hochfester Bauteile für medizintechnische Anwendungen bspw. durch die Firma Olympus Surgical GmbH dar. Weitere Anwendungsbeispiele finden sich in der Fein- und Mikromechanik sowie im Automobilbau und bei Leichtbauanwendungen. Des Weiteren eröffnet die Einbindung des neuartigen Verfahrens der Flash-Kalorimetrie neue Möglichkeiten der Qualitätssicherung und Modellierung bei den durch schnelle Temperaturänderungen bestimmten Prozessen der Pulverherstellung und des LPBF-Verfahrens. Sowohl Pulverproduzenten als auch LPBF-Dienstleister können im Rahmen des Projekts erste Erfahrungen und Eindrücke bezüglich dieser Methodik sammeln. Durch Einbeziehung des FDSC-Herstellers Mettler-Toledo in den PA können interessierte Unternehmen den direkten Kontakt suchen und so das firmeninterne Analyse-Portfolio erweitern. So können Synergien und Wettbewerbsvorteile geschaffen werden. Die beteiligten KMU können in Folge der Transfermaßnahmen die Projektergebnisse direkt nutzen, insbesondere da vom PA vorgeschlagene und am IPE-FT hergestellte Demonstratorbauteile eine direkte Integration marktfähiger Erzeugnisse in das Produktportfolio des jeweiligen Unternehmens stark erleichtern.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
3D MicroPrint GmbH <small>KMU</small>
Aconity GmbH <small>KMU</small>
Additive Works GmbH <small>KMU</small>
AMAZEMET <small>KMU</small>
Deutsche Edelstahlwerke GmbH
Fit AG <small>KMU</small>
Fraunhofer IPK
Hoeganaes AB
IFW Jena
Indutherm Erwärmungsanlagen GmbH
Fraunhofer IZFP, Lehrstuhl für Leichtbausysteme

Karl Storz SE & Co. KG
Linde GmbH
MBFZ toolcraft GmbH <small>KMU</small>
Megatherm Elektromaschinenbau GmbH <small>KMU</small>
Mettler Toledo GmbH
Nanoval GmbH <small>KMU</small>
Olympus Winter & Ibe GmbH
PX Group SA <small>KMU</small>
Richard Wolf GmbH
Rosswag GmbH <small>KMU</small>
SLM Solutions Group AG <small>KMU</small>
TLS Technik GmbH <small>KMU</small>
VAC Vacuumschmelze GmbH
Wenzler Medizintechnik GmbH <small>KMU</small>