

Abschlussbericht

zur Bekanntmachung

Richtlinie zur Förderung von Deutsch-Chinesischen Kooperationen in industriegeführten Verbundprojekten nach dem 2+2-Modell im Bereich Biomaterialien.

Verbundprojekt (Englisch): Exploration of a Novel ZnMg Alloy for Additive Manufacturing of Bioresorbable Implants with Integrated Algorithm-Based Lattice Structure

Verbundprojekt (Deutsch): Erforschung einer neuartigen ZnMg-Legierung für die additive Fertigung von bioresorbierbaren Implantaten mit integrierter algorithmenbasierter Gitterstruktur

Akronym: BioStruct

Teilvorhaben: Erforschung von neuartigen ZnMg-Legierung und Implementierung von Gitterstrukturen basierend auf Algorithmen – **LeGit**

Schlagworte zum Verbund:

Additive Manufacturing, PBF-LB/M, Prozesskette, Medizintechnik, Medizinprodukt, Implantat, Bioresorbierbar, Legierungsentwicklung, Zink, Magnesium, ZnMg, Gitterstruktur

Teilprojektleiter:

Dr.-Ing. Maximilian Voshage
RWTH Aachen University - Digital Additive Production DAP
Campus-Boulevard 73, 52074 Aachen, Germany
Tel +49 241 8040548
maximilian.voshage@dap.rwth-aachen.de
<http://www.dap.rwth-aachen.de>

Kurzbericht

Gegenstand des BioStruct-Projektes sind Untersuchungen zur additiven Verarbeitung von bio-resorbierbaren Zink-Magnesium (ZnMg)-Legierungen. Das übergeordnete Ziel ist die Herstellung lasttragender, patientenindividueller Implantate mit Degradationseigenschaften zur vollständigen Auflösung im Körper ohne Schädigung des umliegenden Gewebes. Aus den Ausgangswerkstoffen Zn und ZnX_nMg wird ein Pulvergemisch hergestellt, um laserbasiert mittels Powder Bed Fusion of Metals using a Laser Beam (PBF-LB/M), im Rahmen des Berichtes als Laser Powder Bed Fusion (LPBF) bezeichnet, Probekörper aus Zn_xMg in unterschiedlichen Zusammensetzungen herzustellen. Dazu wird zunächst die relative Bauteildichte im Querschliff anhand quaderförmiger Probekörpern ermittelt, die mit verschiedenen Verfahrensparametern hergestellt sind. Zudem werden die statischen mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften bestimmt.

Der Einfluss von Legierungszusammensetzung, Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatchabstand auf die erreichbare relative Bauteildichte, die Entstehung von Defektstrukturen und Ausbildung der Mikrostruktur werden beschrieben. Dabei werden Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Defektstrukturen und Herstellung von Probekörpern mit einer relativen Bauteildichte > 99,5% aufgezeigt. Die untersuchten ZnMg-Legierungen weisen ein untereutektisches Gefüge mit dendritisch ausgeprägten Zn-Primärphasen, hexagonaler Gitterstruktur und interdendritisch, eutektischer Zn+Mg₂Zn₁₁-Phase auf. Eine erhöhte Festigkeit bei abnehmender Duktilität wird für Zn₁Mg im Vergleich zu Zn_{0,5}Mg nachgewiesen.

Auf Basis der Untersuchungen an quaderförmigen Volumenkörpern mit 5 mm Kantenlänge werden die Abmessungen auf Scaffoldstrukturen mit einem Strebendurchmesser von 200 µm übertragen und eine Maßhaltigkeit von ± 20 µm erreicht. Aufgrund der geringen zu belichtenden Fläche sind bei Scaffoldstrukturen die Scanvektoren entsprechend verkürzt. Als Folge wird die Oberflächenrauheit vergrößert und die Maßhaltigkeit nimmt ab. Durch anschließende abrasive Nachbearbeitung kann die seitliche Flächenrauheit auf Sa = 2,85 µm verkleinert werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden Handlungsempfehlungen zur reproduzierbaren Herstellung komplexer Geometrien aus der niedrigverdampfenden ZnMg-Legierung mittels LPBF abgeleitet.

Die Prozesskette zur Fertigung von Probekörpern aus ZnMg-Legierungen umfasst die Schritte Datenaufbereitung, LPBF-Prozess mit angepasster Belichtungsstrategie und Nachbearbeitung. Die erforschte Prozesskette wird anhand eines parametrisch ausgelegten Gitter-Demonstrator für Tierversuche und eines individuellen Kieferimplantats anwendungsorientiert demonstriert.

Dabei werden durch das parametrische Design die Anforderungen an das Implantat in das patientenindividuelle Design, basierend auf der Datenbank, umgesetzt. Bspw. können die Art der Elementarzelle, der Strebendurchmesser oder die Zellgröße angepasst werden.

Eingehende Darstellung

Projektmanagement

Als Forschungseinrichtung im vorliegenden Forschungsverbund übernimmt das Institut Digital Additive Production der RWTH Aachen University (DAP) die Steuerung der wissenschaftlichen Qualitätssicherung. Dies beinhaltet unter anderem die Sicherstellung der kontinuierlichen Dokumentation der Projektergebnisse sowie die Einhaltung einer wissenschaftlichen Arbeits- und Vorgehensweise.

Erforschung einer neuen ZnMg-Vorzugslegierung für das LPBF

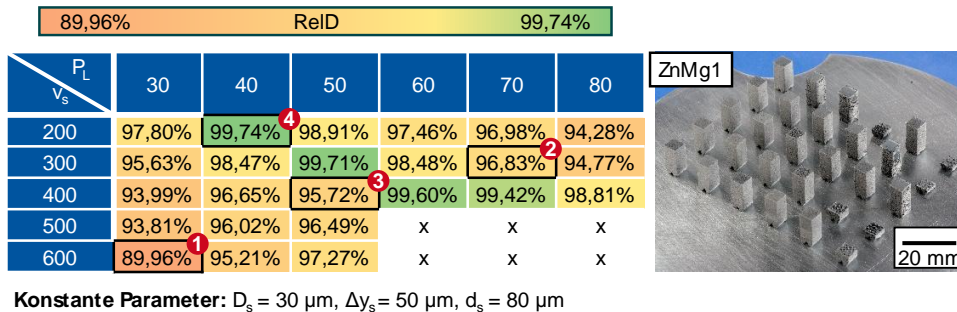
AP1.1: Verarbeitung kleiner Mengen verschiedener Pulvermischungen mittels Rapid Alloying (RA)

Bei der Erforschung einer neuartigen ZnMg-Legierung werden unterschiedliche Probengeometrien aus verschiedenen ZnMg-Legierungen additiv gefertigt und hinsichtlich relativer Bauteildichte bewertet. Anhand der Ergebnisse können geeignete Verfahrensparameter für die nachfolgenden Versuche zur Fertigung dünnwandiger Strukturen und Probekörpern zur Analyse der mechanischen Eigenschaften ausgewählt werden. Weiterhin wird für die ausgewählten Verfahrensparameter das Mikrogefüge der unterschiedlichen chem. Zusammensetzungen analysiert, um eine Vorzugslegierung im Rahmen des BioStruct Projektes auszuwählen.

Relative Bauteildichte

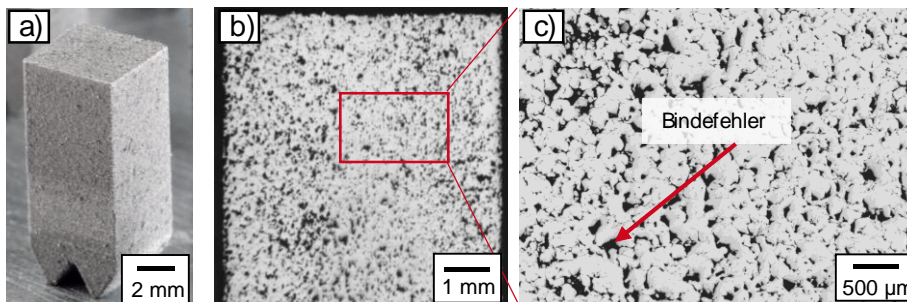
Die gefertigten kubischen Probengeometrien der Verfahrensparameterstudie werden präpariert und die relative Bauteildichte anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen gemessen. In Bild 1 sind die Ergebnisse der Messungen beispielhaft für ZnMg1 gegenüber den verwendeten Verfahrensparametern dargestellt. Die gemessenen relativen Bauteildichten liegen für ZnMg1 zwischen 89,96% und 99,74%. Die Fertigung der mit „x“ gekennzeichneten Proben ist mit den verwendeten Verfahrensparametern nicht möglich und die relative Bauteildichte dieser Proben wird nicht bestimmt. Der Unterschied in den relativen Bauteildichten resultiert aus verschiedenen Defektarten, die im Folgenden erläutert werden. Die nummerierten Proben in Bild 1 werden hierfür als Beispiele verwendet.

Bild 1: Darstellung der relativen Bauteildichte von Probegeometrien gegenüber verwendeter Verfahrensparameter am Beispiel von ZnMg1 sowie fotografische Aufnahme der Probegeometrien nach dem Prozess



Bindefehler (1): Bei einer geringen Volumenenergiedichte ($<100 \text{ J/mm}^3$) werden Bindefehler im Bauteil beobachtet. In Bild 2 sind charakteristische Bindefehler dargestellt, wie sie bei allen untersuchten Legierungen zu beobachten sind.

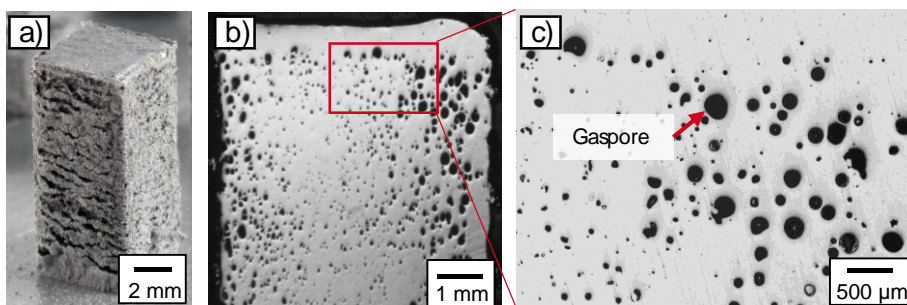
Bild 2: Fotografische (a) und lichtmikroskopische Aufnahmen von Probekörpern mit Bindefehlern am Beispiel von ZnMg1 (b,c) für $P_L = 30 \text{ W}$ und $v_s = 600 \text{ mm/s}$



Die Form von Bindefehlern ist unregelmäßig und teilweise spitz zulaufend. Hierdurch kann im Bauteil Kerbwirkung generiert, welche zu Rissanfälligkeit führt. Daher ist insbesondere das Vorkommen von Bindefehlern für das Erreichen großer mechanischer Eigenschaften zu vermeiden.

Gasporosität (2): Bei den Proben, die mit einer hohen Volumenenergiedichte ($>150 \text{ J/mm}^3$) hergestellt sind, wird durch Gasporosität eine Verringerung der relativen Bauteildichte beobachtet (Bild 3).

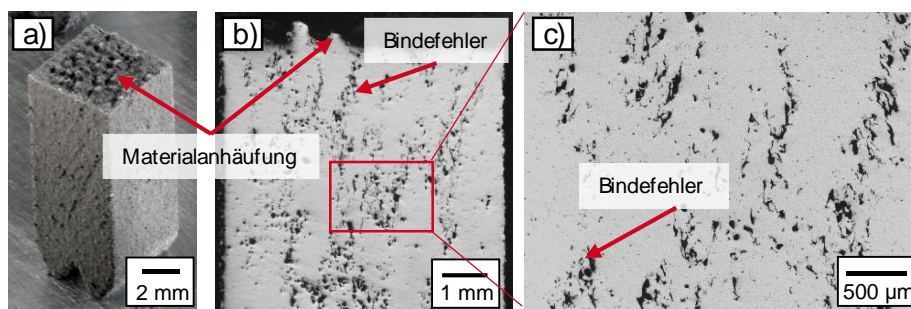
Bild 3: Fotografische (a) und lichtmikroskopische Aufnahmen (b,c) von Probekörpern mit Gasporosität am Beispiel von ZnMg1 für $P_L = 70 \text{ W}$ und $v_s = 300 \text{ mm/s}$



Gasporosität ist an charakteristischen sphärischen Defekten zu erkennen. Diese Defekte entstehen durch in der Schmelze eingeschlossenes Prozessgas, das vor der Erstarrung nicht entweichen kann und Poren bildet. Durch das Bestreben des Gases die Oberflächenenergie zu verkleinern, weisen die Poren eine sphärische Form auf. Von dieser Defektart geht aufgrund der sphärischen Form eine geringere Kerbwirkung im Gegensatz zu Bindefehlern aus. Dennoch wird der tragende Querschnitt reduziert, wodurch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden.

Unregelmäßige Schichtdicken (3): Eine weitere Auffälligkeit sind Defekte, die bei hohen Scangeschwindigkeiten in Verbindung mit hohen Laserleistungen auftreten. Bei dieser Verfahrensparameterkombination werden partielle Materialanhäufungen beobachtet, aus denen Bindefehler resultieren. Durch Fehlerfortsetzung mehrerer Schichten entstehen auf diese Weise unregelmäßige Schichtdicken auf der Bauteiloberfläche. In Bild 4 ist beispielhaft ein solcher Defekt dargestellt.

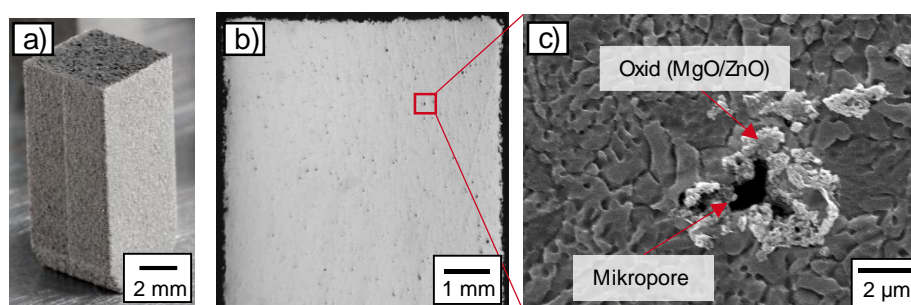
Bild 4:
Fotografische (a) und lichtmikroskopische Aufnahmen (b,c) von Defekten aufgrund unregelmäßiger Schichtdicken am Beispiel von ZnMg1 für $P_L = 50$ W und $v_s = 400$ mm/s



In einigen Fällen führen die partiellen Materialanhäufungen zu einem Prozessabbruch aufgrund einer Beschädigung der Beschichterlippe (in Bild 1 mit „x“ gekennzeichnete Proben). In jedem Fall resultieren hieraus Bindefehler im aufgebauten Gefüge. Das Vorkommen der Bindefehler ist insbesondere vor und hinter den Materialanhäufungen zu beobachten und wird entlang der Aufbaurichtung fortgeführt. Die Defekte aufgrund unregelmäßiger Schichtdicken sind bei allen ZnMg_x-Legierungen zu beobachten mit Ausnahme von reinem Zn. Am häufigsten treten diese Defekte bei den Legierungen ZnMg1 (6 Prozessabbrüche) und ZnMg2 (5 Prozessabbrüche) auf.

Mikroporosität (4): Bei Proben mit einer hohen relativen Bauteildichte ist eine bleibende Mikroporosität zu beobachten, welche in Bild 5 dargestellt ist. Anhand von REM-Aufnahmen wird die Mikroporosität genauer untersucht (Bild 5c).

Bild 5:
Fotografische (a), lichtmikroskopische (b) und REM-Aufnahme (c) von Probekörper mit Mikroporosität am Beispiel von ZnMg1 für $P_L = 40$ W und $v_s = 200$ mm/s



In den REM-Aufnahmen sind faserige helle Bereiche entlang der Mikroporen zu erkennen. Diese können Oxideinschlüsse bestehend aus Magnesiumoxid (MgO) und/oder Zinkoxid (ZnO) darstellen. Durch eine schlechte Benetzung der Oxide können hierdurch Mikroporen im Gefüge ausgebildet werden. In der Literatur wird dieser Effekt bei der additiven Fertigung von Magnesiumlegierungen bereits beobachtet. Ein Vorkommen bei ZnMg_x-Legierungen ist daher wahrscheinlich.

Auswahl Verfahrensparameter

Als kritische Größe für die relative Bauteildichte wird ein Wert von 99,5% festgelegt. Für die nachfolgenden Versuche wird eine Verfahrensparameterkombination P1 ausgewählt, bei der für alle Legierungen relative Bauteildichten $>99,5\%$ beobachtet werden. Für reines Zink wird eine zweite Verfahrensparameterkombination P2 ausgewählt, da die relative Bauteildichte der ersten Verfahrensparameterkombination mit 99,62% eine im Vergleich zu den anderen Werkstoffen niedrigere relative Bauteildichte aufweist. Hierdurch sollen mögliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften aufgrund geringerer relativer Bauteildichte ausgeschlossen werden. In Bild 6 sind lichtmikroskopische Übersichtsbilder der Proben, die mit den ausgewählten Verfahrensparameterkombinationen hergestellt sind, sowie die gemessene relative Bauteildichte abgebildet. Die hierzu verwendeten Verfahrensparameterkombinationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Bild 6:
Lichtmikroskopische Übersichtsbilder der mit den ausgewählten Verfahrensparameterkombinationen P1 und P2 hergestellten Proben

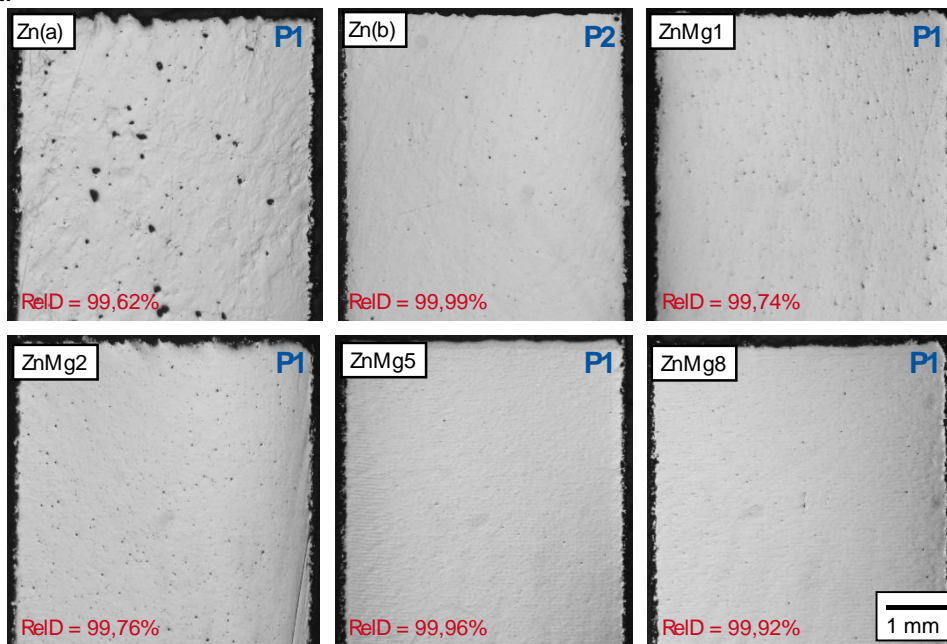


Tabelle 1:
Zusammenfassung der ausgewählten Verfahrensparameterkombinationen für die nachfolgenden Versuche

Prozessparameterkombination	Laserleistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Volumenenergiedichte [J/mm^3]
P1	40	200	133,33
P2	60	400	100

Anhand der in Bild 6 dargestellten lichtmikroskopischen Übersichtsbilder ist die geringere relative Bauteildichte von Zn(a) im Vergleich zu Zn(b) und den Legierungen mit Mg-Anteil erkennbar. Für die Proben aus ZnMg1 und ZnMg2 wird eine geringere relative Bauteildichte (99,74% bzw. 99,76%) beobachtet als für die Proben aus ZnMg5, ZnMg8, sowie Zn(b), die relative Bauteildichten $>99,9\%$ aufweisen.

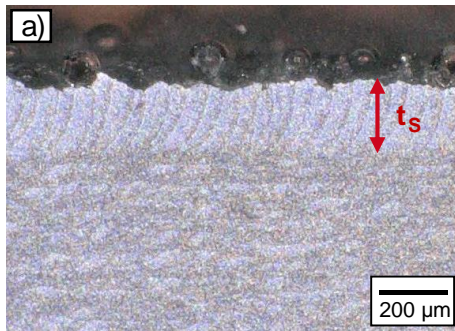
Gefügeanalyse

Anhand ausgewählter Proben werden die **Schmelzbadtiefe** sowie das **Mikrogefüge** analysiert und verglichen. Weiterhin wird die **chemische Gefügezusammensetzung** nach dem Prozess mittels EDX-Flächenmessungen untersucht.

Schmelzbadtiefe

Die Schmelzbadtiefe t_s wird anhand der erkennbaren Schmelzlinsen an den geätzten Proben gemessen (Bild 7). Hierzu werden die Schmelzlinsen der obersten Bauteilschicht betrachtet, die keine Überlagerungen von nachfolgenden Schmelzlinsen aufweisen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 7b dargestellt. In Bild 7a ist beispielhaft anhand der lichtmikroskopischen Aufnahme der Schmelzlinsen von ZnMg5 das Vorgehen gezeigt.

Bild 7: Beispielhafte lichtmikroskopische Aufnahme an einem Querschliff von einer geätzten Proben aus ZnMg5 (a) zur Bestimmung der Schmelzbadtiefe t_s (b)



b)	Material	Schmelzbadtiefe t_s [μm]
	Zn (a)	114 \pm 10
	Zn (b)	123 \pm 10
	ZnMg1	211 \pm 23
	ZnMg2	211 \pm 28
	ZnMg5	183 \pm 19
	ZnMg8	163 \pm 8

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Schmelzbadtiefen von Zn(a) und Zn(b) mit 114-123 μm kleiner sind als die Schmelzbadtiefen der Legierungen mit Mg-Anteil (163-211 μm). Das Legieren mit Magnesium führt folglich zu einer vergrößerten Schmelzbadtiefe. Für die Legierungen ZnMg5 und ZnMg8 wird eine Reduktion der Schmelzbadtiefe gegenüber ZnMg1 und ZnMg2 beobachtet.

Analyse des Mikrogefüges

Zur Analyse des Mikrogefüges werden REM-Bilder an geätzten Proben (Bild 8) aufgenommen und mittels Punkt-EDX Messungen (Tabelle 2) die chemische Zusammensetzung der unterschiedlichen Phasen untersucht. Für Zn wird in Bild 8 die REM-Aufnahmen der Probe Zn(a) verwendet. Ein Unterschied des Mikrogefüges zur Probe Zn(b) wird nicht beobachtet, weshalb an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet wird. Die Aufnahmen werden mittig auf der Probengeometrie generiert. Wie bereits erläutert, sind in Bild 8 Einschlüsse zu erkennen, die das Vorkommen von Oxiden vermuten lassen. Die Einschlüsse werden für alle Legierungen beobachtet und sind als heller faseriger Bereich zu erkennen. In den REM-Aufnahmen ist erkennbar, dass bei unterschiedlichen Mg-Anteilen unterschiedliche Gefüge ausgebildet werden.

Die Probe von Zn(a) weist ein einphasiges Gefüge auf, welches unterschiedliche Strukturen aufgrund der Ausbildung von Ätzgruben erkennen lässt. Anhand der unterschiedlichen Strukturen können Korngrenzen errahnt werden. Verglichen mit den Aufnahmen des Gefüges der Legierungen mit Mg-Anteil ist das Gefüge von Zn(a) grobkörnig. Zur Bestimmung der Korngröße bedarf es weiterführenden Untersuchungen beispielsweise mit Hilfe von Elektronenrückstreubeugungs-Messungen (EBSD).

Bild 8: Darstellung des Mikrogefüges anhand von REM-Aufnahmen des Querschliffs geätzter Proben sowie Punkt-EDX Messungen zur Bestimmung der Phasenbestandteile

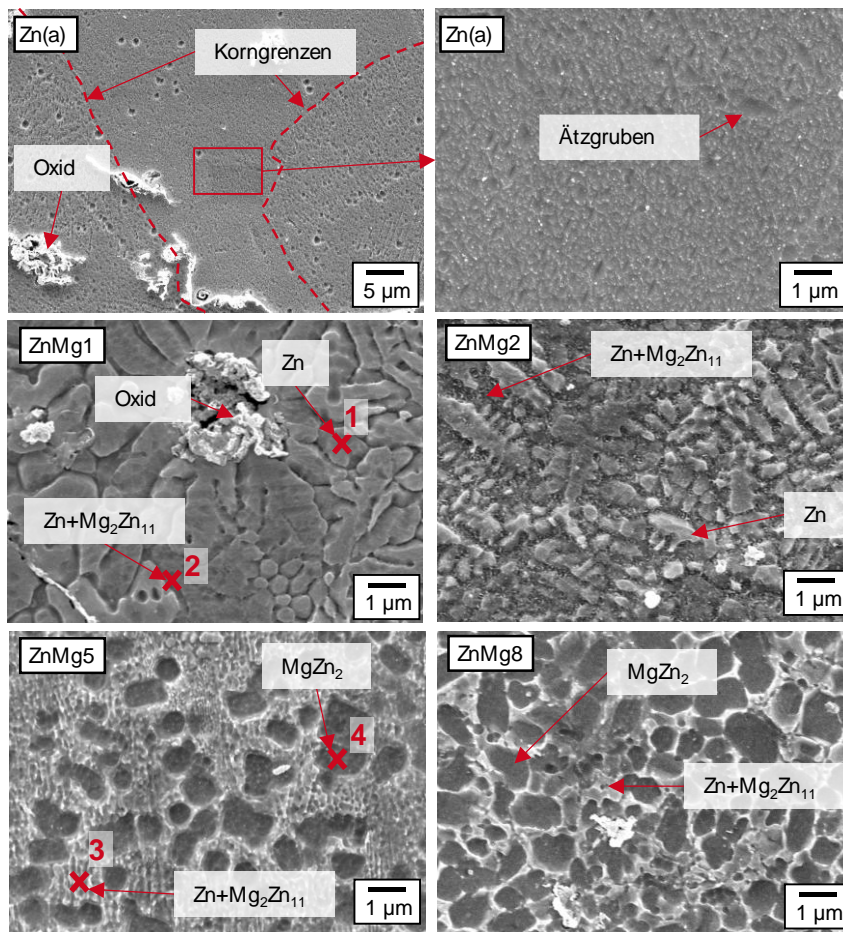


Tabelle 2: Punkt-EDX-Messungen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der erkennbaren Phasen

#	Zn [Gew.-%]	Mg [Gew.-%]	Gefüge
1	100	0	Zn
2	97,07	2,93	Zn+Mg ₂ Zn ₁₁
3	97,49	2,51	Zn+Mg ₂ Zn ₁₁
4	85,89	14,11	MgZn ₂

Für die Legierungen mit Mg-Anteil wird die Ausbildung von unterschiedlichen homogen verteilten Phasen beobachtet. Die Phasen können aufgrund einer unterschiedlichen Ätzreaktion in den REM-Aufnahmen in Bild 8 farblich abgegrenzt werden. Hierbei wird die Phase mit größerem Mg-Anteil aufgrund des größeren Standardnormalpotentials stärker geätzt und ist daher aufgrund des Topographie-Unterschieds als dunklerer Bereich sichtbar. Anhand des Vergleichs der Messwerte der Punkt-EDX-Messungen mit dem ZnMg-Phasendiagramm, sowie einem Literaturvergleich werden die entstehenden Phasen ermittelt. Durch Hinzugabe von 1 Gew-% Magnesium in die Legierung wird im Mikrogefüge eine zweite Phase ausgeschieden. Die höher schmelzende Phase Zn bildet inselförmige Ausscheidungen. In den Zwischenräumen erstarrt die Phase Zn + Mg₂Zn₁₁. Durch die Ausbildung der zweiten Phase wird eine Feinung des Mikrogefüges beobachtet. Die Größe der Zn-Ausscheidungen liegt für die Legierung ZnMg1 bei ca. 1-2 µm.

Für die Legierung ZnMg2 ist ein ähnliches Gefüge wie für ZnMg1 zu beobachten. Die Größe der Zn-Ausscheidungen ist für diesen Werkstoff mit ca. 0,5-1 µm jedoch kleiner. Weiterhin ist eine flächenmäßige Zunahme der Zn + Mg₂Zn₁₁ Phase in den Zwischenräumen der Zn-Ausscheidungen zu erkennen. Für die Legierung ZnMg5 ist die Ausbildung einer dritten Phase zu beobachten. Die hochschmelzende Lavesphase MgZn₂ bildet ca. 1 µm große Ausscheidungen. In den Zwischenräumen erstarren die anderen beiden Phasen Zn + Mg₂Zn₁₁. Für ZnMg8 ist eine Zunahme der Anzahl und Größe der MgZn₂-Ausscheidungen zu erkennen. Die Größe der MgZn₂-Ausscheidungen liegt für ZnMg8 bei ca. 1-2 µm.

Legierungszusammensetzung nach dem Prozess

Für die Ermittlung der chemischen Legierungszusammensetzung nach dem Prozess werden EDX-Flächenmessungen auf den Probenflächen generiert und Messungen mittels Röntgenfluoreszenzspektrometer sowohl an den gefertigten Bauteilen als auch den Ausgangspulvern durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 3 dargestellt. Die dargestellten Messwerte sind, wie bereits bei den EDX-Messungen der Pulverwerkstoffe, um alle Elemente außer Zn und Mg bereinigt.

Tabelle 3:
Ergebnisse der
EDX-
Flächenmessungen
für die hergestellten
Proben

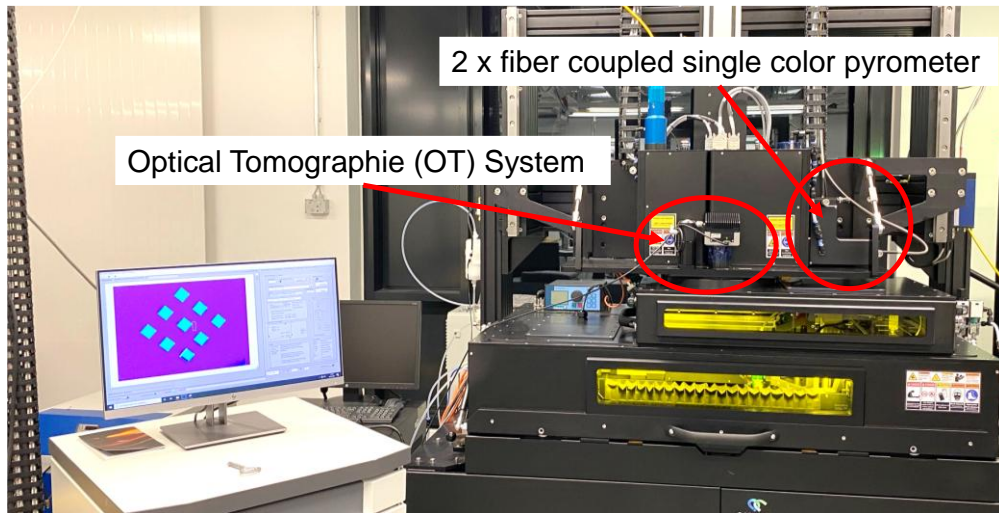
Material	Mittelwert Element \pm StdAbw. [Gew.-%]	
	Zn	Mg
Zn (a)	100	0
Zn (b)	100	0
ZnMg1	98,72 \pm 0,26	1,28 \pm 0,26
ZnMg2	97,47 \pm 0,21	2,53 \pm 0,21
ZnMg5	94,11 \pm 0,32	5,89 \pm 0,32
ZnMg8	90,47 \pm 0,27	9,53 \pm 0,27

Anhand der Ergebnisse ist ein um 0,28-1,53 Gew-% erhöhter Mg-Anteil referenziert zum Sollwert zu erkennen. Hieraus ist abzuleiten, dass während des LPBF-Prozesses mehr Zink als Magnesium verdampft wird. Der erhöhte Mg-Anteil hat einen Einfluss auf die Phasenausbildung der Bauteile, wie im Phasendiagramm zu erkennen ist. Dabei ist durch den höheren Mg-Anteil eine vermehrte Ausscheidung der intermetallischen Phasen Mg_2Zn_{11} und $MgZn_2$ im Vergleich zum pulverförmigen Grundwerkstoff wahrscheinlich.

Prozessbeobachtung

Die installierten Prozessbeobachtungen (OT-System und Pyrometer) auf eine Aconity-Laboranlage sind in Bild 9 dargestellt. Beide Systeme werden zur Prozessanalyse und zur reproduzierbaren Herstellung von Bauteilen verwendet. Optical Tomographie ist ein berührungsloses Prozessüberwachungsverfahren, das während des LPBF-Prozesses eingesetzt wird. OT nutzt Kameras mit optischen Sensoren, um die thermische Strahlung oder das Licht von der Schmelzbadoberfläche aufzunehmen. Dabei wird Schicht für Schicht ein Bild aufgenommen, wodurch eine 3D-Rekonstruktion des Bauteils erzeugt werden kann. Das Ziel ist, Fehler wie Poren, Risse oder Delaminationen frühzeitig zu erkennen und die Qualität des Bauteils zu überwachen. Pyrometrie ist eine berührungslose Temperaturmesstechnik, die im LPBF-Prozess verwendet wird, um die Temperatur des Schmelzbads über die abgegebene Infrarotstrahlung zu messen. Ein Pyrometer beobachtet dabei gezielt den Laserbereich, um Temperaturverläufe zu erfassen. Hierbei wird das Schmelzbad überwacht und mögliche Defekte sichtbar gemacht.

Bild 9:
Implementierte
Prozess-
beobachtung an
dem am DAP
vorhandenen
Aconity
Laborsystem

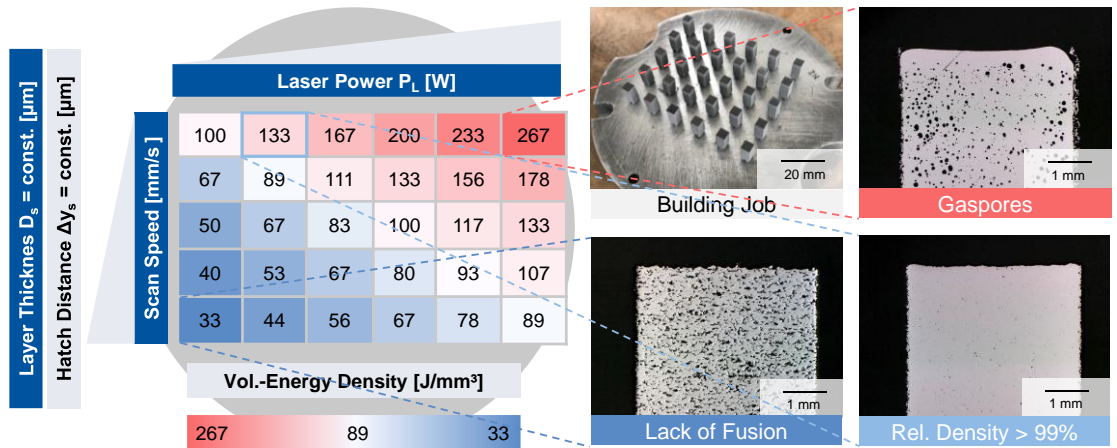


AP1.2: Herstellung von Prüfkörpern: Zugproben (0°, 45°, 90°), Würfel, Gitter, etc.

In AP1.1 ist die Herstellung von Proben aus Zn_xMg-Legierungen aufgezeigt. In Bild 10 ist das Vorgehen zusammengefasst, indem ein Prozessfenster entwickelt wird, sodass die rel. Bauteildicht größer 99% erreicht wird.

Bild 10:

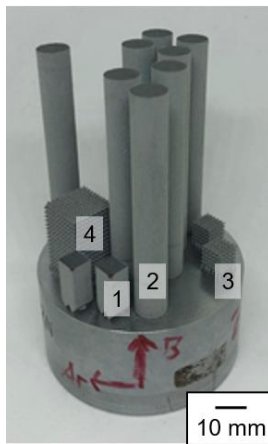
Schematische Darstellung der Prozessfensterentwicklung von Zn_xMg und exemplarische Querschliffe der Proben



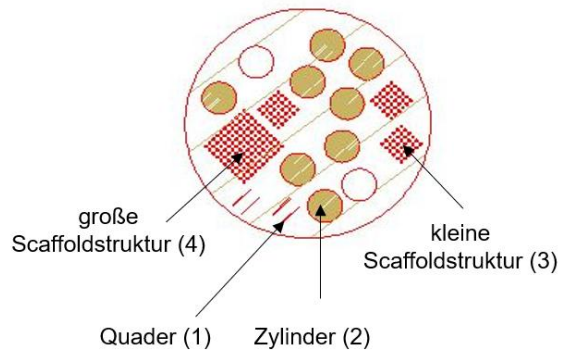
Um diese Parameterkombination zu validieren, wird mit den gewählten Prozessparametern ein Qualifizierungsjob mit diversen Probekörpern aus unterschiedlichen Zn_xMg-Legierungen additiv gefertigt (vgl. Bild 11).

Bild 11:

Fotografische Aufnahme des hergestellten Qualifizierungsjob und exemplarischer Slice in SLM-Maschine für Zn1Mg



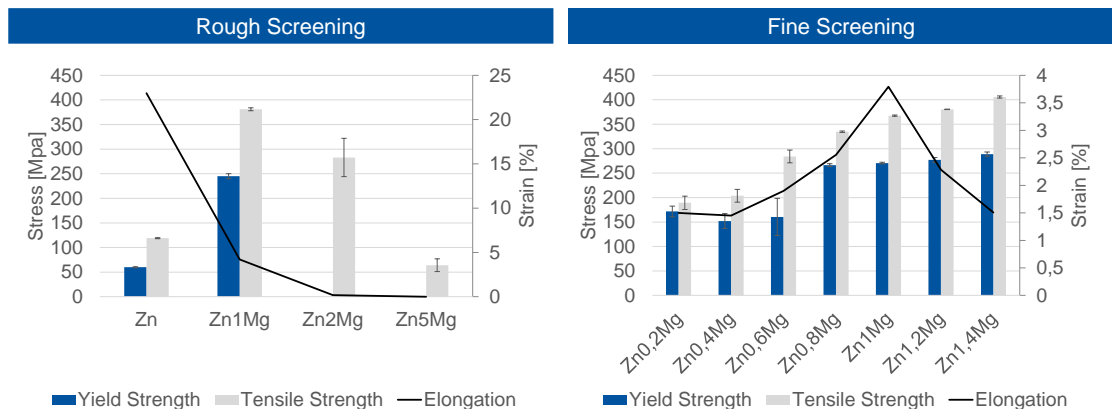
Exemplarischer Slice in SLM-Maschine



Die Auswertung der mech. Eigenschaften erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Meotec anhand von Zugproben. In einem „Rough-Screening“ wird die Legierungszusammensetzung von Zn, Zn1Mg, Zn2Mg und Zn5Mg untersucht. Die größten mech. Eigenschaften von Streckgrenze und Zugfestigkeit werden bei Zn1Mg erzielt. Im Folgenden wird ein „Fine-Screening“ durch Pulvermischungen zwischen Zn0.2Mg und Zn1.4Mg durchgeführt, wie in Bild 12 dargestellt. Hierbei werden die gesteigerten mech. Eigenschaften ab einem Magnesiumgehalt von 0,8 gew.-% identifiziert. Dieser Effekt ist auf die Konfeinung des Gefüges bei Zugabe von Magnesium zurückzuführen. Bei dem Übereinanderlegen der Dehnung wird bei Zn1Mg die größte Dehnung festgestellt. Aufgrund dieser Untersuchungen wird in AP1.3 Zn1Mg zur Herstellung weiterer Bauteile und deren Analyse ausgewählt.

Bild 12:

Analyse der mechanischen Eigenschaften in Kooperation mit Meotec



Bei einer Zusammensetzung von Zn0.5Mg wird eine Defektstruktur in Aufbaurichtung identifiziert. Diese Defektstruktur wird von der welligen Oberseite der Bauteile durch den Querschnitt hindurch beobachtet. Dieses Muster ist bisher nicht aus LPBF-Arbeiten bekannt und wird daher im Rahmen dieser Forschungsarbeiten untersucht. Eine Begründung wird in dem niedrigschmelzenden Verhalten der Legierung mit der gleichzeitigen Ausbildung einer hochschmelzenden Oxidschicht vermutet. Diese Vermutung wird mit Gefüge Analysen (Bspw.: EBSD-Analysen) validiert. Eine Anpassung der Zielsetzung, des Zeitplans oder den Budgets ist nicht notwendig, da diese Defektstruktur nicht bei der ausgewählten Zn1Mg Legierung auftritt.

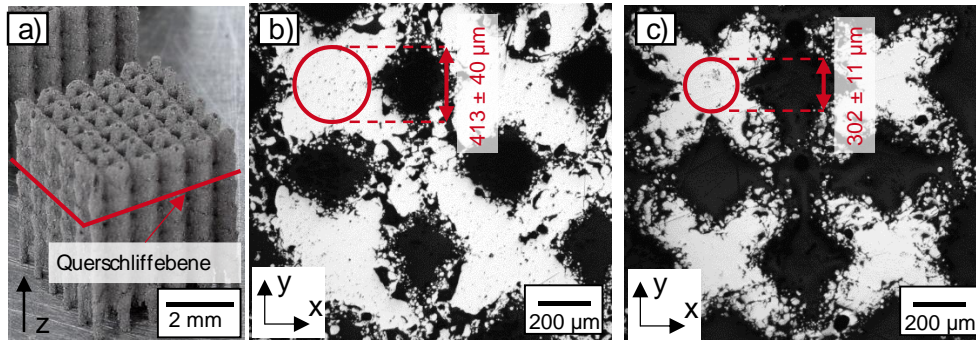
Dünnwandige Strukturen

Die Anpassung der Verfahrensparameter zur Herstellung von komplexen Geometrien wird an dünnwandige Strukturen validiert. Hierfür wird eine Spurbreitenkompensation ermittelt, der Einfluss der Legierungen auf die Maßhaltigkeit untersucht und die relative Bauteildichte gemessen.

Ermittlung Spurbreitenkompensation

Die Maßhaltigkeit der Strebendurchmesser ist mittels Einstellung einer Spurbreitenkompensation beeinflussbar. Dadurch wird das Übermaß der äußeren Scanvektoren kompensiert. Die Ergebnisse zur Bestimmung der Spurbreitenkompensation anhand der Legierung ZnMg₂ sind in Bild 13 dargestellt. Die Strebendurchmesser werden mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen der dargestellten Querschliffebene (x-y-Ebene) gemessen.

Bild 13: Darstellung der Querschliffebene (a) und lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen (b,c) zur Bestimmung der Spurbreitenkompensation für ZnMg₂



Für dünnwandige Strukturen ohne Spurbreitenkompensation beträgt der tragende Querschnitt der Strebendurchmesser $413 \pm 40 \mu\text{m}$ (a). Hieraus ist ein Übermaß von $113 \mu\text{m}$ referenziert zum Sollmaß $300 \mu\text{m}$ zu erkennen. Der halbierte Wert des gemessenen Übermaßes ($56,5 \mu\text{m}$) ist Anhaltspunkt zur Einstellung der Spurbreitenkompensation. Um ein Untermaß zu vermeiden, wird die Spurbreitenkompensation zur sicheren Seite abgeschätzt und zu $50 \mu\text{m}$ bestimmt. Nach Änderung der Spurbreitenkompensation zu $50 \mu\text{m}$ beträgt der Strebendurchmesser $303 \pm 11 \mu\text{m}$. Zur Herstellung der Kompressionsproben wird folglich eine Spurbreitenkompensation von $50 \mu\text{m}$ verwendet.

Maßhaltigkeit der dünnwandigen Strukturen

Die Maßhaltigkeit der hergestellten dünnwandigen Strukturen unter Verwendung der Spurbreitenkompensation wird darüber hinaus für die unterschiedlichen Legierungen überprüft und verglichen. Hierzu werden die Proben anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen der Oberseite und Seitenfläche vermessen. Zur Bewertung der Nachbehandlung der Kompressionsproben mittels Partikelstrahlen werden die Proben sowohl vor wie auch nach dem Partikelstrahlen vermessen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 14 beispielhaft an Probekörpern der Legierung ZnMg₅ dargestellt und in tabellarischer Form in Tabelle 4 für die Legierungen aufgelistet.

Bild 14:
Lichtmikroskopische
Aufnahmen der
Oberseite und
Seitenfläche der
hergestellten
dünnwandigen
Strukturen im
unbehandelten und
partikelgestrahlten
Zustand zur
Überprüfung der
Maßhaltigkeit der
Strebendurch-
messer am Beispiel
von ZnMg5

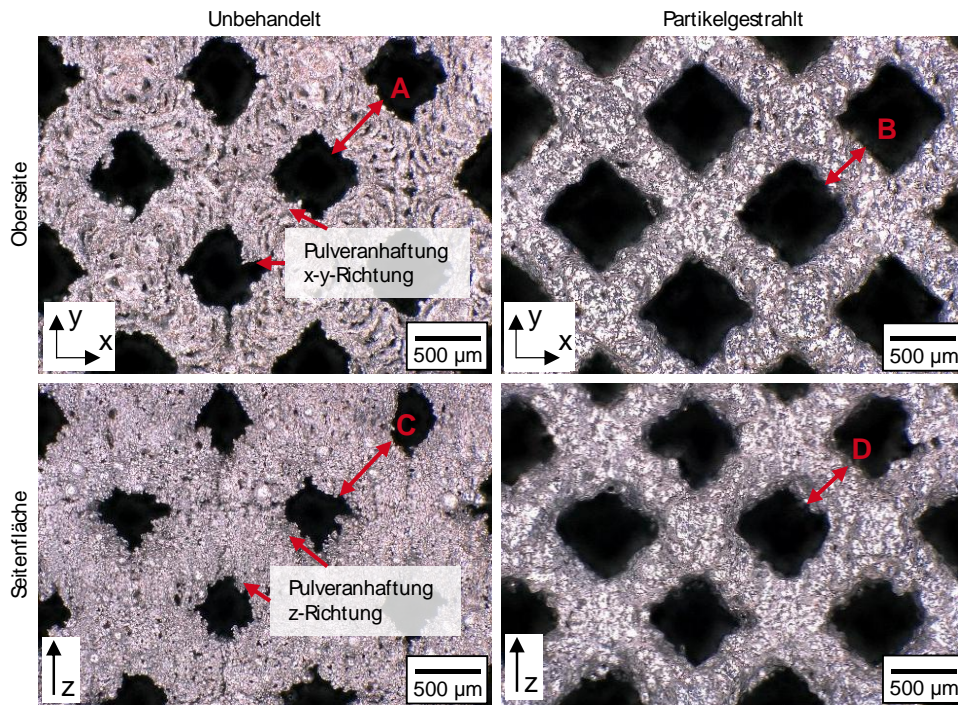


Tabelle 4: Maße
(in µm) der Strebendurchmesser der dünnwandigen Strukturen

Maß	Zn (a)	Zn (b)	ZnMg1	ZnMg2	ZnMg5	ZnMg8
A	411 ± 4	381 ± 23	352 ± 5	345 ± 7	349 ± 5	344 ± 11
B	315 ± 13	306 ± 8	283 ± 11	270 ± 14	281 ± 8	281 ± 9
C	480 ± 89	476 ± 23	493 ± 32	507 ± 65	431 ± 10	441 ± 12
D	322 ± 33	336 ± 26	348 ± 25	328 ± 6	304 ± 24	317 ± 6

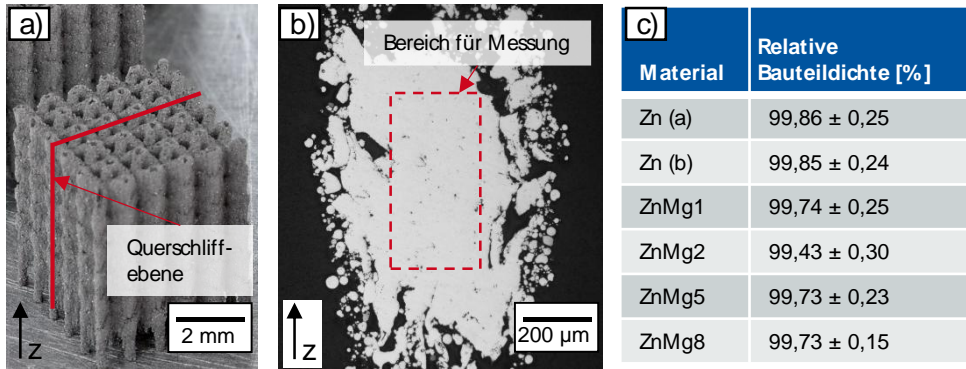
Anhand der Messergebnisse der unbehandelten Proben ist eine größere Maßabweichung aus seitlicher Perspektive (Maß C) im Vergleich zu den Streben der Oberseite (Maß A) zum Sollmaß 300 µm zu erkennen. Der Grund für die größeren Abweichungen sind vermehrte Pulveranhaftungen in z-Richtung verglichen mit den Anhaftungen in x-y-Richtung. Darüber hinaus ist ein Einfluss der Legierung auf die Maßhaltigkeit der Streben zu erkennen. Beispielsweise sind die Strebendurchmesser aufgrund Pulveranhaftungen in x-y-Richtung (Maß A) für Zn(a) und Zn(b) mit 411 µm und 381 µm größer als für die Legierungen mit Mg-Anteilen, welche zwischen 344-352 µm liegen. Auch die Strebendurchmesser der Seitenflächen (Maß C) variieren je nach Legierung zwischen 431 µm und 507 µm. Durch die Nachbehandlung mittels Partikelstrahlen werden die Strebendurchmesser homogenisiert. Sowohl der Einfluss der Legierung als auch der Richtungseinfluss auf den Strebendurchmesser nehmen durch das Partikelstrahlen ab. Bei den unbehandelten Proben liegen die Messwerte zwischen 344 µm und 507 µm (Maß A und C), bei den partikelgestrahlten Proben hingegen zwischen 270 µm und 348 µm (Maß B und D). Durch die Homogenisierung der Strebendurchmesser wird eine kleinere geometrische Abweichung der Kompressionsproben erreicht. Darüber hinaus werden die Unterschiede bezüglich der Anhaftungsrichtung (x-y-Richtung, z-Richtung) der Pulverpartikel verkleinert und dadurch die Anisotropie der dünnwandigen Strukturen vergrößert.

Relative Bauteildichte der dünnwandigen Strukturen

Die dünnwandigen Strukturen werden durch Messungen zur relativen Bauteildichte hinsichtlich Defekte untersucht. Hierdurch soll die Verfahrensparameterauswahl für die veränderte Geometrie der dünnwandigen Strukturen validiert werden. Eine Anpassung der Verfahrensparameter an die veränderte Geometrie wird im Rahmen dieses Projektes nicht vorgenommen. In Bild 15 ist für die Legierung ZnMg2 beispielhaft das Vorgehen dargestellt und die Werte für die gemessene relative Bauteildichte aller Legierungen tabellarisch aufgelistet. Für die Messungen werden lichtmikroskopische Aufnahmen der in Bild 15 dargestellten Querschliffebene (x-z-Ebene bzw. y-z-Ebene) verwendet. Als Messbereich wird das

Innere der Strebenquerschnitte festgelegt. Für die Messung wird eine rechteckige Auswahl des tragenden Querschliffs aus der Mitte des Strebenquerschnitts verwendet.

Bild 15: Darstellung der Querschliffenebene (a) sowie des Messbereichs (b) zur Dichtemessung (c) der dünnwandigen Strukturen anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen am Beispiel für ZnMg2



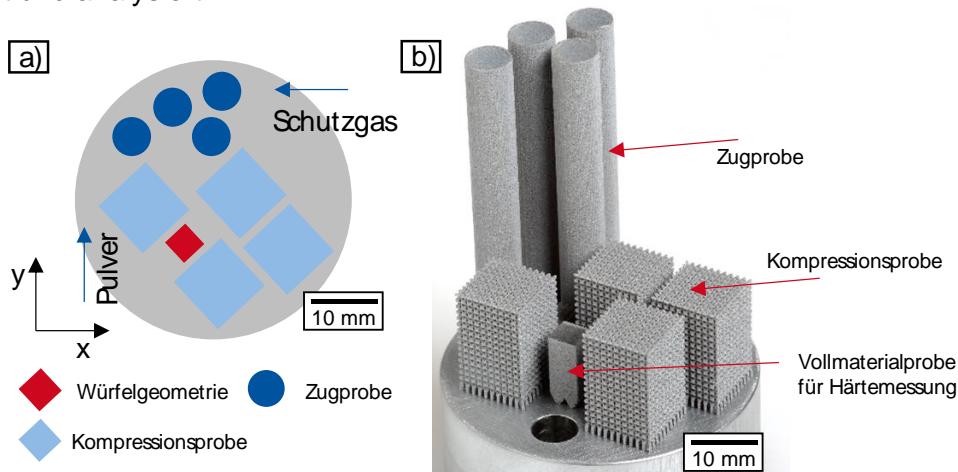
Die Werte der relativen Bauteildichte der dünnwandigen Strukturen sind mit Ausnahme von ZnMg2 größer 99,5%. Für Zn(a) ist eine Erhöhung der relativen Bauteildichte im Vergleich zum Vollmaterial von 99,62% zu 99,86% zu beobachten. Für die übrigen Legierungen sind die relativen Bauteildichten mit einer relativen Änderung von $\leq 0,33\%$ leicht reduziert oder identisch zu denen des Vollmaterials. Die Übertragbarkeit der Verfahrensparameter auf dünnwandige Strukturen ist anhand der dargestellten Ergebnisse gegeben. Die Abweichung der relativen Bauteildichte von ZnMg2 vom Sollwert 99,5% ist mit 0,07% gering und daher vernachlässigbar.

AP1.3: Analyse der Probekörper und Auswahl einer Vorzugslegierung

Mechanische Eigenschaften

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der mechanischen Belastungsversuche dargestellt. Die Positionierung der drei hergestellten Probekörperarten (zylindrische Zugproben, dünnwandige Kompressionsproben und Vollmaterialproben für Härtemessungen) sind in Bild 16a schematisch dargestellt. In Bild 16b sind die Probekörperarten fotografisch nach Herstellung exemplarisch für die Legierung ZnMg5 dargestellt. Die Probekörper werden nach der Herstellung von der Substratplatte getrennt, präpariert und analysiert.

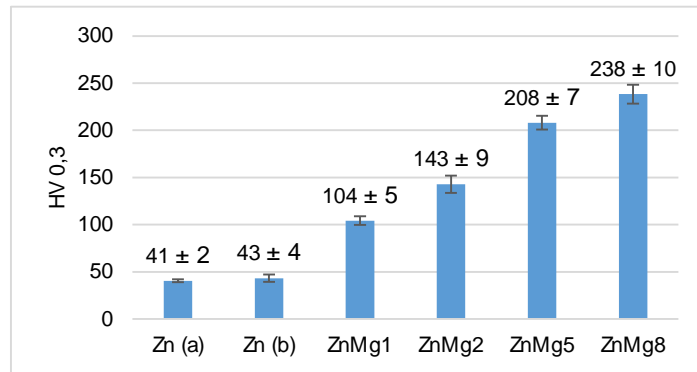
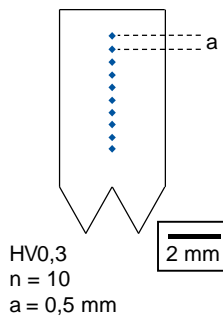
Bild 16: Schematische Darstellung der mechanischen Probekörper auf Substratplatte (a) sowie fotografische Aufnahmen nach Herstellung (b) am Beispiel von ZnMg5



Härtemessungen

Anhand der hergestellten Vollmaterialproben werden Härtemessungen nach Vickers durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 17 dargestellt.

Bild 17:
Ergebnisse der
Härtemessungen
für ZnMgx-
Legierungen

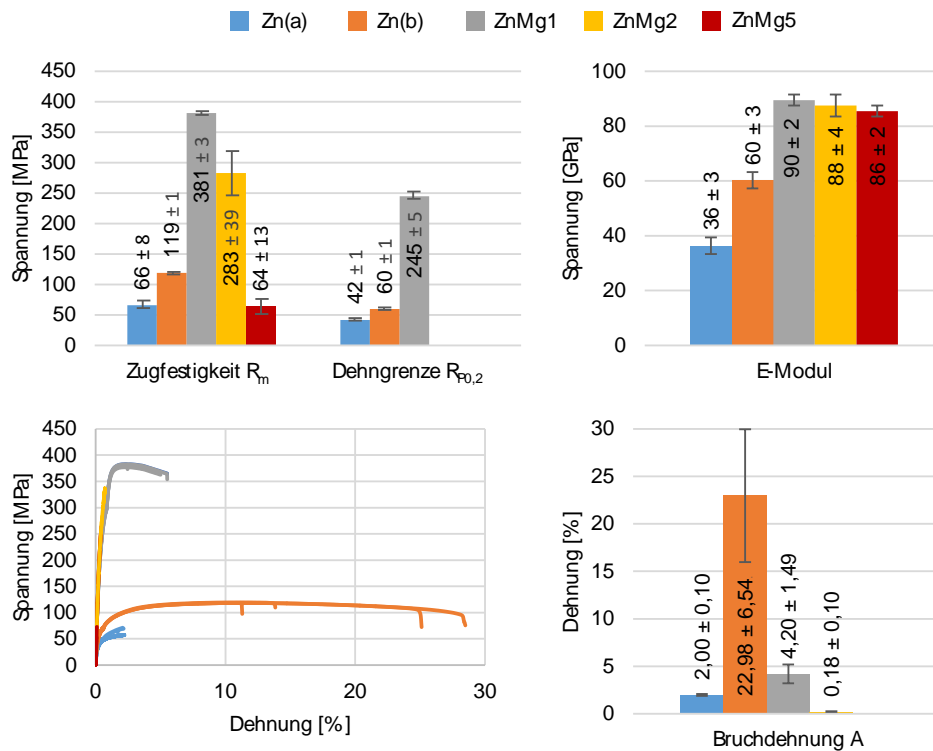


Die Messergebnisse lassen eine Steigerung der Härte bei zunehmendem Mg-Anteil in der Legierung erkennen. Für Zn(a) und Zn(b) wird ein Härtewert von 41 bzw. 43 HV_{0,3} gemessen. Durch das Legieren mit Mg steigt die Härte zu 104, 143, 208 und 238 HV_{0,3} für ZnMg1 bis ZnMg8. Die relative Änderung der Härte ist zwischen Zn und ZnMg1 (59 HV_{0,3}) sowie ZnMg2 und ZnMg5 (65 HV_{0,3}) größer als bei dem Übergang von ZnMg1 auf ZnMg2 (39 HV_{0,3}) und ZnMg5 auf ZnMg8 (30 HV_{0,3}).

Zugversuche

Die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche sind in Bild 18 dargestellt. Für ZnMg8 ist die Probenherstellung aufgrund eines spröden Materialversagens nicht möglich. Ergebnisse zu diesem Werkstoff sind daher nicht vorhanden. Für ZnMg5 und ZnMg2 liegen nur teilweise Versuchsergebnisse vor, da durch ein ebenfalls sprödes Materialverhalten die Datenerhebung der Materialeigenschaften Dehngrenze und Bruchdehnung verhindert wird.

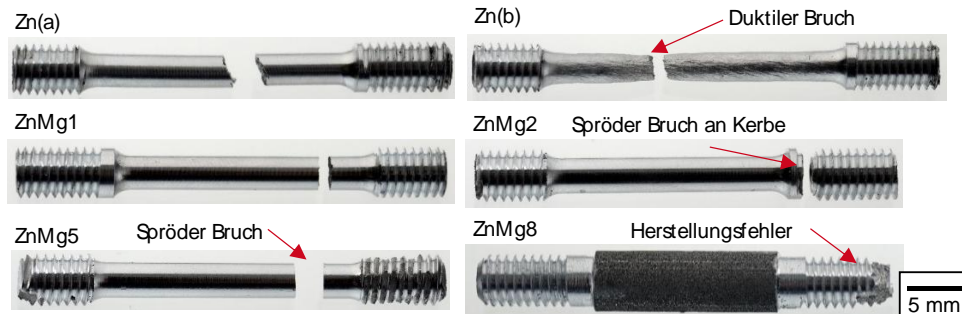
Bild 18: Darstellung
der Ergebnisse der
Zugversuche in
Spannungs-
Dehnungskurve
sowie
Säulendiagrammen
mit abgeleiteten
Werten für
Zugfestigkeit,
Dehngrenze, E-
Modul und
Bruchdehnung



Anhand der Ergebnisse der Zugversuche ist die erwartete Steigerung der Zugfestigkeit R_m durch Legieren mit Mg zu erkennen. Die Zugfestigkeit von ZnMg1 weist mit 381 MPa einen drei- bis sechsfach größeren Wert auf als die Zugfestigkeit von Zn(a) bzw. Zn(b) mit 66 und 119 MPa. Durch Legieren mit höheren Mg-Anteilen sinkt jedoch die Zugfestigkeit auf 283 MPa (ZnMg2) bzw. 64 MPa (ZnMg5). Die Dehngrenze $R_{p0,2}$ steigt von 42 bzw. 60 MPa für Zn(a) und Zn(b) auf 245 MPa für ZnMg1. Neben der Steigerung der Zugfestigkeit und Dehngrenze ist ebenfalls eine Erhöhung des E-Moduls für ZnMg-Legierungen gegenüber reinem Zn zu erkennen. Das E-Modul der ZnMg-Legierung weist Werte zwischen 86 und 90 GPa auf. Für reines Zn liegt das gemessene E-Modul bei 36 GPa für Zn(a) und 60 GPa für Zn(b).

Durch einen Vergleich der Bruchdehnungen ist eine Versprödung des Werkstoffs bei steigendem Mg-Anteil zu erkennen. Die Bruchdehnung A der Proben von Zn(b) sind mit durchschnittlich 22,98% mindestens fünfmal größer als von ZnMg1 (4,20%) und ZnMg2 (0,18%). Für Zn(a) ist ebenfalls eine geringe Bruchdehnung (2,00%) zu beobachten. In Bild 19 sind fotografische Aufnahmen der Zugproben nach der Durchführung der Tests abgebildet.

Bild 19: Darstellung der charakteristischen Brucharten anhand fotografischer Aufnahmen der zerstörten Zugproben



In Bild 19 ist zu erkennen, dass die Zugprobe für ZnMg2 nicht im Bereich des dünnsten Querschnitts bricht, sondern im Gewinde des Probeaufnahmebereichs. An den Gewindegängen wird Kerbwirkung in der Zugprobe generiert, die zum Versagen der Zugprobe führt. Diese Versagensart wird für die Zugproben aus ZnMg2 und teilweise ZnMg5 beobachtet. Für ZnMg8 ist der Herstellungsfehler bei der Probenherstellung dargestellt. Das Versagen tritt ebenfalls im Gewinde des Probenaufnahmebereichs ein und wird durch den Bearbeitungsprozess des Gewindeschneidens hervorgerufen.

Die Analyse der Probekörper findet fortlaufen und in Kooperation mit den Projektpartnern statt. Nachdem die Legierungszusammensetzung Zn1Mg ausgewählt wurde, wird diese hinsichtlich der Eignung als Implantat Material untersucht und mit reinem Zink sowie der bereits verfügbaren Magnesiumlegierung WE43 ins Verhältnis gesetzt. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Bild 20 dargestellt. Die ermittelten Eigenschaften werden in AP3 für die Datenbank verwendet, sodass die Geometrie mit diesen Randbedingungen erzeugt wird.

Bild 20:

Zusammenfassung der mechanischen Eigenschaften von Zn1Mg in Vergleich zu reinem Zink und der Magnesiumlegierung WE43

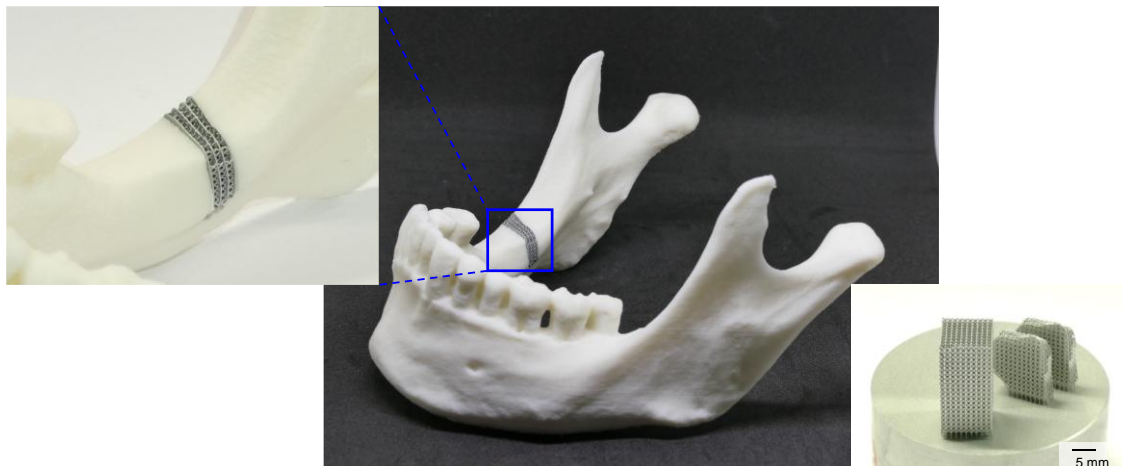
Mechanical Properties of WE43, Zn and Zn1Mg				
		WE43	Zn	Zn1Mg
Relative Density	[%]	>99	>99	>99
Hardness	[HV0,3]	96	43	104
Yield Strength	[MPa]	162	60	245
Tensile Strength	[MPa]	250	119	381
Young's Modulus	[GPa]	44	60	90
Elongation	[%]	10	22,98	4,20

- 1 Cuboid Specimen
 - ✓ Relative Density
 - ✓ Microstructure
 - ✓ Hardness
- 2 Tensile Testing Specimen
 - ✓ Quasistatic Tensile Test:
 - Yield Strength
 - Tensile Strength
 - Young's Modulus
 - Elongation
- 3 Lattice Structure Specimen (f_{2cc_2})
 - ✓ Manufacturability of thin-walled Structures

Exemplarisch wird aus der gewählten Zn1Mg Legierung ein Demonstrator mittels LPBF hergestellt. Hierbei wird ein Ausschnitt des Kiefers durch eine Gitterstruktur ersetzt, siehe Bild 21. Der Steben-Durchmesser beträgt 200 μm . Die Erzeugung der angepassten Gitterstrukturen ist in AP 3.1a beschrieben.

Bild 21:

Exemplarische Darstellung eines Demonstrators: Ausschnitt eines Kieferknochens mit Gitterstrukturen aus Zn1Mg



Durch diese Verifikation (analyisierte mechanischen Eigenschaften und Herstellung eines Demonstrators) kann der Meilenstein M1 bestätigt werden. Bei den folgenden Arbeitspaketen, wie bspw. der Prozessübertragung von dem verwendeten Laborsystem auf ein kommerzielles Industriesystem in AP2, wird diese Vorzugslegierung Zn1Mg verwendet.

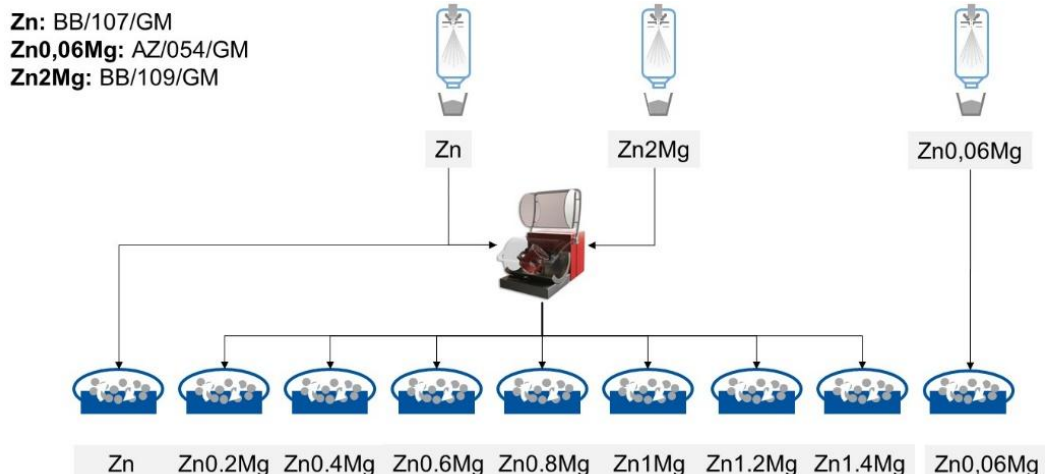
M1 Meilenstein

Vorzugslegierung erfolgreich ausgewählt: Zn1Mg

Als Vorzugslegierung zum Erreichen des Meilensteins wurde Zn1Mg mit den passenden Eigenschaften bezogen auf Knochenersatzmaterial ausgewählt. Die Verarbeitung ist mit einer rel. Bauteildichte > 99,5% möglich und als Defekte werden in dem ausgewählten Prozessfenster ausschließlich unvermeidbare Mikroporositäten identifiziert. Die Duktilität liegt nach Rücksprache mit den Projektpartnern im akzeptablen Bereich, wobei hier ggf. noch Optimierungspotenzial gesehen wird. Zur Anwendung des Werkstoffs als Medizinprodukt wird eine gute LPBF-Verarbeitbarkeit vorausgesetzt, sodass die Bauteile mit einer reproduzierbaren Qualität gefertigt werden können. Aus diesem Grund wird das AP1.2 gleichzeitig mit AP1.3 (Analyse der Probekörper) über die im Antrag beschriebene Zeit weitergeführt. Das Ziel ist die die Entstehung von Defekten (Bindefehler, Gasporosität, Mikroporosität und längliche Defektstruktur) wissenschaftlich zu analysieren und ein Optimierungspotenzial zur Steigerung der Duktilität aufzuzeigen. In Bild 22 ist schematisch das Mischen der Legierungen Zn und Zn2Mg dargestellt. Die Gemische werden von Zn0,2Mg bis Zn1,4Mg auf Grundlage der aktuellen Arbeiten, dokumentiert in der Veröffentlichung mit Nennung des Projektträgers (DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103805), durch das Mischen im Taumelmischer erzeugt

Bild 22:

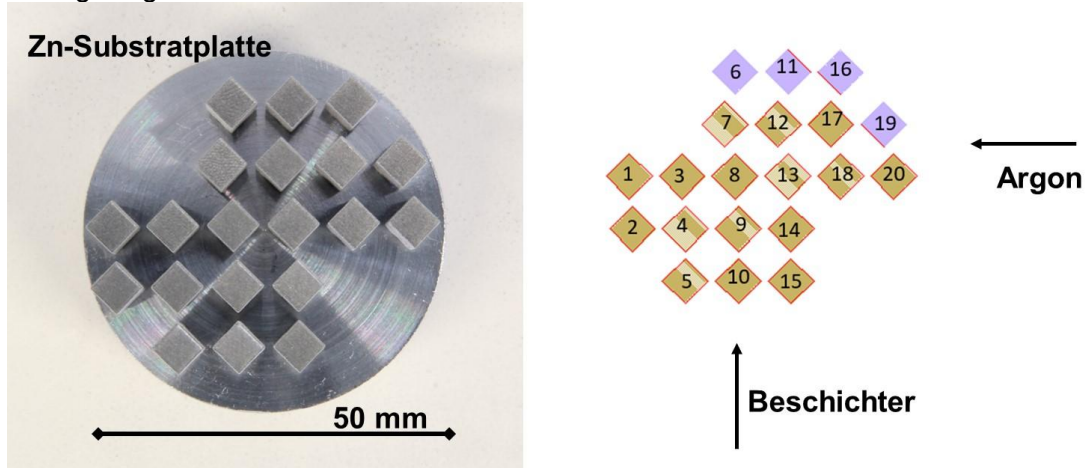
Schematische Darstellung der Pulvermischungen



Aus jeder der genannten Zn_xMg Legierungen werden Baujobs mittels LPBF hergestellt und die Eigenschaften der Proben bspw. oberflächliche Rauheit, rel. Bauteildichte, Klassifizierung der Defektstrukturen oder Härte analysiert und ist im Folgenden dargestellt. In Bild 23 ist links schematisch der Baujob mit der Bauteilnummerierung und rechts eine fotografische Aufnahme auf der Zink-Substratplatte exemplarisch für Zn₁Mg dargestellt.

Bild 23:

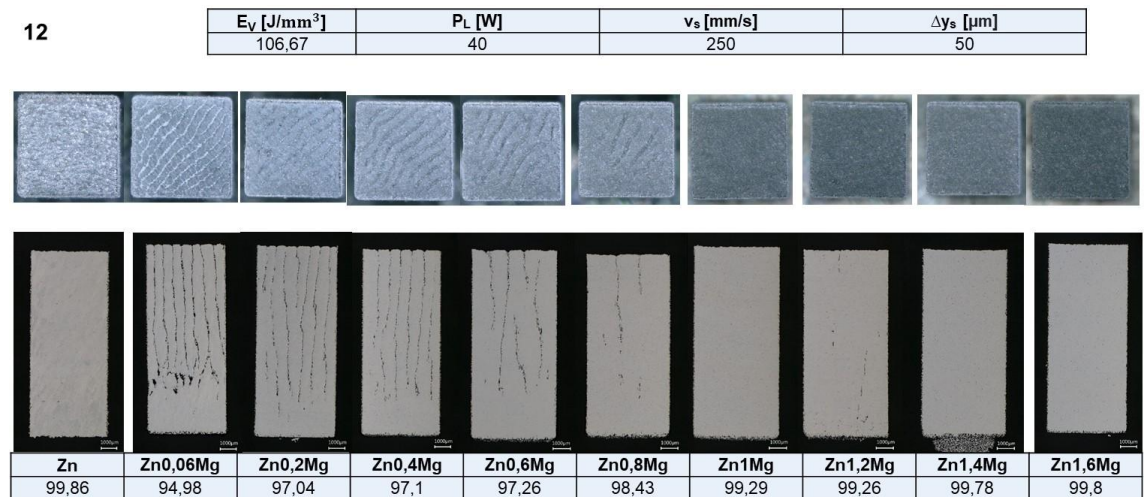
Fotografische Aufnahme des hergestellten Baujobs und exemplarischer Slice in der Steuerungssoftware SLM-Machine für Zn₁Mg



In Bild 24 sind Querschliffe von Probekörpern mit unterschiedlichen chem. Zusammensetzungen und gleicher Parameterkombination dargestellt. Eine reduzierte Ausprägung der länglichen Defektstruktur wird bei erhöhtem Magnesiumanteil beobachtet. Ab Magnesiumgehalt von 1 Gew.-% kann in den Querschliffen der ausgewerteten Probekörper keine Defektstruktur beobachtet werden. Bei reinem Zink wird mit 99,86% die größte rel. Bauteildichte gemessen. Bei Magnesiumgehalten zwischen 0,06 Gew.-% 0,8 Gew.-% sind Defekte in Form von länglichen Mustern in den Querschliffen der Probekörper erkennbar. Diese Defekte werden bis zur obersten Schicht der Proben durchgezogen und sind bei der Auswertung der Deckfläche zu beobachten.

Bild 24:

Darstellung der Querschliffe von Probekörpern mit unterschiedlichen chem. Zusammensetzungen und gleicher Parameterkombination dargestellt



In Bild 25 ist zu jeder Parameterkombination eine Klassifizierung der Defekte dargestellt. Die längliche Defektstruktur wird mit „Zebra“ abgekürzt und Gasporosität mit GP. In Dunkelblau ist jeweils der Wert mit der größten rel. Bauteildichte bei der Verarbeitung der jeweiligen chem. Zusammensetzung hervorgehoben. Die Querschliffe der Probekörper der jeweiligen Parameterkombination sind in Bild 26 dargestellt.

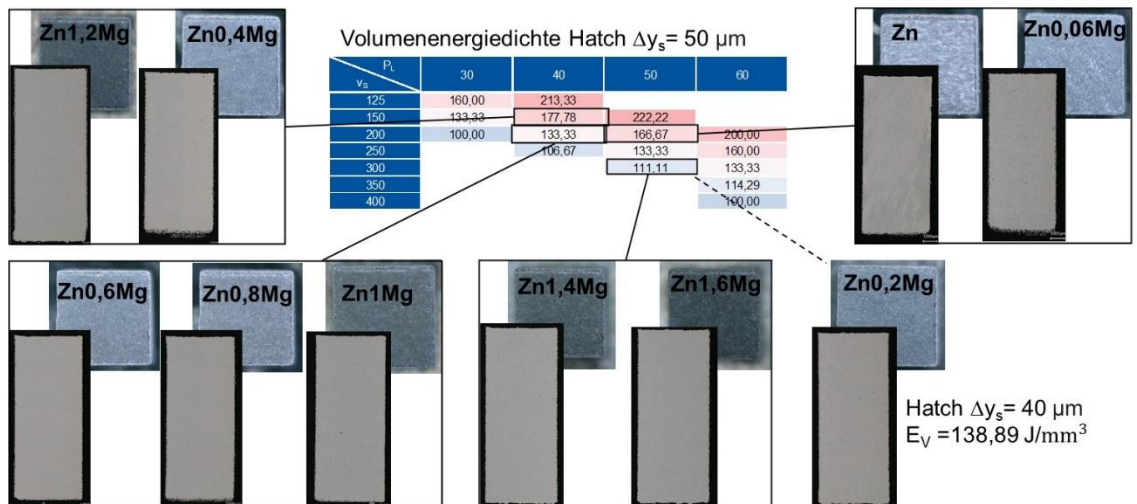
Bild 25:

Klassifizierung der Defektstrukturen

Parameter, PDW rel. Dichte > 99,7%, sowie Defektstruktur													
	E_V	P_L	v_s	Zn	Zn0,06Mg	Zn0,2Mg	Zn0,4Mg	Zn0,6Mg	Zn0,8Mg	Zn1Mg	Zn1,2Mg	Zn1,4Mg	Zn1,6Mg
1	160	30	125	99,94	Zebra	Zebra	Zebra	Leichte Zebra	Leichtes Zebra	Leichte GP	Leichte GP		Leichte GP
2	213,33	40	125	99,78	99,85	99,82	99,93	99,89	99,7		99,8	99,93	99,85
3	133,33	30	150		Zebra	Zebra/BF	Zebra	Zebra	Leichtes Zebra	Leichtes Zebra	Zebra	Zebra	leichtes Zebra
4	177,78	40	150	99,76	99,94	99,88	99,83	99,86	99,82		99,71	99,88	99,86
5	222,22	50	150		Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	GP	Leichte GP	GP	GP
6	125	30	200		Zebra	BF	Leichtes Zebra	Leichtes Zebra	Leichtes Zebra	Leichtes Zebra	Leichtes Zebra	Zebra	leichtes Zebra
7	100	30	200		Zebra	BF	Zebra	Zebra	Zebra	Zebra	Zebra	Leichtes Zebra	Zebra
8	133,33	40	200	99,94	Zebra	Zebra		99,87	99,9	99,81			
9	166,67	50	200	99,96	99,77	99,7			99,71				
10	200	60	200	99,94	GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP
11	133,33	40	250	99,84	Zebra	Zebra	Leichtes Zebra	99,74	Leichte GP	Leichte GP		99,83	99,72
12	106,67	40	250	99,86	Zebra	Zebra	Zebra	Zebra	Leichtes Zebra	Leichte GP		99,78	99,8
13	133,33	50	250	99,94	Zebra	99,89		99,73	Leichte GP	Leichte GP		99,83	99,8
14	160	60	250	99,95	Leichte GP	Leichte GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP
15	111,11	50	300	99,9	Zebra	99,85	Leichte GP		Leichte GP	Leichte GP		99,75	99,84
16	138,89	50	300	99,76	Zebra	99,94		99,93				99,84	99,89
17	133,33	60	300	99,81		99,78	Leichte GP		Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP
18	114,29	60	350	99,83	Zebra	99,84							
19	142,86	60	350	99,89	Leichtes Zebra	99,8		99,76					99,73
20	100	60	400	99,8	Zebra	99,82	Leichte GP	99,85	Leichte GP	Leichte GP	Leichte GP	99,77	99,84

Bild 26:

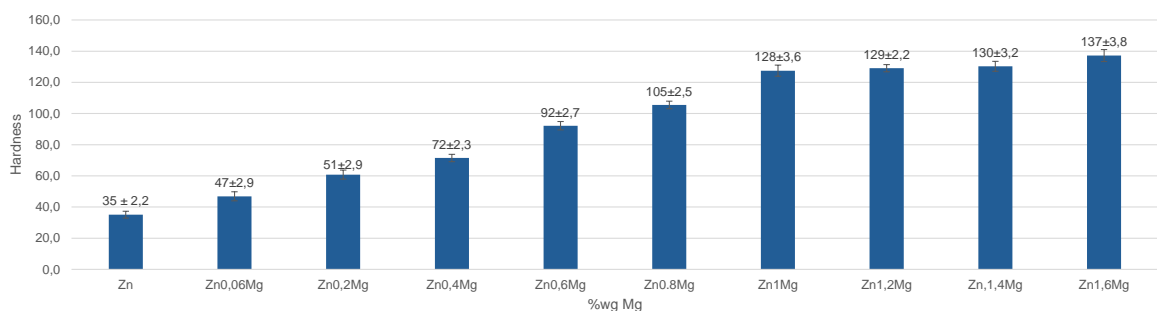
Darstellung der Querschliffe ausgewählter Probekörper mit hoher rel. Bauteildichte bezogen auf die jeweilige chem. Zusammensetzung



An den Querschliffen der Probekörper mit hoher rel. Bauteildichte werden Härtemessungen durchgeführt. Deren Ergebnisse sind in Bild 27 dargestellt. Bei steigendem Magnesiumgehalt wird eine größere Härte festgestellt. Das Auftreten der länglichen Defektstrukturen bei bestimmten Verfahrensparameterkombinationen und chem. Zusammensetzungen konnte bisher nicht hinreichend geklärt werden und soll in weiteren Untersuchungen analysiert werden. Durch mikrostrukturelle Untersuchungen bspw. durch EBSD können die auftretenden Intermetallischen Phasen analysiert werden. Das Gesamtziel der Forschungsarbeiten ist dadurch nicht gefährdet, da für die Vorzugslegierung Zn1Mg ein Verfahrensparameter mit einer rel. Bauteildichte > 99,5% identifiziert worden ist.

Bild 27:

Härtemessungen nach DIN EN ISO 6507-01 HV0,3 / 15



Nachdem die Verarbeitung von Zink-Magnesium in unterschiedlichen chem. Zusammensetzungen beschrieben ist, wird die Vorzugslegierung Zn1Mg weiter untersucht. In Abbildung 28 ist auf der linken Seite eine fotografische Darstellung von Zn1Mg-Probekörpern abgebildet. Auf der rechten Seite ist derselbe Baujob schematisch, mit Anordnung der Probekörper auf der Substratplatte mit Zugehörigkeit zu den unterschiedlichen Verfahrensparameterkombinationen (VPK), dargestellt.

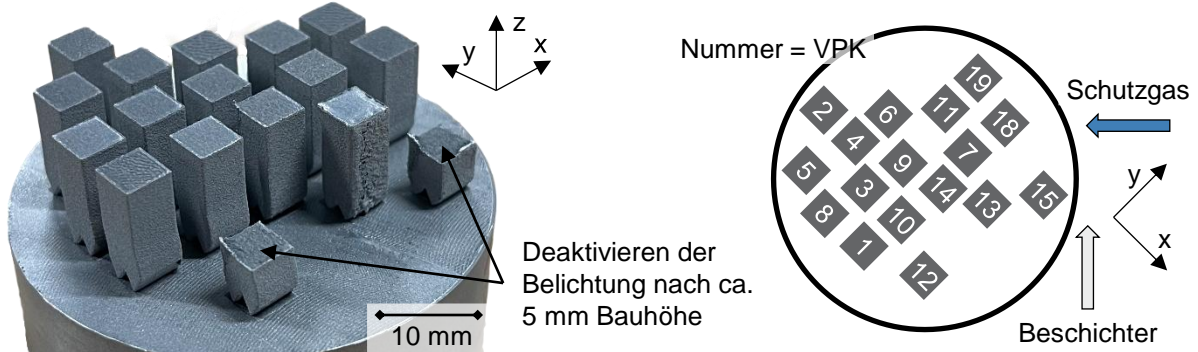


Abbildung 28: links: Fotografische Aufnahme der Zn1Mg-Probekörper auf einer Zn-Substratplatte nach der Herstellung mittels PBF, rechts: Schematische Darstellung der Anordnung der Probekörper mit Zuordnung der VPK

In Tabelle 1 ist die Zuordnung der Nummern zu den VPK aufgelistet. Die ermittelte rel. Bauteildichte ist in Abbildung 29 über die Verfahrensparameter aufgetragen.

Tabelle 1: Zuordnung der Verfahrensparameter

VPK-Nr.	P_L [W]	v_s [mm/s]	Δy_s [μm]	E_v [J/mm^3]
1	30	150	50	133
2	30	200	50	100
3	35	150	50	156
4	40	150	50	178
5	40	200	50	133
6	40	300	50	89
7	40	600	50	44
8	50	200	50	167
9	50	300	50	111
10	60	300	50	133
11	70	400	50	117
12	70	500	50	93
13	80	200	50	267
15	80	500	50	107
18	40	200	60	111
19	40	200	70	95

Konstante Parameter: $D_s = 30 \mu\text{m}$, $N_{\text{prev}} = 500 \mu\text{s}$, $N_{\text{post}} = 500 \mu\text{s}$ (\rightarrow Belichtungspause = 1 ms)

		Zn1Mg						
		Laserleistung P_L [W]						
		30	35	40	50	60	70	80
Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]	150	97,06 \pm 0,57	99,78 \pm 0,08	99,73 \pm 0,10				
	200	96,74 \pm 0,42		99,53 \pm 0,05	99,19 \pm 0,17			90,61 \pm 2,08
	300			97,32 \pm 0,72	99,53 \pm 0,14	98,79 \pm 0,38		
	400						99,14 \pm 0,15	98,99 \pm 0,21
	500						x	x
	600			94,60 \pm 0,67				

Schichtdicke $D_s = 30 \mu\text{m}$, Hatchabstand $\Delta y_s = 50 \mu\text{m}$

90% relative Bauteildichte 100%

Abbildung 29: Darstellung der relativen Bauteildichte von Zn1Mg-Probekörpern im Querschliff mit Einfärbung entsprechend der relativen Bauteildichte

Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit reduziert nach $E_V = \frac{P_L}{v_s \cdot \Delta y_s \cdot D_s}$ die eingebrachte Volumenenergiedichte (E_V) in das Pulverbett. Die daraus resultierende steigende Abkühlgeschwindigkeit bewirkt eine Veränderung der Schmelzbaddynamik, sodass Instabilitäten der Schmelze und dadurch Defekte auftreten können. Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit von $v_s = 200$ mm/s auf $v_s = 300$ mm/s bei $P_L = 40$ W resultiert bei Zn1Mg-Probekörpern in länglichen Defektstrukturen, hervorgerufen durch Bindefehler. Wird die Scangeschwindigkeit noch weiter erhöht, werden Bindefehler in der gesamten Probe vorgefunden. Beispielsweise weist der Zn1Mg-Probekörper bei VPK 5 ($P_L = 40$ W, $v_s = 200$ mm/s) eine hohe relative Bauteildichte von 99,53% im Querschliff auf. Bei Vergrößerung der Scangeschwindigkeit um 100 mm/s (VPK 6 mit $P_L = 40$ W, $v_s = 300$ mm/s) wird im Querschliff eine relative Bauteildichte von 97,32% aufgrund länglicher Defektstrukturen gemessen.

In Abbildung 30 ist ein Vergleich der Korngröße am REM mittels Grain Size Map durchgeführt worden. Eine Verkleinerung der Korngröße wird an den Defekten beobachtet. Heterogene Keimbildung an den Oxiden, die als Fremdkörper in der Schmelze beim Erstarren als Ausgangspunkt für Kornwachstum angesehen werden kann, erzeugt eine feinere Kornstruktur $< 1 \mu\text{m}$ in defektnahen Bereichen.

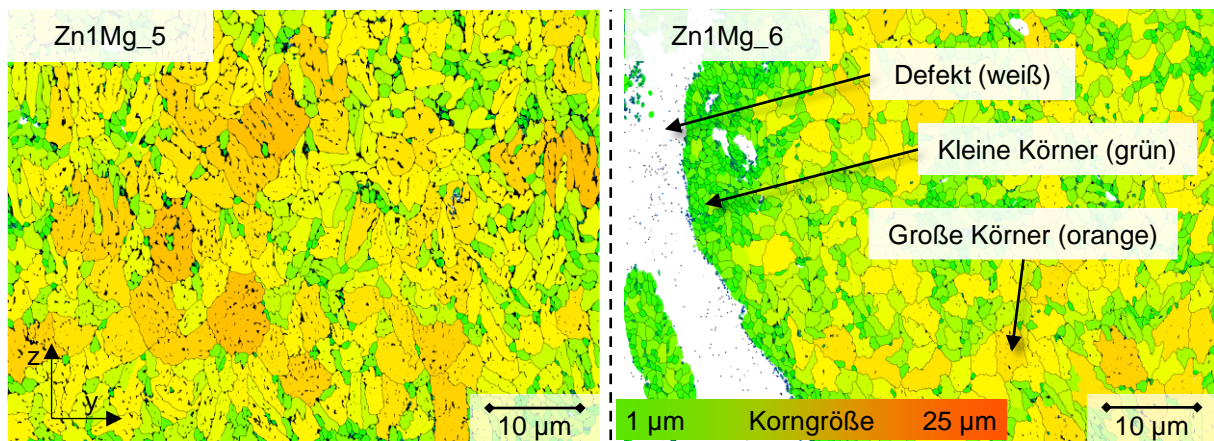


Abbildung 30: Vergleich der Korngröße mittels Grain Size Maps am REM, links: defektarmer Bereich, rechts: Ausschnitt mit Defekt

Die mechanischen Eigenschaften werden anhand von Zugproben untersucht und sind in Abbildung 31 dargestellt. Die kleine Standardabweichung über drei untersuchte Zugproben lässt eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse vermuten. Die mechanischen Kennwerte von Zn1Mg-Zugproben betragen $74,42 \pm 0,52$ GPa für den Elastizitätsmodul (E-Modul), $268,15 \pm 2,72$ MPa für die 0,2%-Dehngrenze ($R_{p0,2}$). $389,18 \pm 0,45$ MPa beträgt die Zugfestigkeit (R_m) für Zn1Mg Zugproben und die Bruchdehnung (A) $1,94 \pm 0,42\%$.

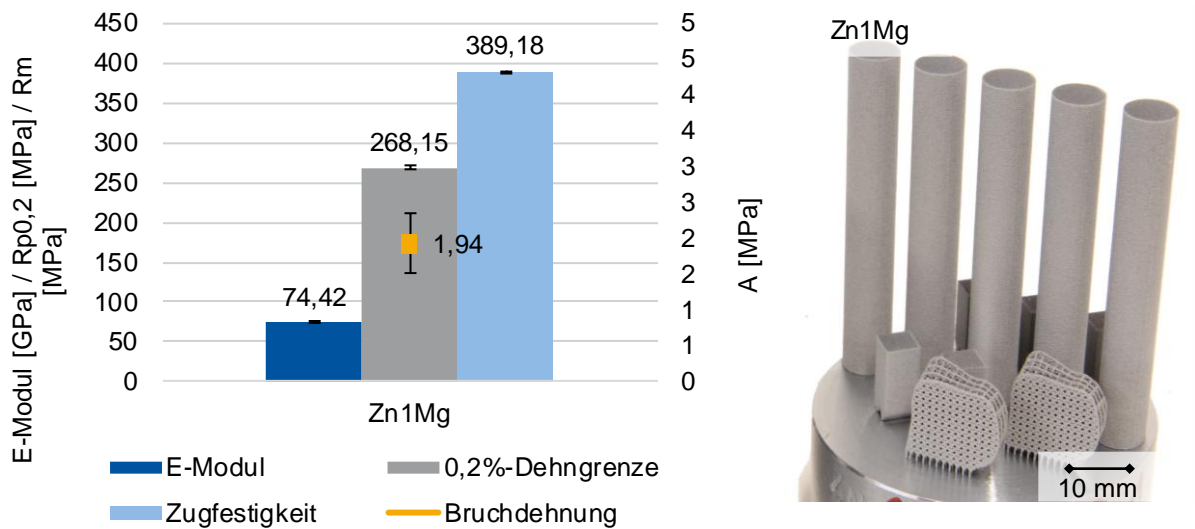


Abbildung 31: links: Darstellung der mechanischen Eigenschaften für Zn_{0,5}Mg und Zn₁Mg ermittelt anhand von Zugversuchen, rechts: fotografische Abbildung des hergestellten Baujobs

Eine Wärmebehandlung wird in einem Ofen unter Umgebungsluft durchgeführt. Dafür werden die Probekörper (Quader- und Zugproben) nach Erreichen der Solltemperatur für jeweils drei Stunden bei 120°C bis 240°C ausgelagert. Anschließend werden die Proben entnommen und an der Umgebungsluft bis Raumtemperatur abgekühlt. Anhand von EBSD-Messungen im REM wird die Korngröße bestimmt. Die Referenzprobe ohne Wärmebehandlung weist eine mittlere Korngröße von 2,03 µm auf. Bei 150 °C ist keine signifikante Veränderung festzustellen, während die mittlere Korngröße bei 180 °C und 210 °C auf 2,09 µm bzw. 2,08 µm ansteigt. Die größte durchschnittliche Korngröße von 2,36 µm wird bei 240°C gemessen. Die mechanischen Eigenschaften werden anhand von Mikrohärteprüfungen und Zugversuchen bestimmt. In Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen dargestellt. Die unbehandelte Referenzprobe erreicht einen Wert von 114,89 ± 3,28 HV_{0,3}. Probekörper nach einer 120°C Wärmebehandlung weisen eine fast identische Mikrohärtigkeit mit 115,32 ± 3,65 HV_{0,3} auf. Erst ab einer Temperatur von 150 °C nimmt die Mikrohärtigkeit messbar ab. Bei einer Temperatur von 150 °C fällt sie um 7,23% auf 106,58 ± 2,83 HV_{0,3} ab. Mit steigender Temperatur nimmt sie annähernd exponentiell bis zu einem Minimalwert von 98,44 ± 2,75 bei 240 °C ab. Die verkleinere gemessene Härte bei höherer Temperatur der Wärmebehandlung kann auf das Kornwachstum bzw. die Vergrößerung der Körner zurückgeführt werden.

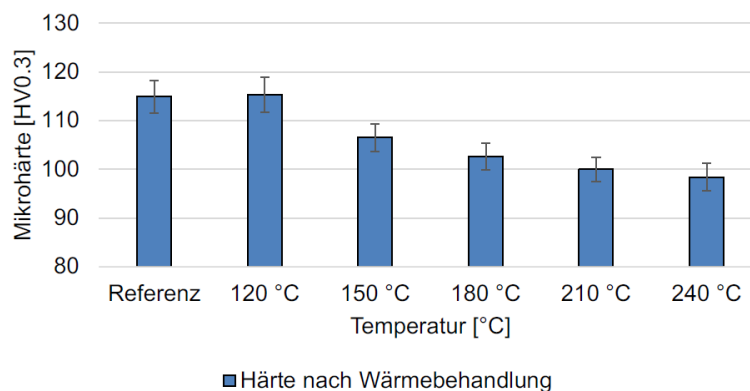


Abbildung 32: Mikrohärtewerte der Quader-Probekörper im Referenzzustand und nach der Wärmebehandlung

AP1.4: Entwicklung von Verfahrensparametern für Up-, DownSkin, 300 μm Gitter, etc.

In AP1.2 wurde die rel. Bauteildichte für dünnwandige und komplexe Strukturen (bspw. Gitter mit 300 μm Streben Durchmesser) validiert. Die Abweichung ist $< 0,5\%$ im Vergleich zum Vollmaterial und damit vernachlässigbar klein. Durch die vergleichsweise geringe eingebracht Volumenenergie werden die dünnwandigen Strukturen nicht überhitzt und die Isolation durch das umliegende Pulver kann vernachlässigt werden. Dieses ist weiterhin mit der geringen Schmelztemperatur von Zink (420°C) und damit kleinem Gradienten der Umgebungstemperatur zu begründen.

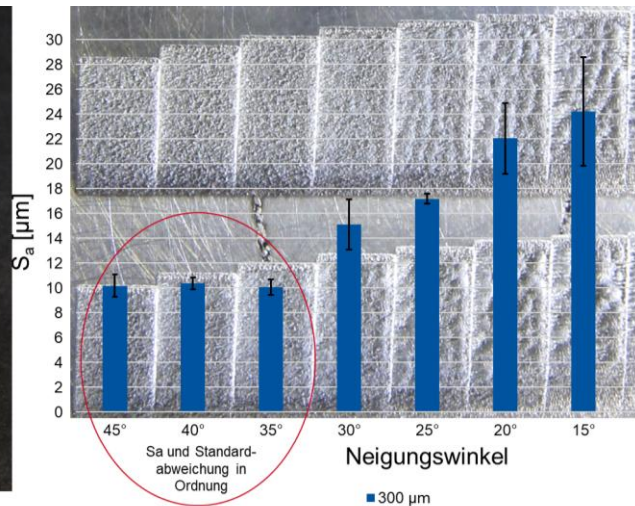
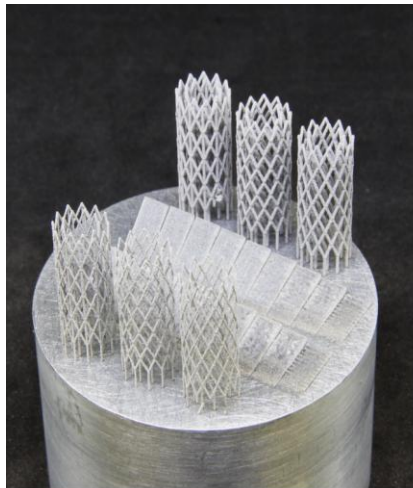
Bei der Entwicklung eines Parametersatzes für komplexe Strukturen wie bspw. Gitter können einzelne Bauteilbereich mit speziellen Verfahrensparametern wie Up- oder Downskin belichtet werden. Alle durchgeführten Untersuchungen zeigen keine Verbesserung der Oberflächenrauheit und ergeben eine Defektstruktur zwischen den Bereichen. Aus diesem Grund wird als Belichtungsstrategie ausschließlich die Hatchbelichtung gewählt, ohne Up- und Downskin und ohne Konturbelichtung.

Zur Bestimmung des minimal herstellbaren Überhangwinkels werden Platten mit definiertem Überhangwinkel hergestellt und die Oberflächenrauheit vermessen, wie in Bild 33 dargestellt. Ein Winkel von 35° zur Substratplatte wird mit einem S_a -Wert $< 10 \mu\text{m}$ hergestellt. Dieser Wert wird in AP3 in der Datenbank gespeichert und für das Gitter-Design in AP 3.3 als Rauheitswert und minimalem Aufbauwinkel verwendet.

Bild 33:

Links:
Exemplarischer Baujob aus Zn1Mg mit dünnwandigen Strukturen und Platten mit definierten Überhangwinkel

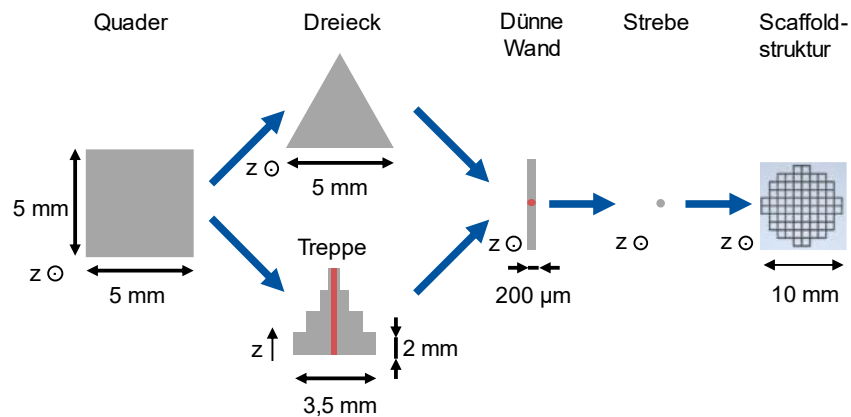
Rechts:
Vermessung der Oberflächenrauheit und Identifizierung von herstellbaren Strukturen



In Bild 34 ist das Vorgehen zur Entwicklung von Gitterstrukturen schematisch dargestellt. Ausgehend von einer quaderförmigen Geometrie mit 5 mm Seitenlänge werden die Abmessungen hin zu Scaffoldstrukturen mit 200 μm Strebendurchmesser verkleinert. Die Scanvektoren werden sowohl kontinuierlich an Dreiecken als auch diskret an einer Treppengeometrie verkürzt. Der negative Einfluss auf die Zielgrößen Herstellbarkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit wird erkannt. Zudem wird eine kritische Überhitzung der Schmelze und eine erhöhte Menge angesinterter Pulverpartikel infolge zu kurzer Belichtungspausen beobachtet. Die Belichtungspausen werden in der Folge erhöht, um den Einfluss auf die Schmelzbadynamik zu beurteilen und geeignete Delayparameter für die Herstellung der Scaffoldstrukturen zu identifizieren. Aus den Streben wird anschließend auf der Grundlage des Designs in AP3 eine Scaffoldstruktur erstellt.

Bild 34:

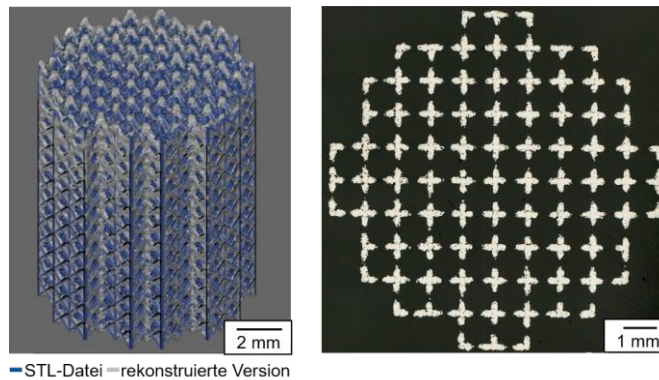
Schematische Darstellung des Vorgehens zur Entwicklung der Probekörper für Gitterstrukturen



Für einen qualitativen Vergleich der Scaffoldstruktur mit der STL-Datei werden diese mit einem optischen 3D-Messsystem vom Typ ATOS Q 8M der Firma GOM GmbH (Braunschweig) erfasst. In Bild 35 ist die Überlagerung der gescannten Scaffoldstruktur mit der Original-Datei links dargestellt, rechts ein Querschnitt der Scaffoldstruktur.

Bild 35:

Vergleich der STL-Datei mit der mithilfe eines optischen Messsystems rekonstruierten Version und lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts der Scaffoldstruktur



Dünnwandige Strukturen mit einem Strebendurchmesser $< 300 \mu\text{m}$ können maßhaltig und reproduzierbar mittels LPBF aus der Vorzugslegierung Zn1Mg hergestellt werden.

Der Halbzeitmeilenstein nach 24 Monaten:

Der Halbzeitmeilenstein wurde erfüllt. Die erfolgreiche additive Herstellung von Gitterstrukturen (Strebendurchmesser $< 500 \mu\text{m}$ mit einer relativen Bauteildichte $> 99,5\%$) mittels LPBF aus der Vorzugslegierung Zn1Mg mit mechanischen Eigenschaften, die ähnlich dem menschlichen Knochen sind konnte mit den beteiligten Projektpartnern umgesetzt werden.

AP1.5: Herstellung von Prüfkörpern und Bauteilen aus der Vorzugslegierung im Labormaßstab

In diesem Arbeitspaket wird eine Prozessroute zur additiven Herstellung dünnwandiger Strukturen mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF) identifiziert. Als Werkstoff wird die vorher ausgewählte bioresorbierbare Zinklegierung Zn1Mg verwendet. Die Prozessroute umfasst die Datenaufbereitung, Herstellung und Nachbearbeitung der Bauteile. Zur Nachbearbeitung werden abrasive und chemische Verfahren untersucht. Die entwickelte Prozessroute ermöglicht die reproduzierbare Fertigung von Scaffoldstrukturen mit einem Strebendurchmesser von $200 \mu\text{m}$ und einer Porenbreite von $800 \mu\text{m}$ bei einer Oberflächenrauheit $< 10 \mu\text{m}$ und einer Maßhaltigkeit $\pm 20 \mu\text{m}$.

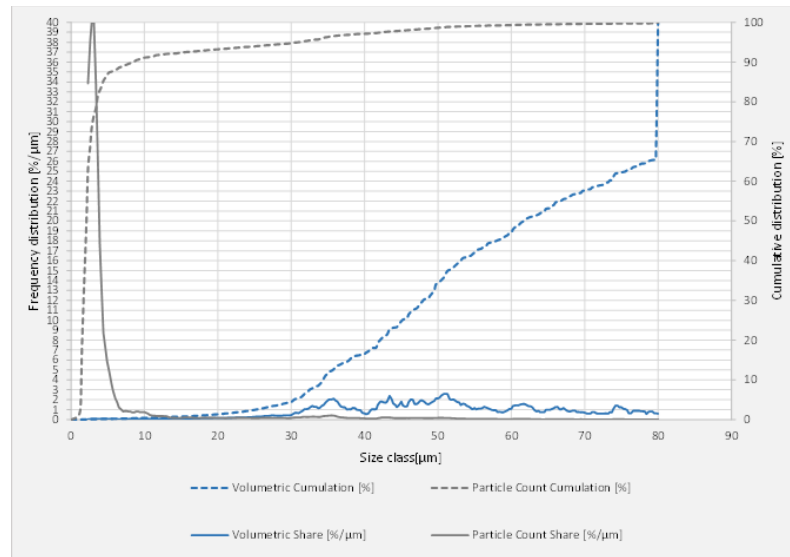
AP2.3: Pulveranalyse

Zur Analyse der Korngrößenverteilung des bei Meotec verdünnten Pulvers werden am DAP Messungen durchgeführt. In Bild 36 die die Korngrößenverteilung von Zink-Pulver dargestellt. Das Pulver weist eine große Streuung der Korngröße auf. Für den LPBF-Prozess wird aktuell die Korngrößenverteilung von $15 - 45 \mu\text{m}$ verwendet. Um diese aus der Meotec-Verdüsung zu extrahieren, muss das Pulver in einer

Kaskade gesiebt werden. Anschließend wird die Messung der Korngrößenverteilung wiederholt und das Pulver auf die Verarbeitbarkeit mittels LPBF hin untersucht.

Bild 36:

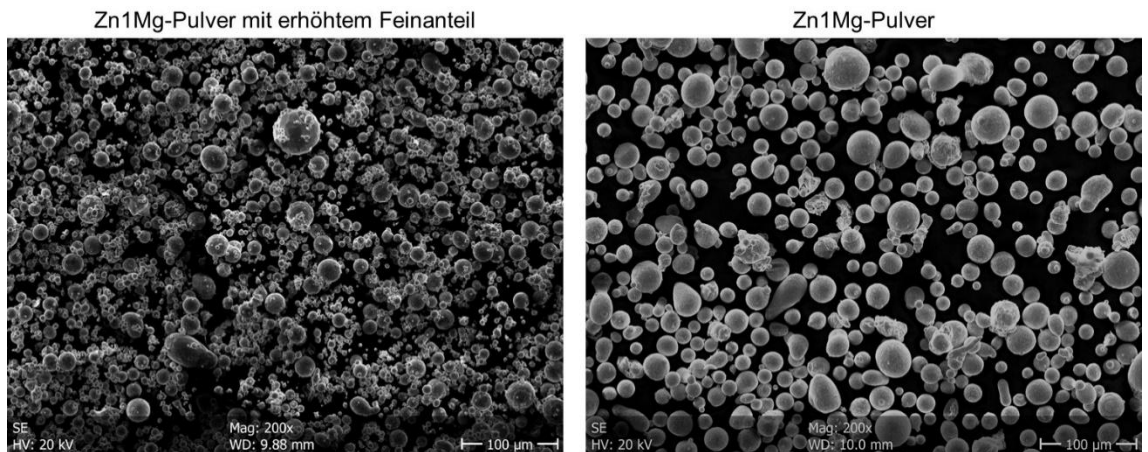
Analyse der Particle Size Distribution (PSD) von Zink (Meotec-Verdüsung)



Parallel zu den Arbeiten bei den Projektpartnern werden am DAP Pulveranalysen durchgeführt. Exemplarisch sind zwei unterschiedliche Kornfraktionen des Zn1Mg Pulvers in Bild 37 mittels REM-Aufnahme dargestellt. Das links dargestellte Pulver weist einen vergrößerten Feinanteil mit Bildung von Satelliten an den Pulverkörnern auf. Bei dem rechts dargestellten Pulver wird eine PSD (Particle Size Distribution) von 15-45 µm gemessen, ohne Satellitenbildung mit sphärischen Partikeln.

Bild 37:

REM-Aufnahmen der Zn1Mg Pulver li.: Zn1Mg-Pulver mit vergrößertem Feinanteil und Satellitenbildung an den Pulverkörnern, re.: Zn1Mg-Pulver mit PSD zwischen 15 und 45 µm ohne Satellitenbildung mit sphärischer Pulverform

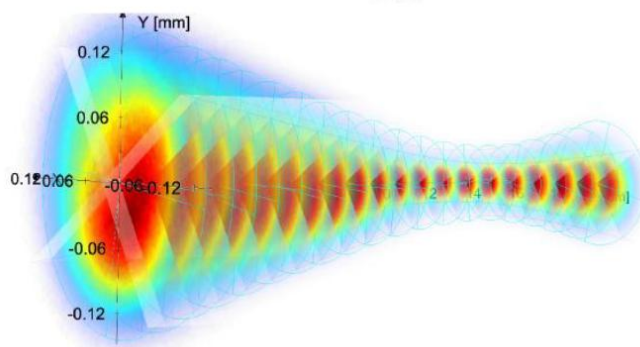


AP2.4: Übertragung der entwickelten Verfahrensparameter vom Labormaßstab auf die Industrieanlage

Zur Entwicklung eines Konzeptes zur Anlagenübertragbarkeit von einem LPBF-Laborsystem am DAP zu einem LPBF-Industriesystem bei Meotec wird zunächst die Laboranlage charakterisiert. In Bild 38 ist exemplarisch die Kausikmessung dargestellt. Hierbei wird ein Strahldurchmesser von ca. 78 µm gemessen. Auf dem LPBF-Industriesystem ist im Datenblatt ein Strahldurchmesser von ca. 50 µm angegeben. Das Konzept wird entsprechend der geänderten Bedingungen angepasst und bspw. die Verfahrensparameter wie Hatchabstand und Laserleitung verändert.

Bild 38:

Kaustikmessung
der LPBF
Laboranlage am
DAP mit einem
Strahldurchmesser
von ca. 78 μm

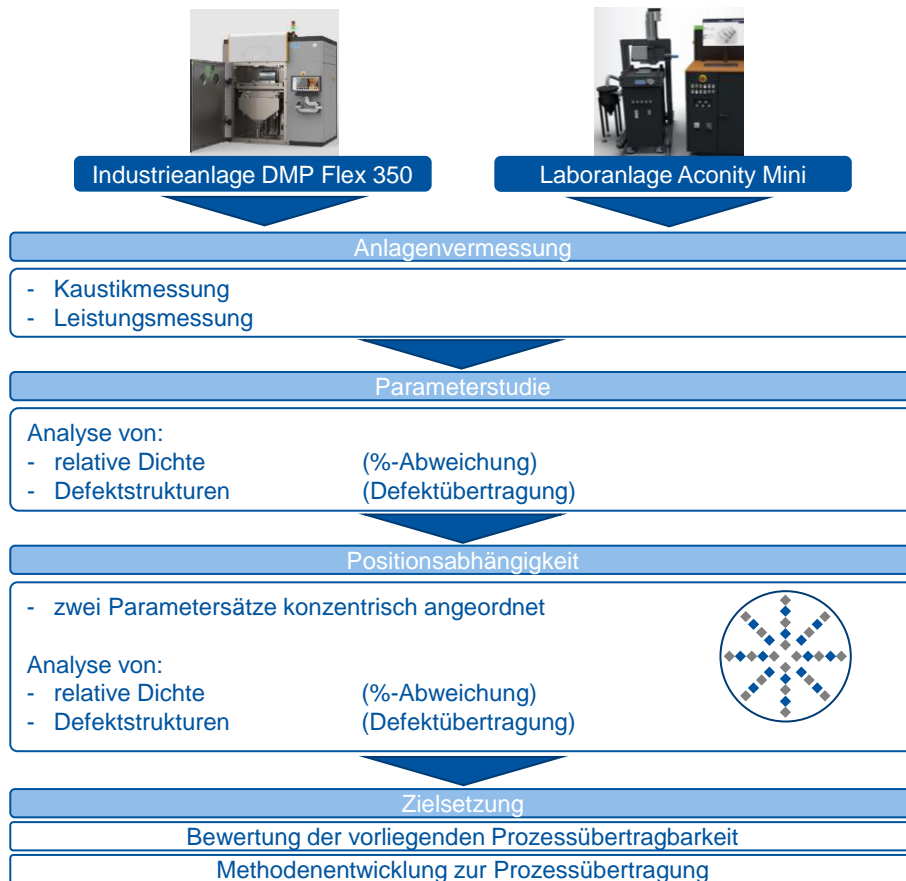


Calculation Parameter		Caustic U		Caustic V	
Beam Width:	2nd Moments (D 4.00 Sigma)	ISO 11146-1:	Conform	ISO 11146-1:	Conform
Ignore center pos.:	yes	z0:	14.060(30) mm	z0:	14.024(30) mm
Method:	EN ISO 11146-1	d0:	0.08093(64) mm	d0:	0.07857(60) mm
Results:	after lens	zR:	4.087(88) mm	zR:	3.983(84) mm
Beam Type:	(stigmatic)	theta:	19.80(35) mrad	theta:	19.72(34) mrad
Caustic U,V		BPP:	0.401(7) mm mrad	BPP:	0.387(6) mm mrad
Asy:	0.9(10) %	M ² :	1.183(20)	M ² :	1.144(19)
Asy:	1.030(11)	K:	0.845(14)	K:	0.874(14)

Am Beispiel der Prozessübertragung zwischen der Industrieanlage DMP Flex 350 von 3D-Systems bei dem Projektpartner Meotec und der Laboranlage Aconity Mini am DAP wird eine standardisierte Methodik entwickelt. Dazu werden die möglichen Einflussfaktoren reduziert, indem die Faktoren Mensch und Material identisch gewählt und der Einfluss des Post-Processings ausgeschlossen wird. Begonnen wird die Untersuchung mit einer vollständigen Vermessung der Laserkaustik und Laserleistung für beide Anlagen. Anschließend folgt die Prozessübertragung zwischen Industrie- und Laboranlage und eine Bewertung (vgl. Bild 39). Im letzten Schritt soll zukünftig anhand der Ergebnisse und gesammelten Erfahrungswerte eine standardisierte Methodik zur Prozessübertragung entwickelt und in einem Flussdiagramm festgehalten.

Bild 39:

Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Methodenentwicklung zur Prozessübertragbarkeit



Laserleistung

Mit einer maximalen Abweichung von 6,23% liegt die gemessene Laserleistung der Aconity Mini bei 40 W 1,23% außerhalb der gegebenen Messtoleranz. Für Laserleistungen ≥ 75 W werden die Herstellerangaben mit einer Abweichung $< 5\%$ bestätigt. Die DMP Flex 350 liegt mit einer Abweichung von bis zu 37,72% außerhalb der Messtoleranz. Erst ab Laserleistungen ≥ 250 W können die Herstellerangaben für die DMP Flex mit Abweichungen $< 5\%$ ebenfalls bestätigt werden. Aktuell wird mit dem Projektpartner 3D-Systems die Anpassung der Laserleistung in dem geringen Leistungsbereich < 50 W diskutiert.

Laserkaustik

Im vorliegenden Anwendungsfall zeigen die Ergebnisse der Kaustikvermessung, dass eine Prozessübertragbarkeit nicht in beide Richtungen durchführbar ist. Die DMP Flex 350 bietet keinerlei Möglichkeit die Laserkaustik anzupassen, sodass durch eine Defokussierung der Aconity Mini eine Prozessübertragbarkeit von der DMP Flex auf die Aconity Mini möglich ist. Die Position und Abmessung der Strahltaile beider Anlagen sind direkt von der verwendeten Laserleistung und dem Abstand zur Arbeitsebene abhängig, wobei die Position bei der Aconity Mini durch die verfahrbare Z-Achse angepasst werden kann. Im Falle der DMP Flex 350 bedeutet das, dass durch die Verschiebung der Strahltaile eine Defokussierung der Laserstrahlung in der Arbeitsebene stattfindet.

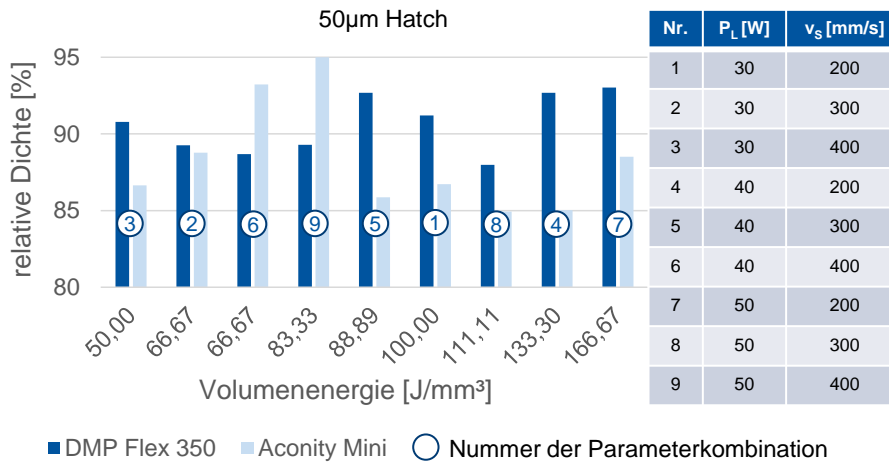
Defokussierung

Durch eine Verschiebung der Z-Achse der Aconity Mini um 2,2 mm in negativer Z-Richtung wird der Spotdurchmesser der Aconity Mini an den Spotdurchmesser der DMP Flex 350 bei 50 W angepasst. Die Verschiebung um 2,2 mm reduziert den Arbeitsabstand der Laseroptik von 220 mm auf 217,8 mm und beeinflusst demnach ebenfalls die Veränderung der Bauteilabmessungen.

In Bild 40 sind die Ergebnisse der Dichteanalyse für die Parameterstudie der Aconity Mini und der DMP Flex 350 für einen Hatchabstand von $50\ \mu\text{m}$ und einer Schichtdicke von $30\ \mu\text{m}$ dargestellt.

Bild 40:

Ergebnisse der Dichteanalyse für die Aconity Mini und DMP Flex 350 mit 50 µm Hatchabstand



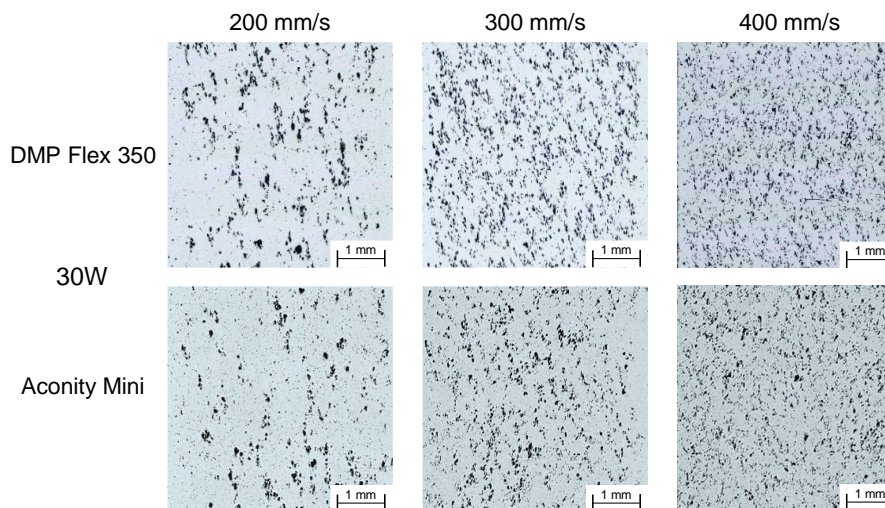
Die größte Abweichung zwischen Aconity Mini und DMP Flex 350 beträgt 7,65% bei Parameterkombination 4. Die auf der Aconity Mini gefertigte Probe weist eine relative Dichte von 85,03% auf, während die relative Dichte bei der DMP Flex 92,68% beträgt. Die geringste Abweichung beträgt 0,48% bei Parameterkombination 2 mit einem Wert von 89,26% für die DMP Flex 350 und 88,78% für die Aconity Mini. Der Durchschnitt der betraglichen Abweichungen liegt bei 4,66%. Eine Systematik der auftretenden Abweichungen wird nicht erkannt.

Defektstrukturen

Für die Parameterkombinationen aus 30 W und 200 – 400 mm/s werden sowohl für einen Hatchabstand von 50 µm als auch für 35 µm mit steigender Scangeschwindigkeit eine Veränderung im Erscheinungsbild der Bindefehler erkennbar. In Bild 41 ist der beschriebene Effekt für einen Hatchabstand von 35 µm bei 30 W für die DMP Flex 350 und die Aconity Mini dargestellt.

Bild 41:

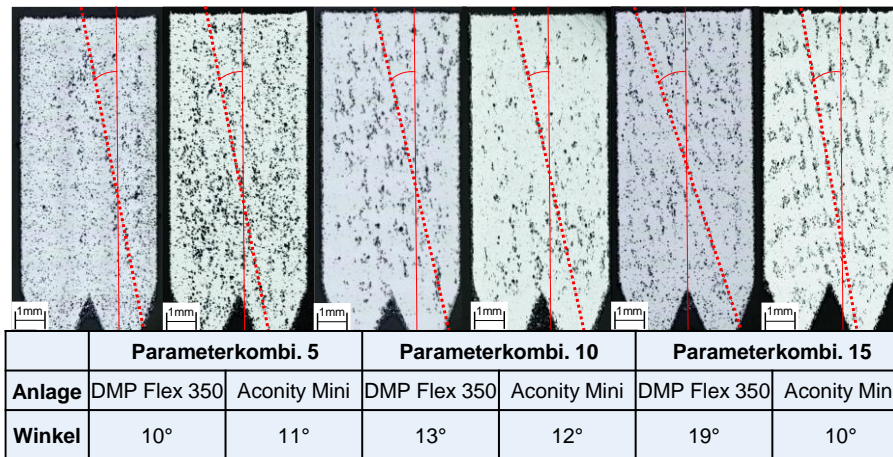
Darstellung der Verkleinerung der Defekte für einen Hatchabstand von 35 µm auf der DMP Flex 350 und Aconity Mini



Die Proben der Parameterkombinationen 5, 10 und 15 weisen orientierte Bindefehler auf, welche jedoch zusätzlich länglich angeordnet sind. In Bild 42 sind lichtmikroskopische Aufnahmen der Defektstrukturen dargestellt und der Ausbreitungswinkel eingetragen.

Bild 42:

Lichtmikroskopische
Aufnahmen der
Defektstrukturen
und
der
Ausbreitungswinkel



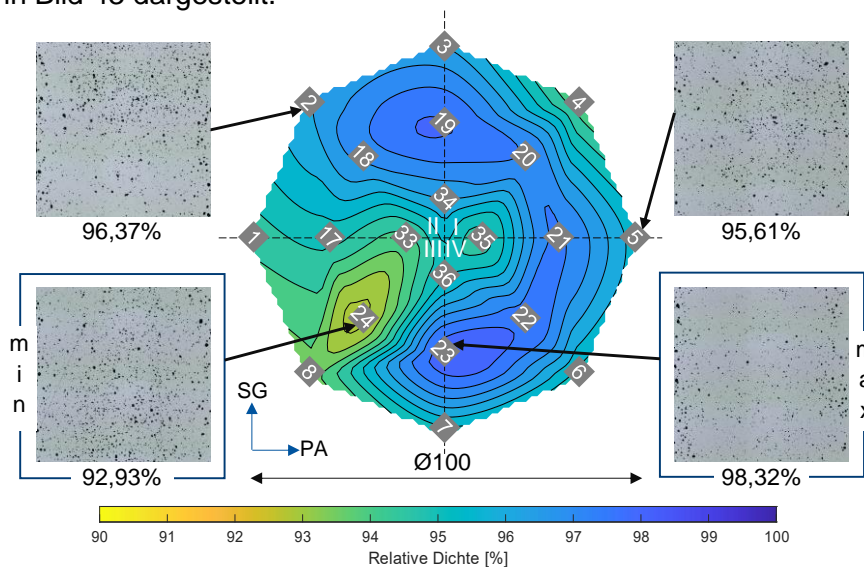
Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist abhängig von der verwendeten Parameterkombination. Obwohl beide Anlagen mit identischen Parameterkombinationen, dem identischen Spotdurchmesser und demselben Pulverwerkstoff arbeiten, sind Abweichungen von mindestens 2,08% bis hin zu 8,84% in der relativen Dichte messbar und keine Systematik in den Abweichungen erkennbar. Somit ist eine Prozessübertragbarkeit allein durch die Analyse der relativen Dichte nicht zielführend. Im Rahmen dieses APs kann kein Prozessfenster mit einer relativen Dichte > 99,5% gefunden werden. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichungen ist der erhöhte Feinanteil im Pulverwerkstoff (vgl. Bild 37). Weitere Einflussfaktoren wie eine unzureichende Schutzgasströmung können die relative Bauteildichte ebenfalls negativ beeinflussen. Durch eine Interaktion zwischen der Laserstrahlung und den unzureichend abtransportierten Prozessnebenprodukten kann es zu einer Streuung oder Absorption der Laserstrahlung kommen und die relative Dichte negativ beeinflusst werden.

Positionsabhängigkeit

Der Einfluss der Bauteilposition auf die Reproduzierbarkeit wird für jede Anlage ausgewertet. Für alle Versuche werden die Querschliffe mit maximaler und minimaler relativer Bauteildichte sowie zwei zufällig ausgewählte Proben dargestellt. Mit Hilfe von Falschfarbenbildern wird der Verlauf der relativen Dichte in Bezug auf die Position auf der Bauplattform dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung zur Positionsabhängigkeit der relativen Dichte für die Aconity Mini bei 50 W, 200 mm/s und 50 µm Hatchabstand sind in Bild 43 dargestellt.

Bild 43:

Positionsabhängigkeit
der relativen Dichte
für die Aconity Mini
bei 50 W, 200 mm/s,
50 µm



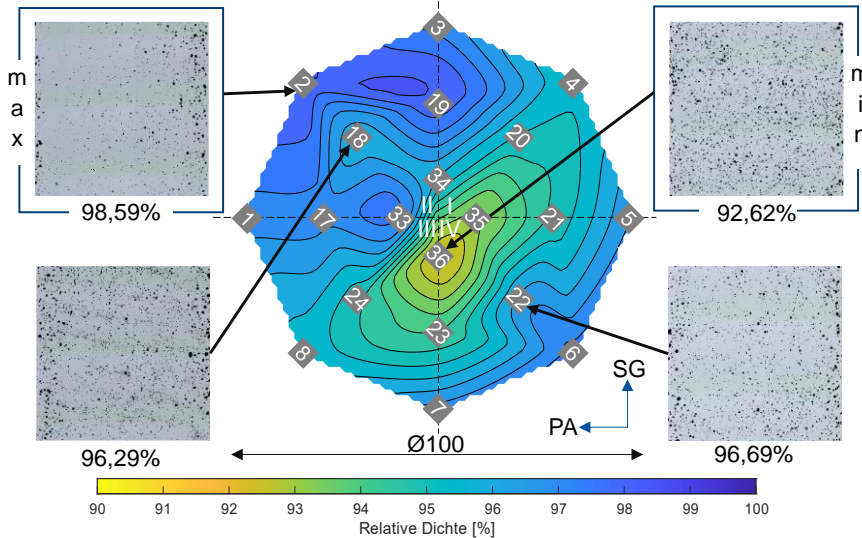
Der Abstand der äußeren Proben zum Zentrum der Substratplatte beträgt 46,75 mm. Die drei maximal gemessenen relativen Dichten betragen 98,32% bei Probe 23, 98% bei Proben 19 und 97,88% bei Probe 22. Die für diese Parameterkombination minimal gemessenen relativen Dichten betragen 92,93% bei

Probe 24, 93,70% für Probe 8 und 93,9% für Probe 4. Die durchschnittliche Dichte für die Parameterkombination beträgt 95,82% bei einer maximalen Schwankung von 5,39% zwischen Minimum und Maximum. Die auftretende Defektstrukturen werden als Gasporen identifiziert. Die Ausprägung der Gasporen steht im direkten Zusammenhang zur relativen Bauteildichte.

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Positionsabhängigkeit der relativen Bauteildichte für die DMP Flex 350 bei 50 W, 200 mm/s und 50 µm Hatchabstand sind in Bild 44 dargestellt.

Bild 44:

Positionsabhängigkeit der relativen Dichte für die DMP Flex bei 50 W, 200 mm/s, 50 µm



Für diese Parameterkombination sind die Probe 2 mit 98,59%, Probe 19 mit 98,37% und Probe 6 mit 97,84% die Proben mit der größten relativen Dichte. Die Gegenseite dazu bilden die Probe 36 mit 92,62%, Probe 35 mit 93,48% und Probe 23 mit 94,6%. Insgesamt ist zwischen Minimal- und Maximalwert eine Schwankung von 5,97% bei einer durchschnittlichen relativen Dichte von 96,28% zu beobachten. Die auftretende Defektstrukturen werden als Gasporen identifiziert.

Aufgrund der Leistungsabhängigkeit der Laserkaustik kann eine erfolgreiche Prozessübertragung eines Parameterfeldes nicht auf ein Parameterfeld mit variiertem Laserleistung übertragen werden. Die Erkenntnisse werden in eine dreiteilige Methodik aufgeteilt:

- Anlagencharakterisierung
- Prozessübertragung
- Untersuchungen zur Positionsabhängigkeit

Die Vorgehensweise ist in einem Flussdiagramm in Abbildung 45 dargestellt und bildet die Grundlage für eine Standardisierung der Prozessübertragung.

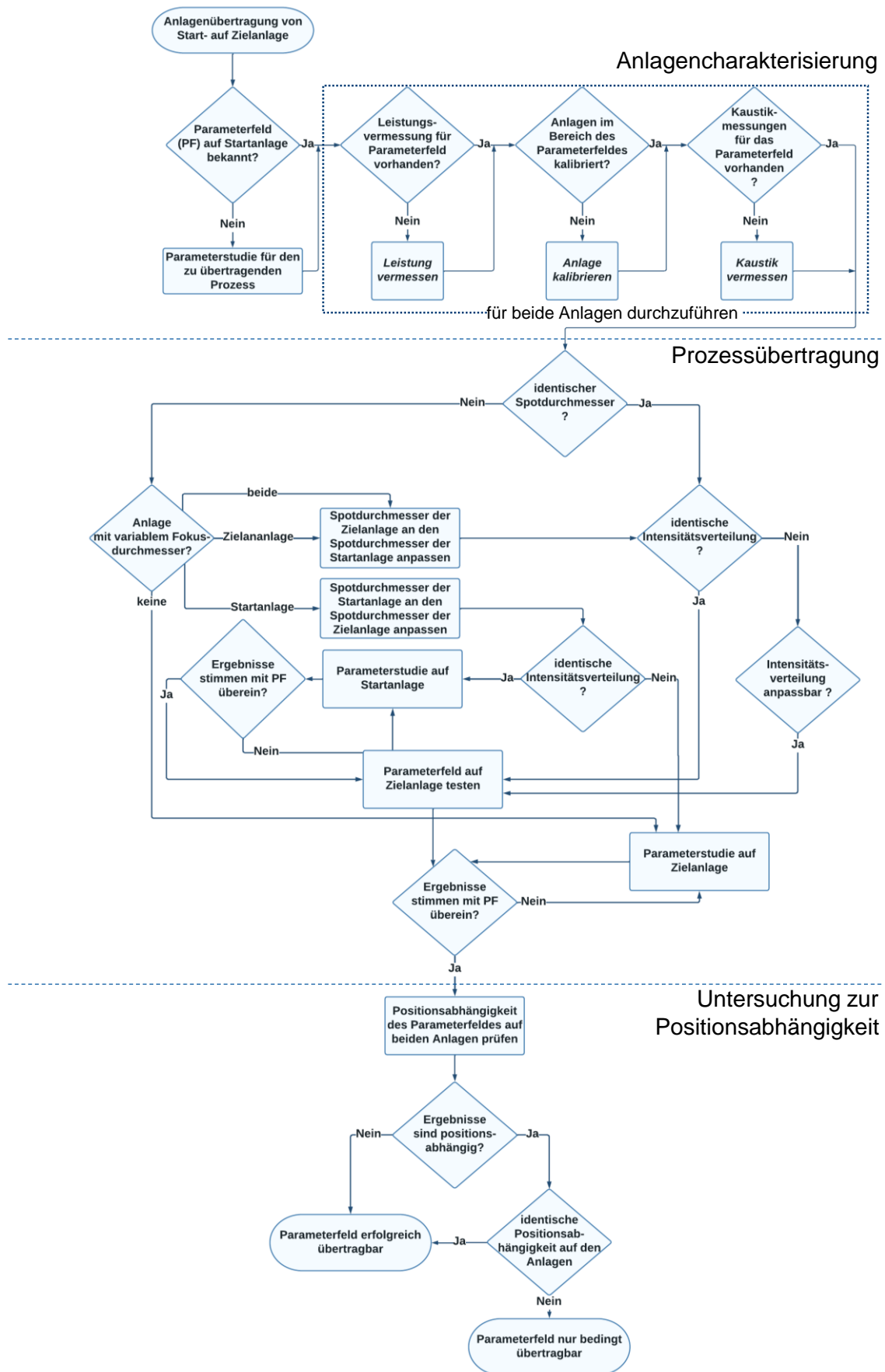


Abbildung 45: Flussdiagramm mit der Vorgehensweise zur Prozess- und Anlagenübertragbarkeit

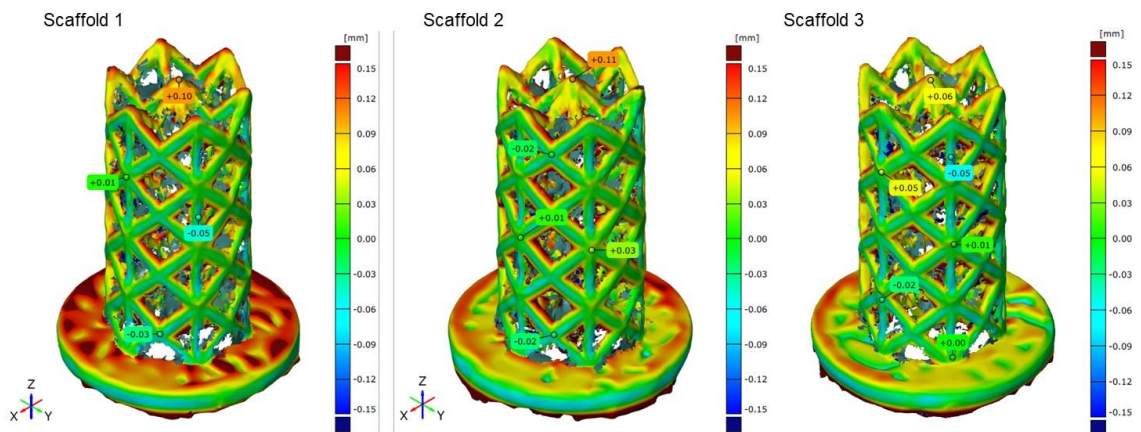
AP2.5 Anlagenmodifikation und Herstellung von Prüfkörpern und Bauteilen im Industriemaßstab

Aus den Ergebnissen der Anlagenübertragbarkeit sind Herausforderungen bei den unterschiedlichen Anlagensystemen der Laboranlage Aconity Mini und der DMP von 3D-Systems herausgearbeitet worden. Aus den Ergebnissen kann eine Methodik zur Herstellung von Prüfkörpern und Bauteilen gemeinsam mit Meotec abgeleitet werden. Aus den Analysen wurde die Pulverqualität als relevanter Punkt herausgearbeitet und wird im weiteren Verlauf der Arbeiten untersucht. Die Herstellung von Bauteilen mit rel. Bauteildichte $< 99,5\%$ ist bereits mit der DMP nachgewiesen. Eine Modifikation der Anlage mit bspw. der Implementierung einer Bauraumverkleinerung wurde bereits mit den Partnern 3D-Systems und Meotec durchgeführt und ist Zwischenbericht 2022 von Meotec beschrieben. Eine Modifikation der Anlagentechnik der DMP von 3D-System ist durch Meotec beschrieben.

Durch die Verzögerungen beim Tierversuch soll weiterhin die Fertigung von Prüfkörpern und Designauslegungen durch den DAP erfolgen bzw. durch den DAP unterstützt werden. Aus diesem Grund wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis Ende 2024 beantragt. Das Design für die ersten Tierversuchsuntersuchungen wurde am DAP entwickelt und in enger Kooperation mit Meotec und Fibrothelium ausgewählt. Das Design ist in AP 4.6 beschrieben, die Fertigung wurde bei Meotec in klinischen Bedingungen durchgeführt. Die Bauteilanalyse der geometrischen Abmessungen wurde am DAP mittels GOM durchgeführt. In Bild 46 ist die geometrische Abweichung im Falschfarbenbild dargestellt. Die Analyse wurde nach dem „Best-Fit“ der Software durchgeführt. Die Abweichung der äußeren Flächen beträgt $< 50 \mu\text{m}$ und ist damit im maßhaltigen Bereich. Die Analyse wurde erneuert nach der oberflächlichen Nachbehandlung durch Beizen durchgeführt. Hier konnten keine Abweichungen festgestellt werden und das Beizen in die Prozesskette mit aufgenommen.

Bild 46:

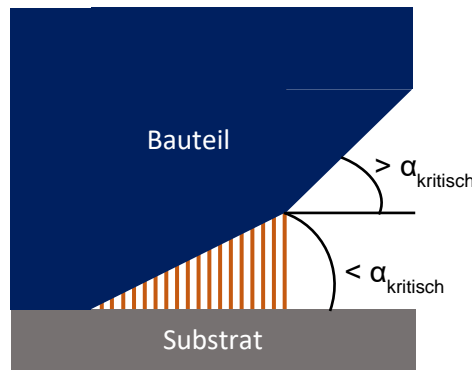
Analyse der Maßhaltigkeit an den Gitterstrukturen für den Tierversuch nach dem Sandstrahlen, und dem zusätzlichen Beizen



AP3.1a: Entwicklung eines Algorithmus zur formangepassten Erzeugung von Gitterstrukturen (a: Algorithmus zur Designerzeugung)

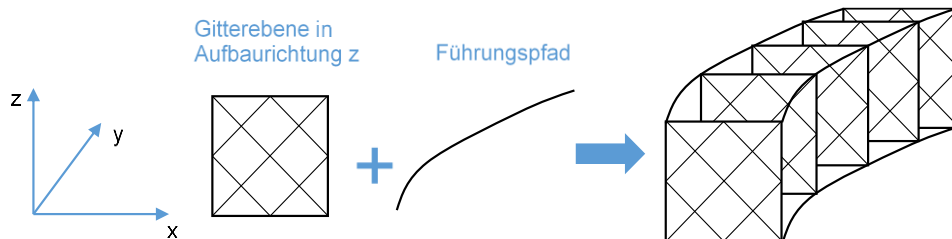
Zur Erzeugung von Gitterstrukturen wird eine Vorgehensweise entwickelt. Als Input werden dazu die Baurichtung des Bauteils, z.B. eines Implantats, sowie der zur Verfügung stehende Designraum der Gitterstrukturen benötigt. Für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF) ist diesbezüglich der sogenannte kritische Überhangwinkel ein materialspezifisches Kriterium. Der Überhangwinkel bezeichnet den Winkel zwischen der nach unten weisenden Fläche eines Überhangmerkmals, z. B. schräge Streben von Gitterstrukturen, und der Substratplatte der LPBF-Maschine. Der minimale Überhangwinkel, der dabei für das Material ohne den Einsatz von Stützstrukturen zu fertigen ist, wird als kritischer Überhangwinkel bezeichnet (vgl. Bild 47). Weitere zu berücksichtigende Kriterien des LPBF-Verfahrens sind die minimale zu fertigende Wandstärke bzw. Strebendurchmesser sowie der minimale Abstand zwischen geometrischen Ausstattungsmerkmalen. Das letzte Kriterium stellt dabei sicher, dass das Pulver aus Engstellen entweichen kann.

Bild 47:
Schematische
Darstellung einer
Stützstruktur für
einen
Überhangbereich
eines Bauteils mit
Überhangwinkel



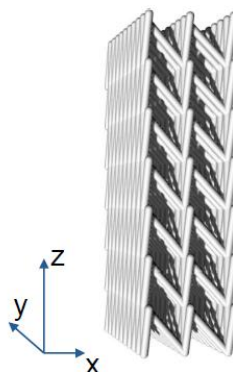
Der bestehende Ansatz in kommerziellen CAD-Softwareprodukten zur Erzeugung von Gitterstrukturen innerhalb eines gegebenen Designraums besteht darin, eine Einheitszelle zu verwenden, diese innerhalb des Designraums zu vervielfältigen und anschließend die Streben im Randbereich so zu trimmen, dass alle Streben innerhalb des Designraums liegen. Dieser Ansatz kann durch die Einführung eines Führungspfades, wie in Bild 48 dargestellt, verbessert werden. Im Rahmen dieses Ansatzes wird eine Gitterebene verwendet, in der alle Teilstreben einen Überhangwinkel besitzen, der größer als der kritische Überhangwinkel ist. Diese Gitterebene wird im Designraum entlang des Führungspfades vervielfältigt und mit interplanaren Streben so verbunden, dass die Überhangwinkel ebenfalls größer als der kritische Überhangwinkel sind. Der Ansatz wird als planare Gittergenerierung bezeichnet und garantiert algorithmisch, dass für alle Gitterstreben der Überhangwinkel unkritisch bleibt.

Bild 48:
Schematische
Darstellung des
pfadbasierten
Gittergenerators



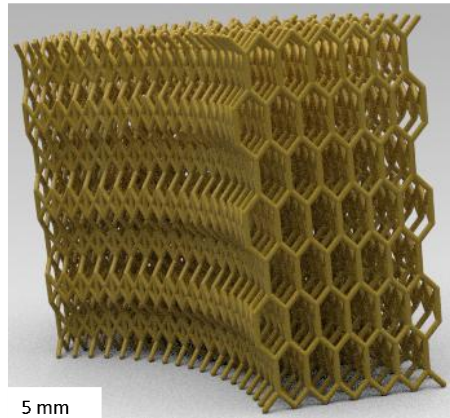
Dieser Algorithmus zur Gittererzeugung wird mit einer Materialdatenbank verknüpft, aus welcher der materialspezifische kritische Überhangwinkel ausgelesen werden kann. Die Materialdaten werden für die unterschiedlichen entwickelte Legierungen experimentell ermittelt und in der Datenbank gespeichert. Ein auf diese Weise mit dem entwickelten Gittergenerator erzeugte Gitterstruktur ist in Bild 49 dargestellt. Der Algorithmus erzeugt die Gitterstrukturen in Echtzeit. Die verwendete Darstellung ist zunächst eine vereinfachte Form, d.h. die Streben werden als Linien dargestellt und ihre Durchmesser werden in einer ASCII/Binärdatei gespeichert (vgl. Bild 48) und anschließend den Streben eine Dicke zugewiesen sowie als 3D-Struktur gespeichert und für die additive Fertigung aufbereitet werden.

Bild 49:
Beispielhafte
Gitterstruktur
erzeugt mit sweep-
basierten Ansatz
auf Grundlage einer
Materialdatenbank
mit rechtseitiger
planarer
Gitterebene und
einseitigen
Verbindungsstreben



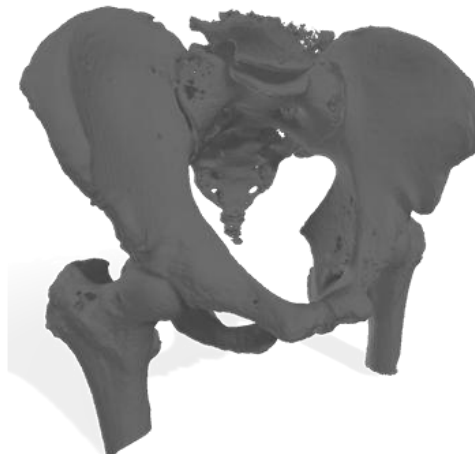
Die neben der Geometrie technisch relevanten patientenspezifischen Daten, wie z.B. die Umgebungseinflüsse der Stelle im Körper, an der ein Implantat eingesetzt werden soll, werden in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern im Konsortium gewonnen, abgespeichert und mit dem Gittergenerator verknüpft. Eine der wichtigsten Umgebungseinflüsse dabei ist die Korrosionsrate, in der ein Implantat eingesetzt wird. Diese wird benötigt, um die Strebendurchmesser des Gitters so anzupassen, dass das bioresorbierbare Implantat nach der vom Arzt vorgegebenen Zeit im Körper resorbiert wird. Im Rahmen des Projekts konnte ohne Zustimmung der Ethikkommission nicht auf reale Patientendaten zurückgegriffen werden. Entsprechend ist in Bild 50 eine mögliche patientenindividuelle Struktur mit hexagonalen Abmessungen dargestellt.

Bild 50:
Schematische
Darstellung der
Rotation einer
hexagonalen
prozeduralen Ebene
mit einer Größe von
15 mm x 30 mm um
eine Achse (Winkel:
70°)



In Bild 51 ist eine 3D-Darstellung eines Beckens dargestellt. Für ein Folgeprojekt können einige Abschnitte des Oberschenkelknochens abgetrennt und durch ein Implantat mit integriertem Gitter ersetzt werden. Dies erfordert auch eine Weiterentwicklung des Algorithmus, so dass das Gitter an die Außenfläche des Oberschenkelknochens angepasst wird. Ein Demonstrator in der Form eines bioresorbierbaren Implantats für den Oberschenkelknochen kann anschließend additiv mit denen in diesem Projekt entwickelten Legierungen hergestellt werden. Die Umsetzung dieser geometrischen Anpassung erfolgt in engem Austausch zu 3D Systems und der zur Verfügung gestellten Software 3D Xpert.

Bild 51: Schematische
3D Darstellung eines
Beckens, basierend
auf einer
Computertomographie
(Quelle: Meotec)



Das entwickelte Tool zur Gittergenerierung benötigt die Baurichtung des Bauteils, in dem Gitter integriert werden sollen, und die Herstellbarkeitsbedingungen des ausgewählten Materials in der verwendeten LPBF-Anlage. Im Allgemeinen können die Herstellbarkeitsbedingungen für ein Material unterschiedlich sein, wenn das Material auf zwei verschiedenen LPBF-Anlagen verarbeitet wird. Daher sollten die Herstellbarkeitsbedingungen für jede einzelne Paarung aus Material und LPBF-Anlage in einer Materialdatenbank gespeichert werden, wie in AP3.2 beschrieben. Herstellbarkeitsbeschränkungen, wie z. B. der minimal zulässige Abstand zwischen geometrischen Merkmalen der LPBF-gefertigten Teile oder

der minimale Überhangwinkel, sind stark materialabhängig und werden durch Experimente ermittelt. Da die generierten Gitterstrukturen Herstellbarkeitsbeschränkungen berücksichtigen, kann ein Versagen im Gitterdesignraum bei der Fertigung während des LPBF-Prozesses von Bauteilen, in denen Gitter integriert werden, verhindert werden.

Um die Anwendbarkeit des algorithmischen Ansatzes für das Design von Gitterstrukturen für LPBF zu demonstrieren, werden zwei verschiedene Kategorien von Gitterstrukturen betrachtet. Als erstes wird der Algorithmus für die Erzeugung von 2D-Oberflächenadaptiven Gitterstrukturen angewendet, um zu zeigen, dass die erzeugten Gitter geometrisch angepasst sind. Eine Anwendung dieser Gitterart sind Stents. Ein typischer Stent, der mit dem Designtool erstellt wurde, ist in Bild 52 dargestellt.

Bild 52:

Design von Stents
generiert durch
einen
algorithmischen
Ansatz zur
Erzeugung von
Gitterstrukturen für
LPBF

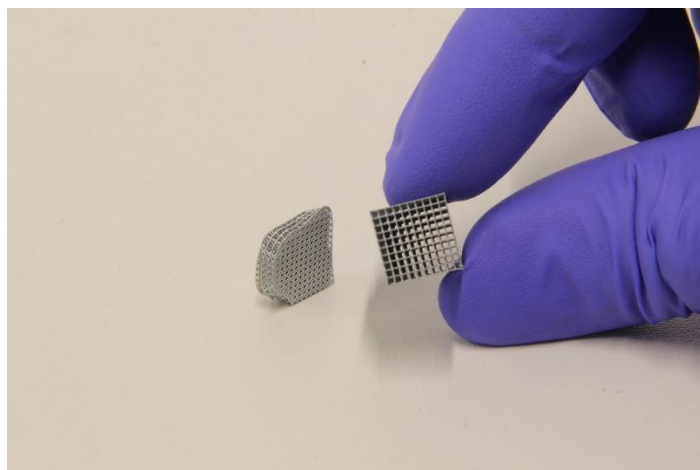


3 mm

Zusätzlich wird der Algorithmus für die Erzeugung von 3D-Gitterstrukturen eingesetzt. Der Algorithmus wird für das Design eines Teils für einen Unterkiefer verwendet, bei dem Teile des Unterkieferknochens fehlen. Beispielsweise aufgrund von Zahnverlust oder Zahnfleischerkrankungen. Die Idee ist, bioresorbierbare Gitter für die Regeneration des Kieferknochens zu verwenden, wodurch eine zweite Operation überflüssig werden könnte. Nach der Regeneration ist dann genügend neu gewachsener Knochen im Kiefer vorhanden, um ein Zahnimplantat zu tragen. Da für die Gitterintegration nur ein kleines Volumen des Unterkiefers verwendet wird, wurde die effektive Materialeigenschaft der Gitter durch die Verwendung einheitlicher Gitterstrukturen mit gleichem Strebendurchmesser konstant gehalten. Es wird eine f2cc, z-Einheitszelle mit einer Größe von $3 \times 3 \times 3$ mm³ verwendet, wobei die Strebendurchmesser 200 µm betragen. Außerdem wurden die getrimmten Streben durch B-Splines verbunden. Das konstruierte Teil wurde hergestellt, um die Genauigkeit und Anwendbarkeit des Ansatzes in der Praxis zu zeigen (vgl. Bild 53). Die geometrisch angepasste Version der Gitterstrukturen kann in einem nächsten Schritt auf einen größeren Bereich von Unterkieferknochen angewendet werden.

Bild 53:

Darstellung eines
Gitterprüfkörpers
und einem
angepassten
Kieferausschnitt



5 mm

AP3.1b: Entwicklung eines Algorithmus zur formangepassten Erzeugung von Gitterstrukturen (b: Erforschung eines Datenformates und der Visualisierung der Gitterstrukturen)

Eine Herausforderung beim Design von Gitterstrukturen ist ihre Visualisierung und das Datenhandling zwischen den Softwareprodukten. Aus diesem Grund werden Gitterstrukturen anstelle einer volumetrischen Darstellung als Linien visualisiert. Auf diese Weise wird die Datenmenge der Visualisierung verringert und die Bearbeitung von großen Gitterstrukturen mit CAD-Software ermöglicht. Das Gitter besteht in dieser Form aus Streben, wobei jede Strebe durch die Koordinaten der Endpunkte sowie den Querschnittsparameter der beiden Strebenendpunkte definiert wird. Diese Darstellung kann für verschiedene Querschnitte verallgemeinert werden. Das entwickelte Format ist in Bild 54 dargestellt. Zur Verwendung dieses Formats, ist ein Lese- und Schreibprogramm in Rhino (kommerzielle computergestützte Konstruktionssoftware für 3D-Anwendungen) entwickelt worden. Beim Einlesen der Datei werden die Streben ohne Einbezug der Querschnittsdaten in Form von Linien visualisiert. Das Format kann bei Bedarf bearbeitet werden, um zusätzliche Informationen von Gitterstrukturen zu speichern. Beispielsweise können geometrische Formen wie Kugeln in den Endpunkten der Streben hinzugefügt werden. Dadurch wird eine feste Verbindung an den Verbindungspunkten zwischen verschiedenen Streben gewährleistet.

Bild 54:	a)	b)
Format zur Speicherung von Gitterstrukturen:	Querschnittstyp	Querschnittstyp
a) Generelles Format,	Kreisförmig/Quadratisch/Hexagonal/...	Kreisförmig
b) Format für kreisförmigen Querschnitt	Strebenanzahl	Strebenanzahl
	n	n
	Streben	Streben
	0 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} CSP_1 CSP_2 \dots$	0 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} D_1 D_2$
	1 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} CSP_1 CSP_2 \dots$	1 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} D_1 D_2$

	n-1 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} CSP_1 CSP_2 \dots$	n-1 $P_{1x} P_{1y} P_{1z} P_{2x} P_{2y} P_{2z} D_1 D_2$

P_x, P_y, P_z : Koordinaten des Strebenendpunkts
D: Durchmesser
CSP: Querschnittsparameter

Ein Unterprogramm zum Lesen dieses Formats wurde geschrieben, um Gitterstrukturen in Rhino zu visualisieren. Ein weiteres Unterprogramm wurde geschrieben, um Gitterstrukturen in dem entwickelten Format zu speichern. Außerdem kann das Format verwendet werden, um eine volumetrische Version der linienförmigen Streben in einer CAD-Software wie beispielsweise Rhino zu erstellen. Die linienförmigen Streben können auch in Dreiecke umgewandelt und als STL-Dateiformat mit Dendro in Rhino gespeichert werden. Da Dendro auf der OpenVDB-Bibliothek aufbaut, können die Ergebnisse in jede Software wie beispielsweise 3DXpert implementiert werden. Dieser Schritt wird als nächstes in Zusammenarbeit mit 3D Systems durchgeführt.

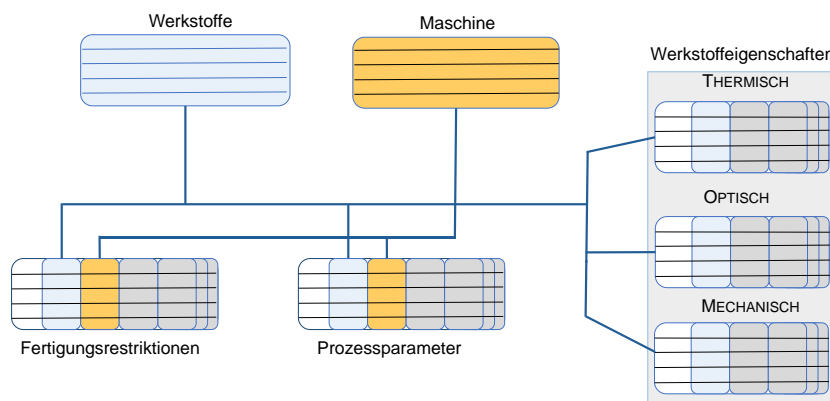
AP3.2: Entwicklung einer material- und nachbearbeitungsspezifischen Datenbank

Wie in AP3.1a beschrieben, sollen die Herstellbarkeitsbedingungen des LPBF-Prozesses in das Tool zur Erzeugung von Gitterstrukturen implementiert werden. Diese Daten können zusammen mit anderen Materialeigenschaften für jede Paarung bestehend aus Material und LPBF-Maschine in einer Materialdatenbank gespeichert werden. Eine erste Version einer Datenbank wird mit MySQL erstellt, in der auf der Grundlage des gewählten Materials und der LPBF-Anlage auf die Prozess- und Materialeigenschaften zugegriffen werden kann. Darüber hinaus können bei einer neuen Maschinen- und LPBF-Anlagenpaarung neue Daten in die Datenbank eingepflegt werden. Die eingegebenen Daten können zudem modifiziert werden. In diesem Projekt werden die Daten für zwei Paarungen gespeichert: a) DAP:

Zn1Mg und Labor-LPBF-Anlage sowie b) Meotec: Zn1Mg und kommerzielle LPBF-Anlage. Bislang können in der Datenbank Daten zur Herstellbarkeit (experimentell ermittelt wie in AP1.4 beschrieben), LPBF-Prozessdaten wie Hatch-Abstand, Laserleistung und Geschwindigkeit der Scan-Vektoren, mechanische Eigenschaften wie die Daten aus dem einachsigen Zugversuch sowie korrosive Eigenschaften gespeichert werden. Wie bereits in den Erläuterungen zu AP3.1 gezeigt ist die Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen im Algorithmus zur Erzeugung der Gitterstrukturen von entscheidender Bedeutung. Dazu werden die experimentell in AP 2 ermittelten Daten interpretiert und in der Materialdatenbank gespeichert. Da die Restriktionen stark abhängig von den Prozessparameter, Maschinenspezifikationen und dem eingesetzten Material sind, werden diese in der Datenbank berücksichtigt. So sind beispielsweise Überhangwinkel für die Zn1Mg-Legierung gefertigt auf der Aconity MINI am DAP nur oberhalb von 35° zulässig, da bei geringeren Überhangwinkeln die zulässige Oberflächenrauheit überschritten wird. Neben dem Überhangwinkel können die minimalen Strebendurchmesser, die minimale Spaltengröße zwischen einzelnen Streben und auch mechanische Materialkennwerte in der Datenbank hinterlegt werden. In Bild 55 ist der konzeptionelle Aufbau der Datenbank gezeigt.

Bild 55:

Konzeptioneller Aufbau der materialspezifischen Datenbank.



Bezogen auf die Nachbearbeitung werden die folgenden Verfahren untersucht und hinsichtlich Umsetzbarkeit und erreichbare Oberflächenrauheit in die Datenbank implementiert:

- Sandstrahlen
- Eigenstrahlgut-Strahlen
- Elektrochemische Nachbearbeitung

Alle Verfahren eignen sich zu Oberflächenmodifikation, wobei für folgende Untersuchungen auf der Sandstrahlen aufgrund von Kontamination durch Fremdpartikel verzichtet wird.

AP3.3: Entwicklung einer patientenspezifischen Datenbank

Der Rahmen einer Datenbank für Patientendaten wird entwickelt, um Daten wie Alter oder Knochendichte von Patienten zu speichern. Hierbei arbeiten DAP, Meotec und Matricel/Fibrothelium zusammen, um zu entscheiden, welche Daten sinnvollerweise gespeichert werden sollten. Diese Datenbank wird ebenfalls mittels MySQL erstellt. Die gespeicherten Daten können mit dem Tool zur Gittergenerierung oder anderer Software, beispielsweise für Simulations- oder Validierungszwecke, verwendet werden.

Neben den Fertigungs- und Designbeschränkungen wird für die Berücksichtigung patientenindividueller Randbedingungen eine Patientendatenbank benötigt. So sollte bspw. das Alter berücksichtigt werden, da sich die Knochendichte über das Alter verändert. So nimmt die Knochendichte bis zum 25 Lebensjahr zu, bleibt dann ca. konstant und nimmt ab dem 50 Lebensjahr ab. Dieser Effekt ist zusätzlich abhängig vom Geschlecht. Ein weiterer Faktor ist die Korrosionsrate innerhalb des Körpers, diese kann jedoch nur aus in vivo Tests abgeleitet werden. Die gespeicherten Daten können mit dem Tool zur Gittergenerierung oder anderer Software, beispielsweise für Simulations- oder Validierungszwecke, verwendet werden. Wie bereits beschrieben, kann im Rahmen dieses Projektes nicht auf die realen Patientendaten zurückgegriffen werden. Die Datenbank (vgl. Bild 55) wurde entsprechend für weitere Input-Variablen erweitert.

AP3.4: Implementierung der Datenbank in den Algorithmus

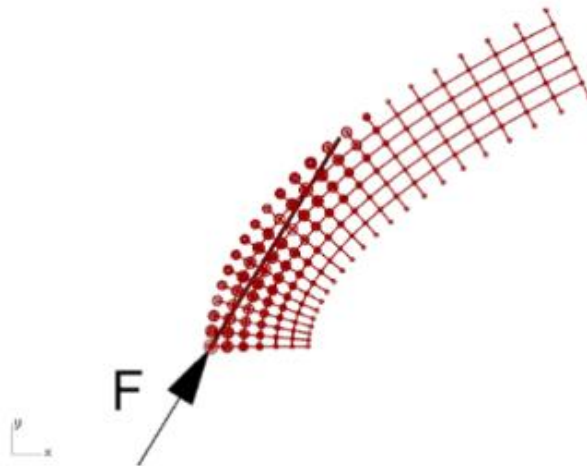
In AP 3.4 werden die Ergebnisse der APs 3.1-3.3 zusammengeführt und die Datenbanken in den Algorithmus integriert. Die Implementierung erfolgt in dem Rhinoceros 3D Plugin Grasshopper 3D. In dieser Software wählt man bspw. nur noch ein Material als Randbedingung ausgewählt werden. LPBF spezifische materialabhängige Charakteristiken wie Überhangwinkel oder minimale Geometrielemente werden dann automatisiert auf die Bauteilauslegung angewendet. Damit werden dann bspw. die Winkel in der Gitterstruktur der planaren Ebene sowie die Winkel der Übergangstreben definiert.

AP3.5: Zuordnung von individuellen Anforderungen zu verschiedenen Bereichen im Bauteil

Die wichtigsten Eigenschaften der Gitterstrukturen sind die mechanischen Eigenschaften und Korrosionseigenschaften. Diese lassen sich bei gleichem Material und gleicher Einheitszelle am besten mit Hilfe des Strebendurchmessers anpassen. Durch die Implementierung der Datenstruktur einer Strebe als Linienelement mit Durchmesser am Start und Endpunkt jeder Strebe lassen sich auch transiente Strebendurchmesser effizient implementieren. Ein Beispiel einer Anpassung der Strebendurchmesser nach Kraftfluss in einer Gitterstruktur im 2D-Fall ist in Bild 56 gezeigt.

Bild 56:

Lastangepasster
Streben-
durchmesser in
einer
Gitterstruktur



Der Rahmen einer Datenbank für Patientendaten wird entwickelt, um Daten wie Alter oder Knochendichte von Patienten zu speichern. Hierbei arbeiten DAP, Meotec und Fibrothelium zusammen, um zu entscheiden, welche Daten sinnvollerweise gespeichert werden sollten. Diese Datenbank wird ebenfalls mittels MySQL erstellt. Die gespeicherten Daten können mit dem Tool zur Gittergenerierung oder anderer Software, beispielsweise für Simulations- oder Validierungszwecke, verwendet werden.

Die Herausforderung, die sich während des Arbeitspaketes ergeben haben, sind die patientenbezogenen Daten. Auf Daten dieser Art kann nicht im Rahmen dieses Vorhabens zurückgegriffen werden. Hier wurde auf bekannte Daten zurückgegriffen und die Datenbank ergänzt. Beliebige Geometrien können im Design erstellt werden und die Validierung zu Fertigung mittels LPBF ist abgeschlossen.

AP3.6: Vergleich von gefertigter Gitterstruktur zum digitalen Modell und iterative Anpassung des Algorithmus

Die gefertigten Probekörper werden mittels Streifenlichtprojektion vermessen. Die Abweichungen werden identifiziert und können in der Prozesskette zur Kompensation der Geometrie angepasst werden. Die gefertigten Strukturen aus ZnMg werden durch die Qualitätssicherung mittels GOM erfasst und hinsichtlich der Original-Abmessungen verglichen, vgl. AP1.4 und AP2.5. Eine Kompensation muss in diesem Fall nicht erfolgen, da in AP1.2 eine Spurbreitenkompensation bereits erfolgt ist und auf nahezu beliebig komplexe Strukturen gleich angewendet wird. Die Spurbreitenkompensation ist in der Datenbank hinterlegt.

AP4.3: Implementierung des Algorithmus in die Prozesskette

Der letzte Schritt in der Erzeugung der Gitterstruktur ist die Verschneidung der einzelnen Streben. Das Verschneiden kann mit 3DXpert bei Gittern mit einer Strebenanzahl < 1000 durchgeführt werden. Diese Gitter können als STL-Dateien gespeichert und dann in 3DXpert importiert und verschnitten werden. Die Gitter mit Strebenanzahl > 1000 können als STEP- oder IGES-Dateien gespeichert, jedoch aufgrund der Datenmenge nicht in 3DXpert verschnitten werden.

Eine Lösung bietet hier die Verwendung von 3mf-Dateien. Diese enthalten alle notwendigen Modell-, Material- und Eigenschaftsinformationen in einem einzigen Archiv und unterstützt benutzerfreundliche Formate wie XML. Weitere Vorteile sind die Erweiterbarkeit sowie die kostenlose Verfügbarkeit. Außerdem kann dieses Dateiformat zur Ausgabe verschiedener Gitter-, Baum- oder anderer Balken-basierter Strukturen verwendet werden.

Durch die Verwendung der Lib3MF-Bibliothek (<https://3mf.io/specification/>) wurde das Konvertieren des 3mf-kompatiblen Formats in das 3mf-Format durchgeführt. Die Wirksamkeit dieses Vorgehens wurde anhand eines Gitters mit 114.030 Streben getestet.

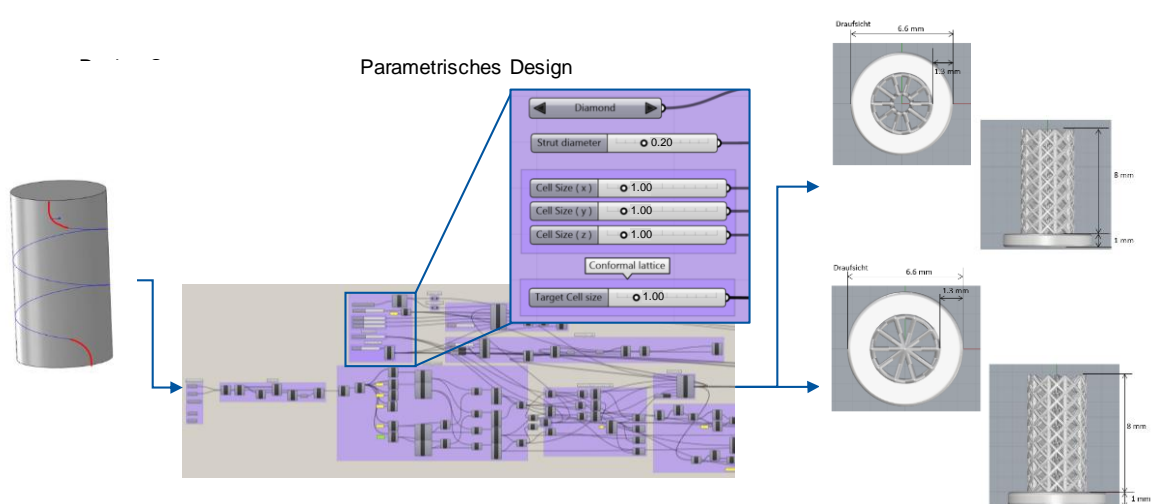
Der Halbzeitmeilenstein nach 24 Monaten (Erzeugung und Visualisierung der Gitterstrukturen (Strebenanzahl > 5000) durch den Algorithmus, sowie eine erste automatisierte Anpassung der Gitterstrukturen aufgrund von Veränderungen in den entwickelten Datenbanken (Proof of concept) konnte somit erreicht werden.

AP4.6: Anwendung der gesamten Prozesskette anhand eines Demonstrators und Herstellung auf der Industrieanlage

Die Herstellung der Probekörper auf einer Industrieanlage erfolgt bei Meotec. Hier kann eine Pulverkontamination durch Fremdpartikel ausgeschlossen werden. Das Design des Demonstrators mit der Prozesskette zur Auslegung erfolgt am DAP. Die gesamte Prozesskette wird anhand einer Gittergeometrie angewendet, die für den Tierversuch genutzt werden sollen. Am DAP wird das Design parametrisch mittels Rhino und dem Plugin Grasshopper erzeugt. In Bild 57 ist links die Grundform dargestellt und durch den Algorithmus werden definierte Gitterstrukturen in das Volumen eingerechnet. Die Gitterzellen werden entsprechend der Datenbank ausgewählt und mit der Gewünschten Geometrie zusammengeführt. Unterschiedliche Sturkturen werden gefertigt und im Konsortium mit den Partner die passenden Geometrien für den Tierversuch ausgewählt. Final findet die Fertigung der Zn1Mg-Gitter bei Meotec statt. Als Nachgelagerten Schritt wird entsprechend der Datenbank das Beizen ausgewählt und für die Tierversuche vorbereitet.

Bild 57:

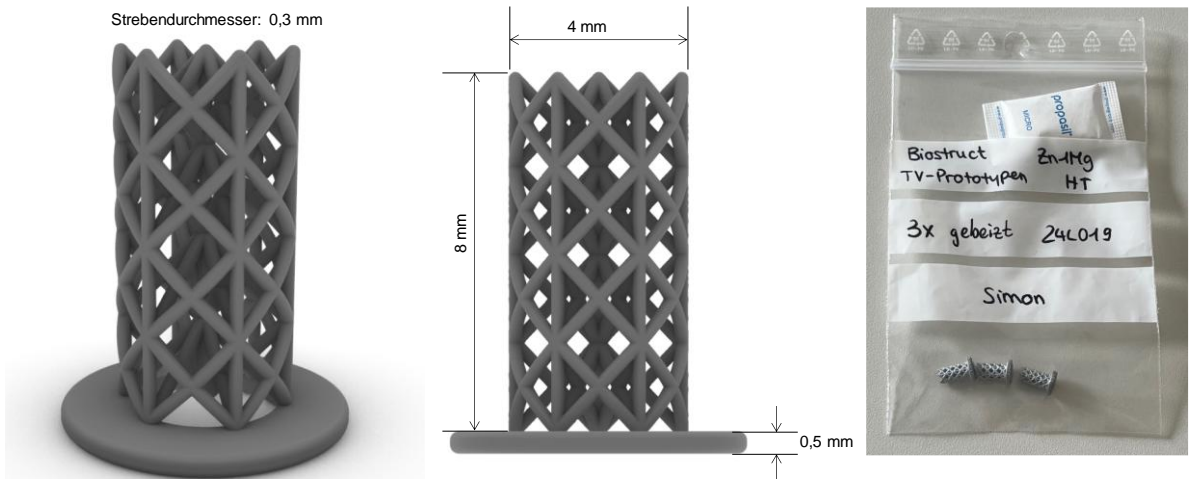
Konzeptioneller Aufbau der materialspezifischen Datenbank.



In Bild 58 ist links das CAD-Modell der Gitterstrukturen in den ausgewählten Abmessungen dargestellt. Auf der rechten Seite sind die bei Meotec gefertigten Gitterstrukturen abgebildet. Diese wurden mittels GOM am DAP auf Maßhaltigkeit hin untersucht (vgl. AP2.5).

Bild 55:

Links: CAD-Modell der Gitterstrukturen
rechts: gefertigte Prototypen aus Zn1Mg



AP5.1: Analysieren und spezifizieren der Oberflächeneigenschaften

Am DAP werden in AP1.5 die Geometrien zur Untersuchung der Oberflächeneigenschaften (Beschichtungstests, Nachbehandlungstests) nach Rücksprache mit Meotec additiv aus Zn1Mg gefertigt. Die Geometrien sind in der Form einer Disk und einer Gitterstruktur mit einer Halterung am oberen Rand, wie in Bild 56 dargestellt. Durch die Nachbearbeitungsverfahren bei Meotec wird die Oberfläche modifiziert und gemeinsam mit dem DAP hinsichtlich der Eignung als Implantat-Material analysiert und bewertet.

Bild 56:

Gitterstrukturen und Disks am DAP gefertigt aus Zn1Mg mittels LPBF zur Nachbearbeitung bei Meotec

