

# Schlussbericht vom 20.05.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20325 N

## Thema

Qualifizierung der Additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte

## Berichtszeitraum

01.01.2019 bis 31.12.2021

## Forschungsvereinigung

Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

1. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
2. Fraunhofer-Institut Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV)
3. Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde (MPA-IfW)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## 1 Kurzfassung

### **Qualifizierung der Additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte (20325 N)**

Additive Fertigungsverfahren, insbesondere das pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen (PBF-LB/M), ermöglichen die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, die konventionell bisher nur sehr kosten- und/oder zeitintensiv hergestellt oder teilweise überhaupt nicht realisiert werden können.

Während in zahlreichen Industriezweigen die Einsatztiefe von PBF-LB/M -Verfahren stark zunimmt, bestehen für die Fertigung von Bauteilen für Druckgeräte noch Hemmnisse und Sicherheitsbedenken hinsichtlich des Einsatzes dieser Technologien. Fehlende einheitliche und akzeptierte Standards und Normen zur Erfüllung der Druckgeräterichtlinie für den Bereich der additiven Fertigungsverfahren von Druckgeräten stellen ein gravierendes Hemmnis für die Akzeptanz und schlussendlich den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Bereich der Druckgeräte dar. Als ein wesentlicher Punkt ist dabei die mangelnde Kenntnis hinsichtlich der erreichbaren Werkstoff- und Bauteileigenschaften zu nennen. Während es bereits viele Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von unterschiedlichen Werkstoffen gibt, ist deren Reproduzierbarkeit noch weitgehend unbekannt. Der Zusammenhang zwischen Werkstoffzustand, Werkstoffeigenschaften und letztendlich der Beanspruchbarkeit des Bauteils ist für die additive Herstellung von Druckgeräten mit komplexer Geometrie ebenso zu berücksichtigen wie eine mögliche Bauteilrestporosität in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und Orientierung im Bauraum.

Aufgrund der fehlenden, validierten Materialeigenschaften, die zur Berechnung eines Druckgerätes benötigt werden, reduziert sich die Ausschöpfung der Potenziale des PBF-LB/M Prozesses in derzeitigen Anwendungen maßgeblich. Darüber hinaus erhöhen sich gleichzeitig die Sicherheitsbedenken, die gegen eine Nutzung dieser Fertigungstechnologie bestehen.

Die in dem beantragten Projekt zu erzielenden Ergebnisse bilden die Grundlage für die Etablierung von PBF-LB/M -Verfahren zur Herstellung von Druckgeräten. Dazu sollen für die richtlinienkonforme Fertigung von Druckgeräten entsprechende Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren und wirtschaftlichen Einsatz des PBF-LB/M - Verfahrens zur Herstellung von Druckgeräten erarbeitet werden, die sowohl die Bauteilauslegung als auch die Bauteilprüfung, Risikobeurteilung und Tolerierung der Prozessparameter berücksichtigen. Damit liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag Qualifizierung der Additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte.

Die Zielsetzung von QuAFD ist die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Geometrie, Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften. Im Fokus des Projekts liegt daher die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften mit dem Ziel, kennwertbasiert Rückschlüsse auf auslegungsrelevante Kenngrößen zu ziehen. Als Werkstoff

wird nach Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss (pbA) im Rahmen des Projektes ausschließlich der austenitische Stahl 316L (1.4404) untersucht.

Dazu wurde in einem Spiegelversuch zuerst die Übertragbarkeit von mechanischen Eigenschaften auf verschiedene Fertigungsstandorte bei gleichem Prozesssetup mittels quasi-statischen Zugversuchen untersucht. Der Vergleich zeigt signifikante Unterschiede in den erzielten mechanischen Kennwerten zwischen den Fertigungsstandorten und damit keine Übertragbarkeit der mechanischen Eigenschaften. Die mechanischen Kennwerte beider Fertigungsstandorte zeigen eine starke Anisotropie der mechanischen Eigenschaften. Ein Vergleich zu konventionellem Blechmaterial zeigt deutlich höhere Dehngrenzen, vergleichbare Zugfestigkeit und deutlich geringere Bruchdehnung in horizontaler Richtung.

Die lichtmikroskopische Gefügeanalyse zeigt eine typische PBF-LB/M Mikrostruktur für den austenitischen Stahl 316L mit ausgeprägten Schmelzbadgrenzen und in Baurichtung langgezogenen Körnern, die Schmelzbad-übergreifend vorliegen. XRD-Messungen an den gefertigten Proben zeigen keine Hinweise auf fertigungsbedingte Martensitbildung.

Eigen Spannungsmessungen zeigen hohe Zugeigen spannungen unter der Oberfläche in Bau richtung und Abhängigkeiten zur Neigung, Ausrichtung und Wandstärke. Eine Wärmebehandlung zu Reduktion von Eigen spannungen wurde exemplarisch durchgeführt und der Nutzen einer Wärmebehandlung bewertet. Die durchgeführte Wärmebehandlung zeigt keine signifikante Reduktion der Eigen spannungen, jedoch konnte eine Verringerung der mechanischen Kennwerte im quasi-statischen Zugversuch beobachtet werden. Auf eine weiterführende Untersuchung der Wärmebehandlung wurde dementsprechend nach Absprache mit dem pbA verzichtet.

Ein Vergleich verschiedener Probengeometrien zeigen Abhängigkeiten der Werkstoffeigenschaften zu den Wandungsmerkmalen Neigung, Ausrichtung und Wandstärke sowie der Porosität zur Neigung und Wandstärke. Als Abhängigkeiten werden dabei im Schlussbericht Haupteffekte nach Design of Experiments (DoE) bezeichnet. Die Neigung stellt die Aufbauorientierung der Probe im Bauraum dar und wird mit Hilfe des Winkels zwischen Wandebene und Baurichtung quantifiziert.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde im Folgenden das Wandungs- und Orientierungsabhängige Material (WOrM-) Modell zur Erfassung und Vorhersage des Werkstoffzustands in Abhängigkeit der Wandungsmerkmale eingeführt, welches Rückschlüsse von Wandungsmerkmalen (Neigung, Wandstärke und Ausrichtung) auf Werkstoffzustand (Porosität, Rauheit und Kornstruktur) sowie auf Werkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung, Härte) ermöglichen soll. Das WOrM-Modell umfasst hierbei ein Untersuchungskonzept zur strukturierten Betrachtung der Korrelationen zwischen Geometrie und Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften. Es stellt keine quantifizierte formelbasierte Vorhersage der Werkstoffkennwerte im Rahmen einer konstruktiven Auslegung eines verfahrenstechnischen Druckgeräts dar.

Versuche zur Untersuchung des Werkstoffzustands mittels Lichtmikroskopie in den anschließenden WOrM-Versuchsreihen zeigten Abhängigkeit der Porosität vom Prozesssystem und höhere Porosität und Rauheit bei steigender Neigung vor allem im Down-Skin-Bereich der

Proben. Die Porosität lässt eine sinkende Tendenz bei steigender Wandstärke vermuten. Die Wandstärke scheint keinen Einfluss auf die Rauheit zu haben.

Mechanisch bearbeitete Rundzugproben zeigen den isolierten Effekt der Neigung auf die mechanischen Kennwerte. Zugfestigkeit und Dehngrenze nehmen zu, während die Bruchdehnung abnimmt. Überlagert hierzu zeigen mechanisch bearbeitete Flachzugproben aus 8 mm-Blöcken den isolierten Effekte der Geometrie. Es zeigen sich nur sehr geringe Abhängigkeiten der mechanischen Eigenschaften von der Wandstärke. Die mechanischen Kennwerte fallen jedoch tendenziell etwas niedriger aus als bei den mechanisch bearbeiteten Rundzugproben, zeigen aber die gleichen Abhängigkeiten zur Neigung.

As-built Flachzugproben weisen überlagerte Effekt aus Neigung (Anisotropie), Geometrie, Prozessthermik und Oberflächeneffekte auf. Der größte Einfluss auf die mechanischen Kennwerte unter Annahme der Soll-Wandstärke hat jedoch die Abbildungsgenauigkeit. Der Effekt der Prozessthermik konnte mittels Härtemessungen nach Vickers in Abhängigkeit der Wandstärke untersucht werden. Tendenzen sinkender Härte bei höheren Wandstärken sind zu erkennen, liegen jedoch im Bereich der Standardabweichung. Unterschiedliche Tendenzen bezüglich des Neigungswinkels weisen eine Abhängigkeit zur Untersuchungsrichtung auf. In Probenlängsrichtung zeigt sich analog zur Zugfestigkeit in quasi-statischen Zugversuchen eine höhere Vickershärte bei höheren Neigungen.

Die Effekte der Prozessthermik konnten fortführend mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) auf Veränderungen des Werkstoffzustands zurückgeführt werden. Tendenziell konnten größere Korngrößen bei größeren Wandstärken beobachtet werden, welche die geringeren Härtewerte erklären könnten. Die Kornverstreckung in Probenquerrichtung ist deutlich höher als in Probenlängsrichtung. Eindeutige quantitative Rückschlüsse zwischen Kornstruktur und Anisotropie der mechanischen Eigenschaften konnten jedoch nicht gezogen werden. Ein aussagekräftiger Kennwert aus der EBSD zur eindeutigen Beschreibung des Werkstoffzustands auf Basis der Kornstruktur kann im Rahmen des Projektes nicht empfohlen werden und bleibt weiterhin Gegenstand zukünftiger Forschungen.

Die Recherche nach integrierbaren Funktionen liefert sechs verschiedene Sensorarten, deren Integration realisierbar erscheint. Diese können messende (Dehnung, Temperatur, Wirbelstrom), regelnde (Aktuator) oder identifizierende (RFID) Aufgaben übernehmen. Bauteilprüfungen und -identifikation können für den Betrieb erleichtert und die Sicherheit gesteigert werden. Weiter wird eine Vielzahl von Regelstrukturen zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit wie auch zum Wärmetausch vorgestellt. Dabei lässt sich Gewicht insbesondere durch Versteifungsrippen an Behälterwänden einsparen sowie Wärmeübertrag durch Oberflächenvergrößerung steigern. Auch druckgerätetypische Anbauteile wie Berstscheiben oder Ventile können in integraler Bauweise additiv gefertigt werden und somit Montageaufwände reduzieren oder die konstruktive Freiheit bei der Wahl des Applikationsortes erhöhen.

Es werden drei Methoden vorgestellt, die eine Berücksichtigung der AM-typischen anisotropen Werkstoffeigenschaften ermöglichen, wobei noch unvollständige Methoden bei verfügbaren Softwarelösungen für die konstruktive Auslegung festgestellt wurden.

Am Beispiel einer Sollbruchstelle durch eine Kerbe wurde gezeigt, dass Geometrien existieren, die den Ort des Versagens sicher vorherbestimmen und gleichzeitig notwendige Festigkeitsnachweise erbringen können. Eine individuelle rechnerische und experimentelle Betrachtung ist notwendig. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass der Stopp und die Änderung der Ausbreitungsrichtung des Versagens (Rissfortschritt) bei Überbelastung nur in Grenzen funktioniert und weiterer Betrachtung bedarf.

Der erarbeitete Modelldruckbehälter wurde zur Untersuchung der Wirkung der Sollbruchstelle infolge eines Oberflächenkerbs gefertigt. Berstversuche weisen die sichere Provokation des Versagensortes nach. Der maximal erreichbare Prüfdruck wird dabei nicht reduziert, während dagegen die Bauteilverformung bis zum Bruch messbar reduziert wird.

Ein Wärmetauscher wird zur Demonstration der Auslegungsvorgehensweise Design-by-Formula unter Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften erarbeitet, gefertigt und geprüft. Die Recherche hinsichtlich zerstörungsfreier Prüfmethoden liefert 15 Ergebnisse.

In Übereinstimmung mit der Technischen Spezifikation DIN/TS 17026 wird beispielhaft eine Vorgehensweise zur Qualifizierung eines Fertigungssystems mit Fokus auf den Einflüssen hinsichtlich der inhomogenen Werkstoffeigenschaften beim Laserstrahlschmelzen beschrieben. In Ergänzung wird vorgeschlagen Sicherheitszuschläge bzw. Prüfaufwände infolge der Auslegungsklassen abhängig vom Umfang der Datengrundlage bzw. des Qualifizierungsvorgehens für ein System zu gestalten.

Ein Universalprüfkörper für additiv hergestellte Druckgeräte wurde erarbeitet und wird vorgestellt. Dieser beinhaltet geometrische Merkmale und Proben zur Erfassung mechanischer Kennwerte, Abbildungsgenauigkeiten, der allgemeinen Prozessstabilität, der Charakterisierung des Pulverwerkstoffs sowie die Möglichkeit einer Bauteilprüfung.

Fazit des Projektes ist, dass die wesentlichen Ziele des Projektes erreicht werden konnten. Anhand der Untersuchungen kann eine Bewertung des Werkstoffzustands und der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Wandungsmerkmalen, wie sie für Druckgeräte vorkommen, durchgeführt werden. Mit Hilfe des DoE konnten zudem wesentliche Effekte auf Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften ermittelt werden. Desweiteren erlaubt die im Projekt beschriebene Vorgehensweise eine schlanke Qualifizierung eines Fertigungssystems und ermöglicht eine initiale Erhebung einer Datenbasis für die Werkstoff- und Prozessqualifizierung mit geringem Aufwand. Jedoch muss bedacht werden, dass trotz des großen Versuchsumfangs keine vollständige und quantitative Beschreibung des Modells realisiert werden konnte. Mögliche Einflussgrößen wie Eigenspannungen wurden in Abstimmung mit dem pbA nicht weiter untersucht und Kreuzkorrelationen sowie Überlagerungen der verschiedenen Einflussparameter können teilweise nicht eindeutig zugeordnet werden, sodass an dieser Stelle immer eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>2</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Wissenschaftlich-technischer Ansatz</b>	<b>9</b>
4.1	Stand der Technik und Forschung	10
4.1.1	Pulverbettbasiertes Laser-Strahlschmelzen von Metallen	11
4.1.2	Pulverförmiges Ausgangsmaterial	11
4.1.3	Prozessparameter und Maschineneinfluss	11
4.1.4	Normen und Vorschriften	12
4.2	Forschungsziele und Arbeitshypothesen	16
4.3	Konkretisierte Projektausrichtung	19
<b>5</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Projektergebnisse</b>	<b>22</b>
5.1	Ausgangsanalyse	22
5.2	Voruntersuchungen	23
5.2.1	Spiegelversuch (Initialer Vergleich baugleicher Fertigungseinrichtungen)	23
5.2.2	Einführung WOrM-Modell	38
5.3	Untersuchung von Werkstoffzustand und Materialeigenschaften	41
5.3.1	WOrM-Wandungsversuche	41
5.3.2	Mechanische Kennwerte aus Zugversuchen	50
5.3.3	WOrM-Härtemessungen	56
5.3.4	WOrM-EBSD	58
5.3.5	Untersuchung des Geometrie-Effekts	61
5.4	Arbeitspaket 5: Entwicklung einer kennwertbasierten Auslegung relevanter Gestaltungskenngrößen	70
5.4.1	Vorgehensweisen zur Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften	70
5.4.2	Integration von Funktionen	75
5.4.3	Richtlinienvorschlag	78
5.5	Arbeitspaket 6: Auslegung und Herstellung von Demonstratoren	92
5.5.1	Berstdruckprüfung	92
5.5.2	Demonstrator Wärmetauscher	95
5.5.3	Qualifizierungsmethodik	102
5.5.4	Baujobbegleitende Prüfkörper	114
5.6	Forschungsausblick	119
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Vergleich mit der Zielsetzung</b>	<b>122</b>
6.1	Zusammenfassung	122

6.2	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen	125
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>126</b>
7.1	Verwendung der Zuwendung	126
7.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	128
7.3	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens	129
7.4	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	132
7.4.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen	132
7.4.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Projektabschluss (Transferkonzept)	133
7.5	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	134
7.6	Gewerbliche Schutzrechte	134
7.7	Danksagung	134
<b>8</b>	<b>References</b>	<b>136</b>

### **3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Additive Fertigungsverfahren, insbesondere das pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen (PBF-LB/M), ermöglichen die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, die konventionell bisher nur sehr kosten- und/oder zeitintensiv hergestellt oder teilweise überhaupt nicht realisiert werden können. So werden z. B. im Werkzeug- und Formenbau interne Kühlstrukturen, im Bereich der Luftfahrt bionische Leichtbaustrukturen oder erste Aggregate im Apparate- und Anlagenbau durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren generiert.

Insbesondere für die Herstellung von Druckgeräten mit komplexen Bauteilgeometrien, die heute noch mittels konventioneller Fertigungsverfahren in zahlreichen Fertigungsschritten und aus vielen einzelnen Bauteilen hergestellt werden, bietet das PBF-LB/M ein außerordentlich hohes wirtschaftliches Potenzial, selbst für den Einsatz in der Serienfertigung. Da bei der konstruktiven Ausführung von PBF-LB/M -Bauteilen im Vergleich zur konventionellen Formgebung durch z. B. Umformen oder Zerspanen kaum geometrischen Randbedingungen beachtet werden müssen, bieten sich erhebliche Vorteile bei der funktions- bzw. beanspruchungsspezifischen Gestaltung sowie durch eine zusätzliche Funktionsintegration. So könnten Druckgeräte durch die Reduktion von Schweißnähten oder durch den Verzicht auf Verbindungselemente und Dichtungen kompakter und somit durch Einsparung von Montageschritten kostengünstiger gefertigt werden. Vielversprechende Bauteile für die Herstellung mittels PBF-LB/M sind z.B. Wärmetauscher, chemische Reaktoren, Mischer oder Manometer.

Während in zahlreichen Industriezweigen die Einsatztiefe von PBF-LB/M -Verfahren stark zunimmt, bestehen für die Fertigung von Bauteilen für Druckgeräte noch Hemmnisse bzw. Sicherheitsbedenken hinsichtlich des Einsatzes dieser Technologien. Druckgeräte werden nach vorgegebenen Standards, wie z. B. der unter der Druckgeräte-richtlinie [1] harmonisierten Normenreihe EN 13445 „Unbefeuerte Druckbehälter“ [2] o. ä. hergestellt. In diesen Standards bzw. Normen, welche durchaus auch als Vorgabedokumente für den Entstehungsprozess von Druckgeräten bezeichnet werden können, wird auf alle wesentlichen Anforderungen zur Erfüllung der Druckgeräte-richtlinie Bezug genommen. Ebenfalls werden die notwendigen Schritte zur Erfüllung eben dieser, durch die Druckgeräte-richtlinie festgelegten Anforderungen bezüglich Art und Umfang von Abnahmeprüfungen, welche während des gesamten Herstellungsprozesses durchzuführen sind, klar in diesen Standards bzw. Normen definiert. Während für die konventionelle Herstellung von Druckgeräten zahlreiche etablierte nationale, europäische und internationale Standards vorliegen, welche direkt oder mit zusätzlichen Anforderungen den Anhang I der Druckgeräte-richtlinie erfüllen, fehlen diese Standards und Normen für den Bereich der additiven Fertigungsverfahren von Druckgeräten gänzlich. Dies ist als gravierendes Hemmnis für die Akzeptanz und schlussendlich den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Bereich der Druckgeräte zu sehen. Als wesentliche Punkte für die aktuell geringe Anwendungstiefe dieser Fertigungstechnologie zur Herstellung funktionsoptimierter Druckgeräte sind dabei mangelnde Kenntnisse hinsichtlich der erreichbaren Werkstoff- und Bauteileigenschaften zu nennen. Während es bereits viele Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von unterschiedlichen Werkstoffen gibt (siehe Kap. 3.1), ist deren Reproduzierbarkeit noch

weitgehend unbekannt. Ferner fehlen einheitliche und akzeptierte Standards. Der Zusammenhang zwischen dem sich durch den schichtweisen Aufbau ergebenden anisotropen Werkstoffverhalten und der statischen und zyklischen Beanspruchbarkeit ist für die additive Herstellung von Druckgeräten mit komplexer Geometrie ebenso zu berücksichtigen wie die Korrelation zwischen einer möglichen Bauteilrestporosität (insbesondere bei dünnen Wandgeometrien) und der Dichtheit gegenüber unterschiedlichen Medien in Abhängigkeit von der Bauteilpositionierung und Orientierung im Bauraum von PBF-LB/M -Maschinen.

Aufgrund der fehlenden, validierten Materialeigenschaften, die zur Berechnung eines Druckgerätes benötigt werden, reduziert sich bisher maßgeblich die Ausschöpfung der Potenziale, die sich durch den Einsatz des PBF-LB/M ergeben können und darüber hinaus erhöhen sich gleichzeitig die Sicherheitsbedenken, die gegen eine Nutzung dieser Fertigungstechnologie bestehen.

Die in dem beantragten Projekt zu erzielenden Ergebnisse bilden die Grundlage für die Etablierung von PBF-LB/M -Verfahren zur Herstellung von Druckgeräten. Dazu sollen für die richtlinienkonforme Fertigung von Druckgeräten entsprechende Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren und wirtschaftlichen Einsatz des PBF-LB/M - Verfahrens zur Herstellung von Druckgeräten erarbeitet werden, die sowohl die Bauteilauslegung als auch die Bauteilprüfung, Risikobeurteilung und Tolerierung der Prozessparameter berücksichtigen. Damit liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Qualifizierung der Additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte.

Zielsetzung des beantragten Forschungsprojektes ist die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie. Hierbei sollen mögliche verfahrensspezifische Restriktionen des PBF-LB/M-Verfahrens identifiziert und unter Berücksichtigung der Druckgeräterichtlinie DGR 2014/68/EU standardisierte Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren Technologieeinsatz erarbeitet werden, welche schlussendlich in Standards und Normung Einzug erhalten. Zur Überprüfung möglicher Optimierungspotenziale für Druckgeräte durch den Einsatz des Laserstrahlschmelzens (z. B. Erhöhung der Belastbarkeit, Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Verkürzung der Fertigungszeiten) werden neue Gestaltungsmöglichkeiten analysiert, entsprechende Konstruktionsmöglichkeiten abgeleitet und diese an Demonstratoren bzw. Prototypen verifiziert. Die innerhalb des Projektes gewonnenen Ergebnisse sind dabei nicht nur auf die Anwendung bei Druckgeräten beschränkt, sondern können auch bei anderen kritischen Einsatzbereichen wie der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrt Anwendung finden.

#### **4 Wissenschaftlich-technischer Ansatz**

Das pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen ermöglicht als Verfahren der additiven Fertigung (AM) durch seine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit die Fertigung von Endbauteilen mit hoher Funktions- und Bauteilintegration [3]. Insbesondere für die Herstellung von Druck-

geräten mit komplexen Bauteilgeometrien, die heute noch mittels konventioneller Fertigungsverfahren in zahlreichen Fertigungsschritten und aus vielen einzelnen Bauteilen hergestellt werden, bietet das PBF-LB/M ein außerordentlich hohes Potenzial zur Optimierung von Fertigungskosten und -dauer. Dies betrifft neben der Entwicklung und Optimierung neuer Produkte insbesondere auch den After-Sales Markt für Ersatzteile [4].

Etablierte Qualifizierungsstandards (z.B. für Verbindungsstellen an Druckgeräten) müssen an die ausgewählte Fertigungstechnologie angepasst werden. Als urformendes Fertigungsverfahren erfolgt bei der additiven Fertigung die Herstellung des Bauteilmaterials im Fertigungsprozess.

Verfahrensbedingt sind die mittels PBF-LB/M realisierbaren Bauteileigenschaften abhängig von zahlreichen Prozesseinflüssen. Dies stellt eine Herausforderung bezüglich der Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität insbesondere für sicherheitskritische Bauteile dar. Unter anderem führen variierende Geometrie und Orientierung zu inhomogenen Werkstoffzuständen und mechanischen Eigenschaften [5]. Die Qualität der Herstellungsprozesse von Druckgeräten muss dementsprechend besonders abgesichert werden, um den Anforderungen der Druckgeräterichtlinie (DGR) [1] zu entsprechen. Mit steigender Komplexität steigt so der Konstruktions- und Prüfaufwand, da die Inbetriebnahme der Druckgeräte bisher nur durch Bauteileinzelqualifizierungen und individuellen Prüfungen des Bauteils realisiert werden konnte.

Dies führt dazu, dass in der Industrie heute Hemmnisse bei der Ausschöpfung des Potenzials der PBF-LB/M-Technologie für Druckgeräte bestehen. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (kmU) fehlt hier aufgrund des hohen Aufwands gänzlich der Zugang.

#### **4.1 Stand der Technik und Forschung**

Additive Fertigungstechnologien entwickeln sich immer mehr zu einer seriellen Fertigungstechnologie in der verarbeitenden Industrie. Eine dieser AM-Technologien ist das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M nach [1] und [6]). Neben den funktionalen Technologievorteilen ist der Trend zu industriell einsetzbaren Maschinen auf dem Markt der Ausrüstungsanbieter zu beobachten. Die Anlagenhersteller bieten Produktionssysteme, bestehend aus PBF-LB/M-Anlagen, Pulverrohstoffen, Prozessstrategien und Ansätzen zur Prozessüberwachung an, die eine höhere Technologieakzeptanz auf der Anwendungsseite fördern sollen. Während der Anwendungsbereich des PBF-LB/M-Verfahrens in zahlreichen Industriezweigen stark zunimmt, stehen der Herstellung von Bauteilen mit hohen Sicherheitsanforderungen (z.B. Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Druckgeräte) fehlende verbindliche Normen und Standards in der Bauteilgestaltung und Qualitätssicherung entgegen. Druckgeräte werden nach vordefinierten Normen hergestellt, wie z. B. der Normenreihe EN 13445 "Unbefeuerte Druckbehälter" [2] oder ähnlichen, die in Europa unter der Druckgeräterichtlinie [1] harmonisiert sind. Während es für die konventionelle Herstellung von Druckgeräten zahlreiche etablierte nationale, europäische und internationale Normen gibt [7–14], fehlen diese Regelungen für den Bereich der additiven Fertigungsverfahren.

#### 4.1.1 Pulverbettbasiertes Laser-Strahlschmelzen von Metallen

PBF-LB/M ist ein schichtweises Fertigungsverfahren, bei dem Geometrien aus mehreren verschmolzenen Schichten von Pulverrohstoffen hergestellt werden. Die Schichten werden dazu auf einer Bauplattform dünn in Form von Pulver übereinander aufgetragen und jede Schicht wird mit Hilfe eines Laserstrahls aufgeschmolzen und mit den vorhergehenden verschmolzen [15,16]. Häufig wird eine PBF-LB/M-Anlage nur als Maschine mit den verwendeten Prozessparametern betrachtet. Die Bauteilqualität wird jedoch von mehreren Faktoren beeinflusst, wie z. B. dem Ausgangsmaterial, der Auftragsgeometrie und der Verschachtelung sowie dem Bediener der Maschine [17,18].

#### 4.1.2 Pulverförmiges Ausgangsmaterial

Das Pulverrohstoffmaterial kann in mehreren Pulvereigenschaften variieren, darunter Partikelgrößenverteilung, Morphologie, Dichte, Feuchtigkeit, chemische Zusammensetzung und Verunreinigungen, die sich alle auf das Verarbeitungsverhalten und damit auf die Material- und Teileigenschaften auswirken [19]. Die Wiederverwendung des Pulvers ist zwar generell möglich [20], es hat sich jedoch gezeigt, dass insbesondere bei mehrfacher Wiederverwendung die Partikelgröße vergrößert wird und der Sauerstoffgehalt des Pulverrohstoffs zunimmt. Die chemische Zusammensetzung des Pulvers ändert sich dagegen nicht. Während dies offensichtlich keine Auswirkungen auf die Zugeigenschaften hat, konnte eine Abnahme der Kerbschlagarbeit festgestellt werden, was den Unterschied zwischen statischen und dynamischen Tests unterstreicht [21]. Darüber hinaus wird beobachtet, dass ein höherer Anteil an groben Pulverpartikeln einen negativen Einfluss auf die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften von PBF-LB/M-Proben hat [22].

#### 4.1.3 Prozessparameter und Maschineneinfluss

In verschiedenen Veröffentlichungen wurde die Abhängigkeit zwischen den Prozessparametern und den Materialeigenschaften, dem Gefüge, der Porosität und der Oberflächenrauheit sowie den mechanischen Eigenschaften untersucht. So wurde z. B. ein Zusammenhang zwischen der Schmelzbadtemperatur, der Korngröße und den Festigkeitseigenschaften für austenitischen Stahl 316L gefunden [23]. Insbesondere die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit, der Hatchabstand und die Schichtdicke werden zur Beschreibung der Energiedichte herangezogen, die sich nachweislich stark auf die Materialeigenschaften auswirkt [20,24–26]. Dabei führen höhere Energiedichten tendenziell zu geringerer Porosität und damit zu besseren mechanischen Eigenschaften [24], solange eine kritische Energiedichte nicht überschritten wird, bei der chemische Komponenten mit niedrigen Verdampfungstemperaturen während des Schmelzprozesses verdampfen [25]. Für die Rauheit hingegen wird eine Abhängigkeit von der Schichtdicke [27], der Partikelgröße des Pulverrohstoffs, dem Oberflächenwinkel sowie der Schweißnahtgeometrie insbesondere im Downskin-Bereich angenommen. Trotzdem können die Herstellungsparameter nicht auf ein anderes System übertragen werden, um die gleichen Ergebnisse zu erhalten [28].

Ein feines Gefüge mit säulenförmigen dendritischen Zellen wird oft als typisch für PBF-LB/M-gefertigtes 316L beschrieben, welches in der Literatur überwiegend austenitische Phasen aufweist [26,29,30]. Es wurde jedoch festgestellt, dass neben der Energiedichte auch die Scanstrategie einen erheblichen Einfluss auf die Schmelzbadgrenzen, die Orientierung und das Aspektverhältnis der Körner hat [31]. Dies führt zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften, anisotropen Strukturen und zur Bildung von Texturen [24, [32]. Daher konnte ein Unterschied von bis zu 16 % bei der Bruchdehnung aufgrund der angewandten Schraffurstrategie beobachtet werden [33]. Die mechanischen Eigenschaften der mit PBF-LB/M hergestellten Proben zeigen daher je nach Orientierung zur Baurichtung unterschiedliche Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen [27,32], die aber immer noch über den Werten von konventionell hergestellten Proben liegen [27]. Dies kann auf das verfeinerte Gefüge durch die schnelle Erstarrung während des PBF-LB/M-Prozesses zurückgeführt werden [34].

Während die meisten Veröffentlichungen ähnliche Ergebnisse bezüglich der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den Prozessparametern oder dem Pulverrohstoff aufweisen, werden konstruktionsrelevante Parameter, die sich auf die Geometrie des Produkts beziehen oft nicht erwähnt oder unterscheiden sich zwischen verschiedenen Veröffentlichungen. Bisher wurde beobachtet, dass sich der Einfluss unterschiedlicher PBF-LB/M-Maschinen auf die Porosität der Proben auswirkt, was zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führt [28].

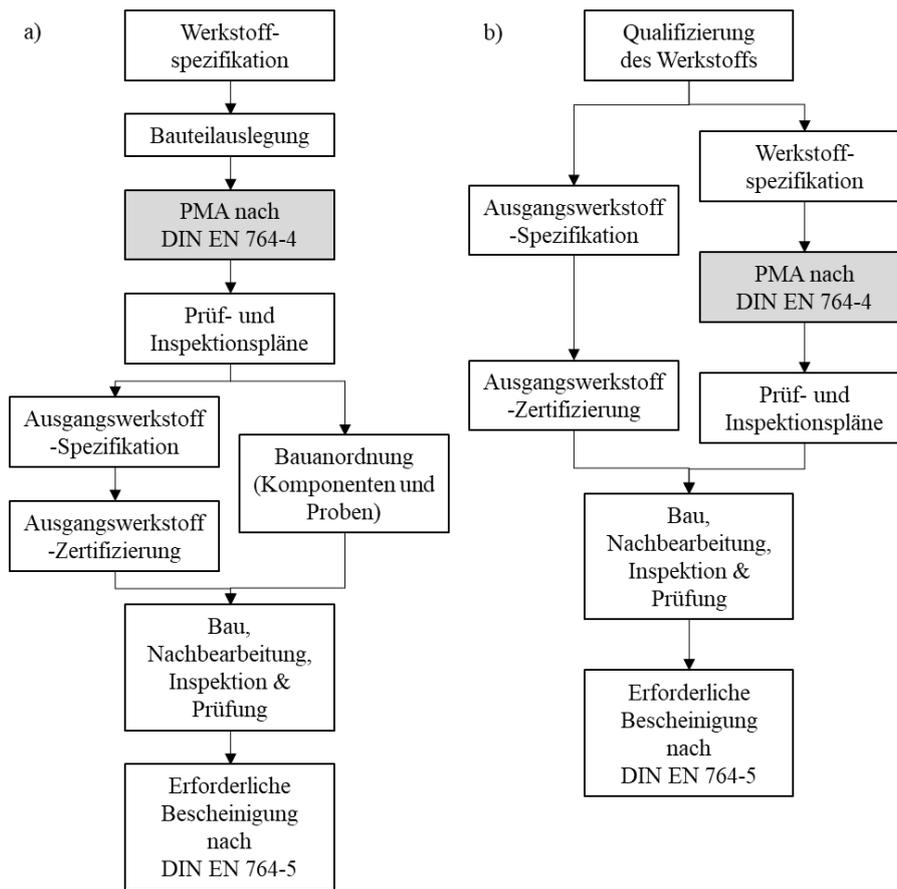
#### 4.1.4 Normen und Vorschriften

Das Inverkehrbringen von Druckgeräten in der Europäischen Union (EU) wird durch die Druckgeräterichtlinie (DGR) geregelt [1]. Die Konformitätsvermutung mit der DGR wird i.d.R mit der Umsetzung harmonisierter Normen für Druckgeräte erlangt. Inhaltlich ähneln in Europa harmonisierte Normen oft denen der American Society of Mechanical Engineers (ASME). Eine wichtige harmonisierte Norm für Europa ist die DIN EN 13445 "Unbefeuerte Druckbehälter" [2], die allgemeinen Informationen, Werkstoffe, Konstruktion, Fertigung, Inspektion und Prüfung definiert. Im "Teil 2: Werkstoffe" [2] sind Mindestanforderungen wie die Bruchdehnung für austenitische nichtrostende Stähle einschließlich 316L von mindestens 14 %, und falls durch eine zutreffende Halbzeugnorm definiert höher, festgelegt. Die Hersteller müssen daher sicherstellen, dass sie diese Spezifikationen einhalten. Für den Fall, dass eine Spezifikation nicht erfüllt werden kann, sind zusätzliche Verfahren zulässig, um die Sicherheit der Teile dennoch zu gewährleisten. Für die Auslegung von Druckbauteilen sind drei Ansätze üblich: Auslegung nach Formeln (DBF), Auslegung nach Analyse (DBA) und Auslegung nach Versuch (DBE). "Teil 3: Design" [2] liefert Formeln für die Auslegung typischer Geometrien konventioneller Druckbehälter wie Flansche, Ränder oder Böden. Obwohl auch Berechnungen für DBF verfügbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass DBE das in der Industrie am häufigsten verwendete Verfahren ist. Innerhalb dieser Normen sind additive Fertigungsverfahren (AM) nicht vertreten, so dass ein einzelner Qualifizierungsaufwand für jedes additiv gefertigte Bauteil erforderlich ist [1].

Seit 2019 arbeitet der DIN-Normenausschuss Werkstofftechnik (NWT) daran, die DIN EN 13445 für AM weiterzuentwickeln. Dazu wurde zunächst die DIN/TS 17026 "Unbefeuerte Druckbehälter - Zusätzliche Anforderungen an Druckgeräte und Druckbauteile, die mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt wurden" [35] als Entwurf für eine zukünftige prEN 13445 Teil 14 erarbeitet und an den CEN TC 54 WG 11 auf europäischer Ebene weitergegeben. Dort wird diese momentan weiterentwickelt. Auf nationaler Ebene (DIN) wird mit einer neuen Revision der DIN/TS 17026 gerechnet. Die Kapitel 4 bis 8 der DIN/TS 17026 entsprechen der oben beschriebenen Struktur der EN 13445 Teile 1 bis 5 [2]. Es werden zusätzlich vier Sicherheitsklassen in Verbindung mit dem Prüfaufwand für AM-Teile eingeführt. Anhänge definieren verfahrensspezifische Richtlinien, wobei A das Pulverbettsschmelzen beschreibt. Neben dieser Technischen Spezifikation (TS) wurde im Dezember 2019 die DIN SPEC 17071 im PAS-Verfahren veröffentlicht, die "Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse in additiven Fertigungszentren" definiert [36]. In diesem Dokument werden unabhängig von Werkstoff und Fertigungsverfahren Kriterien für additive Fertigungsprozesse sowie qualitätsrelevante Merkmale und Faktoren entlang der Prozesskette festgelegt. Jedoch wird nur auf die Tätigkeiten und Abläufe innerhalb eines additiven Fertigungszentrums eingegangen und keine konkrete Qualifizierungsmethodik definiert. So wird z.B. festgehalten, dass für das **pulverförmige Ausgangsmaterial (Ausgangswerkstoff)** die Festlegung wesentlicher Parameter und gegebenenfalls zugehöriger Prüfverfahren zu definieren ist. Diese sollen die Eignung eines Ausgangsmaterials für den jeweiligen Fertigungsprozess sicherstellen. Jedoch werden weder die Parameter noch die zugehörigen Prüfverfahren genannt.

In der DIN/TS 17026 [35] wird gefordert, dass die Bestimmung der für die Auslegung des Druckgeräts entscheidenden Berechnungsnennspannung  $R_R$  durch den Hersteller des Druckgeräts erfolgen muss, da die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs nicht vom Lieferanten des Ausgangswerkstoffs bereitgestellt werden können. Daher muss der Hersteller des drucktragenden Teils sowohl die für die Auslegung verwendeten mechanischen Eigenschaften dokumentieren sowie angeben, aus welcher Quelle diese Daten stammen oder mit welchem Verfahren sie ermittelt wurden. Die Technische Spezifikation stellt dabei für die Zertifizierung von Werkstoffen zwei Vorgehensweisen zur Verfügung (**Abbildung 1**):

- eine Werkstoffzertifizierung über eine direkte Prüfung,
- eine Werkstoffzertifizierung über ein **Qualitätsmanagementsystem (QMS)**.



**PMA:** Einzelgutachten für Werkstoffe (en: Particular Material Appraisal)

**Abbildung 1:** a) Werkstoffzertifizierung über eine direkte Prüfung und b) Werkstoffzertifizierung über ein QMS (vgl. [35])

Bei der Werkstoffzertifizierung über eine direkte Prüfung wird das Bauteil anhand bereits vorliegender Werkstoffspezifikationen, Richtlinien und Normen ausgelegt, wobei die mechanischen Eigenschaften für die Auslegung höchstens den Mindestanforderungen der Werkstoffe entsprechen dürfen. Gemäß der technischen Spezifikation müssen anschließend für jeden Fertigungszyklus die mechanischen Eigenschaften individuell verifiziert werden. Dies hat den Nachteil, dass bei Feststellung geringerer mechanischer Eigenschaften in der Verifizierung die dazugehörigen Bauteile bereits mit nicht verwendbaren Auslegungskenngrößen ausgelegt und gefertigt wurden.

Bei der Werkstoffzertifizierung über eine QMS wird der Werkstoff vor der Auslegung des Bauteils qualifiziert, wobei die mechanischen Werkstoffeigenschaften innerhalb eines bestimmten Geltungsbereichs in nachfolgenden Fertigungszyklen Gültigkeit bewahren. Weiterhin beinhaltet die Qualifizierung eine Ausrüstungs- und Bauraumqualifizierung für den gewählten Werkstoff. Für die Berechnungsnennspannung  $R_R$  ist ein Geltungsbereich zur Gewährleistung der Werkstoffqualität zu definieren, der mindestens enthält:

- AM-Maschine,
- Ausgangsmaterial (Pulvermaterial),
- Wärmebehandlung,
- Inert-Gas,

- Prozessparameter wie Schichtdicke, Prozesstemperatur und Scanstrategie.

Neben der Überprüfung der Reproduzierbarkeit der chemischen Zusammensetzung mit Grenzabweichungen zwischen Produkt- und Pulveranalyse sind verschiedene Werkstoffeigenschaften festzulegen, wie:

- Zugfestigkeitseigenschaften bei Raumtemperatur und erhöhter Temperatur,
- Charpy V-Kerben-Schlageigenschaften,
- Kriecheigenschaften und
- Technologische Eigenschaften, z.B. statischer Einsatz ( $n < 500$ ).

Für die mechanischen und technologischen Eigenschaften wird ein isotropes Werkstoffverhalten angenommen. Dabei müssen die Eigenschaften in Richtung und Lage der Prüfstücke angegeben werden, die repräsentativ für die Materialeigenschaften sind. Repräsentativ bedeutet hierbei, dass je nach Materialanisotropie und Herstellungsanforderungen die niedrigsten erreichbaren mechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen sind. Dafür ist ein Prüfkonzepkt für die Materialanisotropie durch den Anwender zu definieren. Eine klare Vorgabe des Prüfkonzepkts wird nicht angegeben.

Der Referenzwert  $R_R$  aus den ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften soll auf einer statistischen Datenbank basieren. Die Mindestanforderungen für die initialen Datenbanken sind in **Tabelle 1** beschrieben, wobei eine initiale Datenbank nicht als vollständig validiert verstanden werden kann. Für den Anwender ist der Gesamtumfang einer vollständigen Datenbank nicht angegeben.

**Tabelle 1:** Mindestanforderungen für eine initiale Datenbank

Art der Prüfung	Umfang der Prüfung
Zugversuch bei Raumtemperatur	Mindestens 25 Exemplare (mindestens 5 Fertigungszyklen und 3 Stück je Zyklus)
Kerbschlagbiegeprüfung <sup>a</sup>	Mindestens 10 Probensätze (mindestens 5 Fertigungszyklen und 1 Satz je Zyklus)
Zugversuch bei erhöhten Temperaturen <sup>b</sup>	Mindestens 10 Proben je Temperaturstufe
<sup>a</sup> Der Probensatz besteht aus 3 Prüfkörpern.	
<sup>b</sup> Temperaturschritte von 100 K-Schrittweite für die bevorzugte Temperatur.	

Über die Werkstoffqualifizierung hinaus sind in der technischen Spezifikation zerstörende und zerstörungsfreie Prüfungen in Abhängigkeit von sogenannten Design Classes am additiv gefertigten Bauteil vorgesehen, welche an den für das Design maßgeblichen Bereichen durchzuführen sind. Für das Design maßgebliche Bereiche sind dabei solche, in denen die höchsten Spannungen auftreten (anhand der Auslegung zu bestimmen) und an denen für den Herstellungsprozess die meisten Inhomogenitäten angenommen werden. Die für das Design maßgeblichen Bereiche sind jedoch durch den Anwender individuell zu wählen und eine Vorgabe zum Umgang mit System-Monitoring Daten ist nicht gegeben.

## 4.2 Forschungsziele und Arbeitshypothesen

*Die Zielsetzung von QuAFD ist die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie.*

Hierbei sollen mögliche verfahrensspezifische Restriktionen des PBF-LB/M-Verfahrens identifiziert und unter Berücksichtigung der Druckgeräte-richtlinie DGR 2014/68/EU standardisierte Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren und reproduzierbaren Technologieeinsatz als Teil einer Fertigungsprozesskette erarbeitet werden. Dabei gilt es, Prüf- und Qualitätssicherungsmethoden sowie Gestaltungsrichtlinien zu entwickeln, die sowohl an das Herstellverfahren als auch an die Zielanwendung angepasst sind, wodurch eine direkte Anwendbarkeit im industriellen Umfeld erreicht wird. Zur Überprüfung der Optimierungspotenziale für Druckgeräte durch den Einsatz des Laserstrahlschmelzens (z. B. Erhöhung der Belastbarkeit, Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Verkürzung der Fertigungszeiten) werden neue Gestaltungsmöglichkeiten analysiert, entsprechende branchenspezifische Konstruktionsmöglichkeiten abgeleitet und diese an Demonstratoren verifiziert.

Basierend auf der Ausgangssituation und dem aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung lassen sich die folgenden Arbeitshypothesen ableiten:

- Mittels PBF-LB/M -Verfahren können betriebssichere Druckgeräte gemäß Druckgeräte-richtlinie DGR 2014/68/EU hergestellt werden. Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von Kleinserien und Sonderanfertigungen sowie zur Herstellung komplexer Bauteilgeometrien.
- Der Einsatz des PBF-LB/M zur Fertigung von Druckgeräten kann, insbesondere für montage- und fügeintensiver Druckgeräte wie Manometer oder Wärmetauschern wirtschaftliche Potentiale erschließen. Durch die Reduktion von Schweißnähten (einschließlich Vorbereitung/Nachbereitung und Prüfung) oder den Verzicht auf Verbindungselemente und Dichtungen können Druckgeräte kompakter und kostengünstiger gefertigt werden. Auf eine Überprüfung dieser Elemente könnte zusätzlich verzichtet werden. Die verringerten Montageschritte und Anzahl an einzelnen Bauelementen erhöhen zudem die Zuverlässigkeit additiv gefertigter Druckgeräte.
- Durch den Einsatz von PBF-LB/M kann die Prozesseffizienz bestehender verfahrenstechnischer Prozesse aufgrund der neuen konstruktiven Freiheiten in der Geräteherstellung gesteigert bzw. die Neuentwicklung solcher Prozesse überhaupt erst ermöglicht werden. Beispiele wären spezielle Wärmeüberträger für thermisch labile Substanzen und chemische Reaktoren für die Beherrschung schwieriger Reaktionen (Sicherheit) und zur Minimierung unerwünschter Nebenreaktionen.

- Aufgrund der speziellen Sicherheitsanforderungen an Druckgeräte müssen die für den heutigen Technologieeinsatz üblichen Handlungsempfehlungen überprüft bzw. für die additive Fertigung von Druckgeräten angepasst werden. Konkret ist hier zu nennen, dass die mechanischen Kennwerte, die typischerweise anhand von Zugproben ermittelt wurden, auch für dünnwandige Strukturen als Teil von Druckgeräten Gültigkeit haben. Darüber hinaus ist die Langzeitstabilität zu verifizieren. Gegebenenfalls sind angepasste Werte zu ermitteln und im Rahmen von Design-Richtlinien aufzubereiten. Auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse können standardisierte Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren Technologieeinsatz bezüglich der Bauteilherstellung und der Bauteilprüfung formuliert werden.
- Durch die Entwicklung branchenspezifischer Normen und Richtlinien wird der Wissenstand in der fertigungstechnologiegerechten Bauteilkonstruktion von Druckgeräten unter Berücksichtigung der Besonderheiten der additiven Fertigung erweitert. Durch die Sicherstellung der Erzielung der geforderten Material- und Bauteileigenschaften wird die Akzeptanz der Additiven Fertigung zur Herstellung von Druckgeräten erhöht.
- Mittels branchenspezifischer Design-Regeln können Konstrukteure vom Start des Gestaltungsprozesses bis hin zur Sicherstellung der Fertigbarkeit unterstützt werden. Die Design-Regeln beinhalten anwendungsbezogene Grenzwerte einschließlich zugehöriger Anlagenprozessparameter und Fertigungsbedingungen (z. B. Pulverhandling) und sind damit im Druckgerätebau direkt im Produktentwicklungsprozess einsetzbar.

Die Projektstruktur aus dem bewilligten Antrag ist in Abbildung 2 dargestellt.

AP7: Projektkoordination: Zeitabläufe, Personaleinsatz, Projektmanagement; Zwischenevaluationen; PA-Sitzungen, Berichtswesen

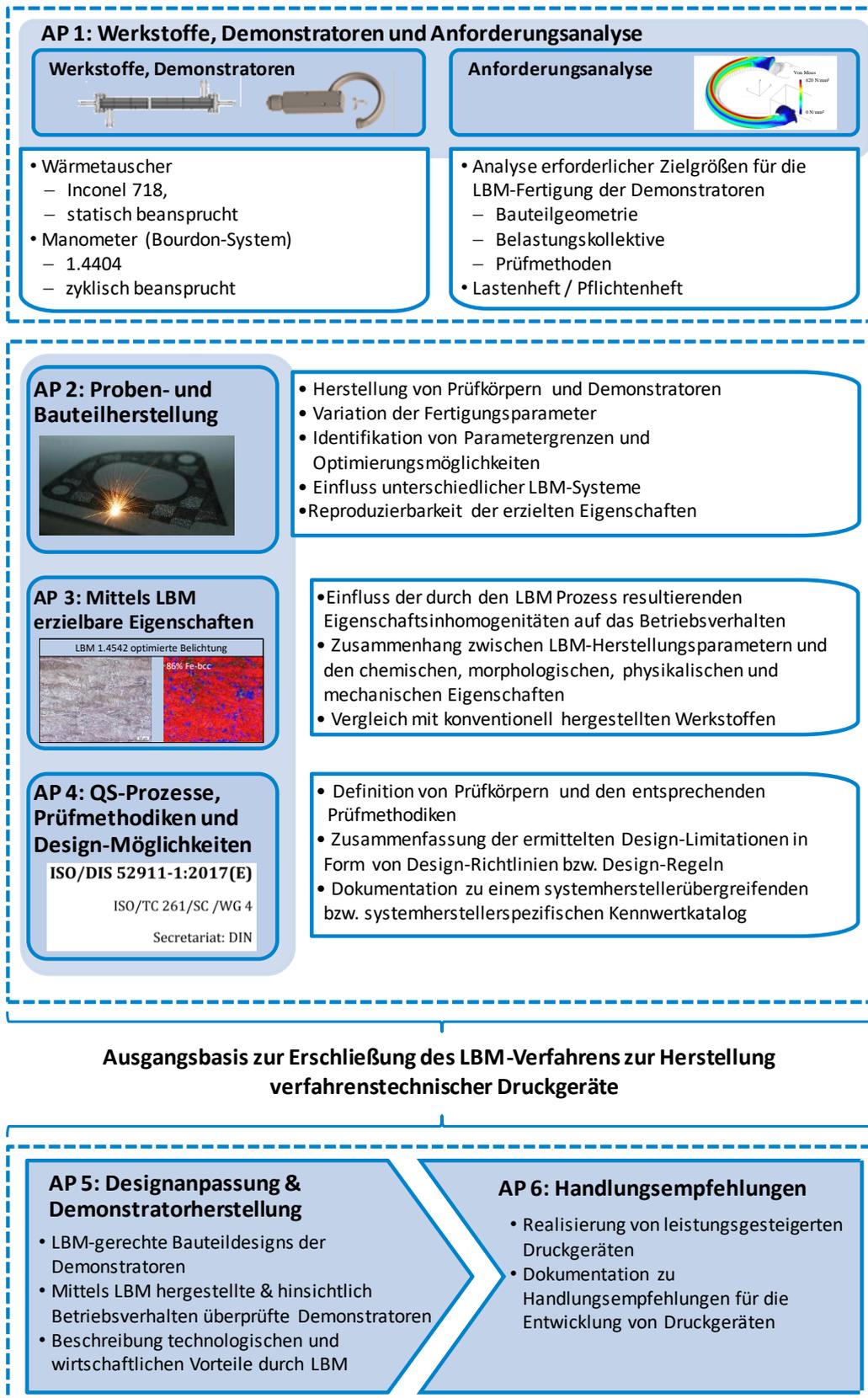


Abbildung 2: Übersicht der geplanten Arbeitspakete zur Qualifizierung der additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte

### 4.3 Konkretisierte Projektausrichtung

Im Zuge der Ausgangsanalyse wurde festgestellt, dass die Ziele des Antrags in Bezug auf den aktuellen Stand der Technik nicht ausreichend konkretisiert wurden.

Durch den veränderten Stand der Wissenschaft und Technik zwischen Beantragung und Bewilligung ist in Zusammenarbeit mit dem projektbezogenen Ausschuss (PbA) die Projektausrichtung konkretisiert worden und verschiedene Arbeitspakete wurden an die industriellen Anforderungen angepasst. In **Tabelle 1** ist der gesamte Projektzeitplan mit den angepassten Arbeitspaketen (AP) dargestellt.

Tabelle 2: Angepasster Projektzeitplan

Gliederung	AP Arbeitsschritt	2019												2020												2021											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aufgaben-Definition	1 Einordnung des Projektes, Anforderungs- und Systemanalyse, Konkretisierung der Projektausrichtung	[Gantt chart showing task 1 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
	2 Entwicklung einer Untersuchungsmethodik, Probenauslegung und -herstellung	[Gantt chart showing task 2 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
Daten-Erzeugung	3 Untersuchung von Werkstoffzustand und Materialeigenschaften	[Gantt chart showing task 3 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
	4 Untersuchung von Korrelationen und geometrischen Einflüssen, Rückschluss auf Bauteileigenschaften	[Gantt chart showing task 4 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
Daten-Ableitung	5 Entwicklung einer kennwertbasierten Auslegung relevanter Gestaltungs-kenngrößen	[Gantt chart showing task 5 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
	6 Auslegung und Herstellung von Demonstratoren	[Gantt chart showing task 6 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
Anwendung	7 Projektmanagement	[Gantt chart showing task 7 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
Dokumentation		[Gantt chart showing task 7 progress from Jan 2019 to Dec 2021]																																			
Legende	abgeschlossen	Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen PTW																																			
	in Bearbeitung	Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV																																			
		Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt,																																			
	ausstehend	Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde MPA-IFW																																			
		Projektzeitplan laut Antrag																																			

Als wesentliche Transfermaßnahme wird innerhalb von QuAFD ein definierter und erweiterbarer Qualifizierungsprozess eingeführt (Abbildung 3). Dieser Prozess ist das Ergebnis der bisher durchgeführten Arbeiten. Das erarbeitete WOrM-Modell (**W**andungs- und **O**rientierungs-abhängiges **M**aterial-Modell) repräsentiert die Korrelation des Werkstoffzustands und den Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Branchenanforderungen mit dem Ziel, einen möglichst schlanken und systematischen Qualifizierungsprozess abzuleiten. Innerhalb des Projektes QuAFD werden mit Innendruck beaufschlagte Behälterwände betrachtet. Die Wandstrukturen können durch die Wandstärke und die Orientierung der Tangentialebene zur Bauplattform geometrisch eindeutig beschrieben werden. Folglich werden die Materialeigenschaften sowie Werkstoffzustände hinsichtlich dieser abgeleiteten Parameter untersucht. Technologiebedingte anisotrope Werkstoffeigenschaften werden ebenfalls durch das WOrM-Modell berücksichtigt.

In Arbeitspaket 1 (Einordnung des Projektes, Anforderungs- und Systemanalyse, Konkretisierung der Projektausrichtung) wurde zunächst ein umfassender Überblick zum aktuellen Stand der Technik erarbeitet. Auf dieser Basis wurde das Projekt nach Absprache mit dem projekt-

begleitenden Ausschuss (pbA) in einen veränderten Gesamtzusammenhang eingeordnet, sowie die Projektanforderungen abgeleitet. Dadurch ergab sich eine Anpassung der Arbeitspakete und die konkrete Projektausrichtung.

In Arbeitspaket 2 (Entwicklung einer Untersuchungsmethodik, Probenauslegung und –herstellung) erfolgte die Entwicklung einer Untersuchungsmethode zur Erhebung von Materialeigenschaften im Kontext der der Druckgeräteherstellung, die Bewertung von möglichen Probengeometrien sowie die Umsetzung der Probenherstellung. Als Ergebnis wurde das WOrM-Modell als systematischer Ansatz (vgl. Abbildung 3) für die Projektdurchführung festgehalten. AP2 wurde mit der Herstellung der Proben und Initialversuchen zur Bewertung der Anlagenübertragbarkeit abgeschlossen.

In Arbeitspaket 3 erfolgte die Untersuchung von Werkstoffzustand und Materialeigenschaften. Grundlage hierfür ist die Anwendung von gültigen Normen bezüglich Einzelprüfungsverfahren und den vorgeschriebenen Probengeometrien. Gleichmaßen werden die normgerechten Probendesigns hinsichtlich der additiven Herstellbarkeit optimiert, verschiedene Probengeometrien berücksichtigt, Messabläufe optimiert und anschließend standardisierte Prozesse zur Auswertung der Materialeigenschaften bereitgestellt.

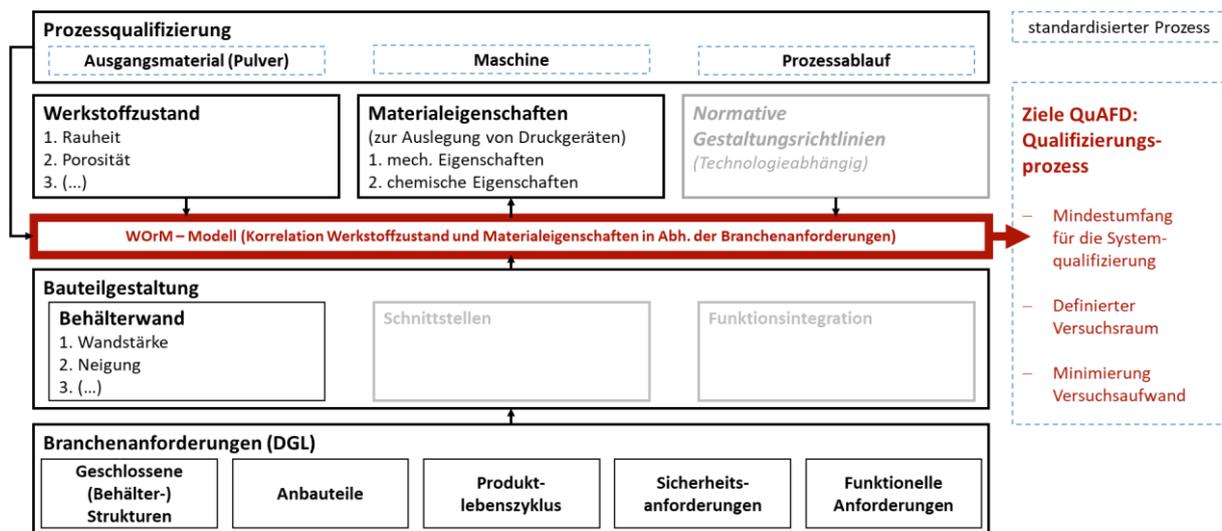


Abbildung 3: Systematischer Ansatz zur Definition eines erweiterbaren Qualifizierungsvorgehens der additiven Fertigung (PBF-LB/M) für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte

In AP 4 erfolgte die Definition und Erarbeitung des Wandungs- und Orientierungsabhängiges Material-Modell (WOrM-Modell). Hierbei wurden die Materialeigenschaften als Funktion der fertigungstechnologischen und anwendungsspezifischen Eingangsgrößen erarbeitet. Es dient der Eigenschaftsprädiktion von Behälterwänden bezüglich eines definierten Fertigungssystems.

Insbesondere beim Laserstrahlschmelzen werden Werkstoffzustände erzeugt, die anisotrope (richtungsabhängige) und geometrieabhängige (Formen, Dimensionen) Eigenschaften aufweisen. AP 5 beschäftigt sich theoretisch mit Vorgehensweisen zur Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften bei der Auslegung bzw. Berechnung von druckführenden Komponenten. Drei Konzepte werden vorgeschlagen. Weiterhin werden für Druckgeräte relevante Funktionsstrukturen sowie verfügbare Prüfmethode für additiv hergestellte Druckgeräte identifiziert. Nach einer Bewertung wird die Provokation einer Sollbruchstelle mittels einer Kerbe an der Bauteiloberfläche detailliert untersucht und ein Richtlinienvorschlag zur Umsetzung erarbeitet.

AP6 beschäftigt sich mit der Funktionsprüfung und Umsetzung von Demonstratoren. Das erarbeitete Vorgehen für eine Sollbruchstelle wird am Modelldruckbehältnis umgesetzt und durch Berstdruckprüfungen mit Erfolg nachgewiesen. Weiter wird ein Wärmetauscher zur Demonstration einer der in AP 5 erarbeiteten Auslegungsvorgehensweisen umgesetzt. Er kombiniert konventionelle Druckgerätegeometrien mit solchen, die das Potenzial der Additiven Fertigung durch die hohe Geometriefreiheit ausschöpfen. Im dritten Themenkomplex wird ein Prüfkörper entwickelt, der eine hohe Anzahl fertigungsbegleitender Prüfungen ohne Verlust der Serienbauteile des Bauzyklus (Los) möglich macht.

## 5 Durchgeführte Arbeiten und Projektergebnisse

### 5.1 Ausgangsanalyse

Die durchgeführte Systemanalyse der Fertigungstechnologie PBF-LB/M ist in Abbildung 1 dargestellt und hat zum Ziel den Untersuchungsrahmen für das Projekt systematisch zu präsentieren. Die Korrelationsstufen repräsentieren die Zustandsgrößen, die den jeweiligen Teilprozess der Fertigung eines verfahrenstechnischen Druckgeräts mittels PBF-LB/M beschreiben. Der PBF-LB/M-Prozess wird als urformendes Fertigungsverfahren definiert und stellt somit das Verfahren zur Materialherstellung dar. Der Begriff *Werkstoffzustand* umfasst im Rahmen des Projekts neben der Gefügestruktur unter anderem auch Oberflächeneigenschaften, Poren und Einschlüsse sowie die chemische Zusammensetzung. Hintergrund der gewählten Darstellung ist die unidirektionale Wirkweise einer Korrelationsstufe auf die jeweils nächste Stufe. So haben veränderte *Prozessparameter* eine direkte Veränderung des *Werkstoffzustands* zur Folge, welche ihrerseits zu veränderten *Materialeigenschaften* und somit zu veränderten *Bauteileigenschaften* führt. Ausgliedert aus dieser Prozessbetrachtung sind die Nachbearbeitung sowie weitere Einflussfaktoren wie das pulverförmige Ausgangsmaterial, die Maschine beziehungsweise der Maschinenbediener sowie die Geometrie des herzustellenden verfahrenstechnischen Druckgeräts. Diese werden als externe Einflussgrößen auf das System definiert.

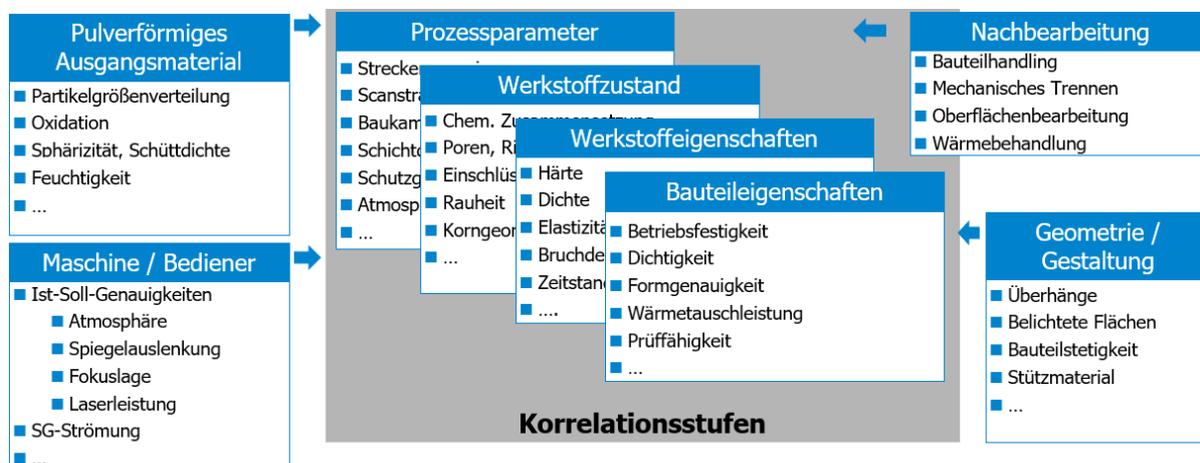


Abbildung 4: Übersicht über das System Laserstrahlschmelzen und den definierten Projektumfang

In Absprache mit dem pbA wird im Rahmen des Projekts von den externen Einflussgrößen des Systems PBF-LB/M nur die Geometrie näher betrachtet, da in der industriellen Anwendung das Ausgangsmaterial als auch die Maschine und der Bediener als vorgegebene Bedingungen angenommen werden. Da in der gängigen Praxis ebenfalls vom Maschinenhersteller abhängige Fertigungsparameter verwendet werden, ist eine Parameteroptimierung in diesem Projekt ebenso nicht vorgesehen. Weiterhin wird die Projektausrichtung auf die Erarbeitung

von Korrelationen zwischen Werkstoffzustand und Materialeigenschaften konkretisiert, mit dem Ziel, kennwertbasierte Rückschlüsse auf auslegungsrelevante Kenngrößen zu ziehen. Teilaspekt ist hierbei eine Methodenentwicklung, die eine Skalierbarkeit auf andere Ausgangsmaterialien ermöglicht. Rückschlüsse, die aus diesen Korrelationen gezogen werden, sind somit unabhängig von sowohl der Fertigungsmaschine, den Fertigungsparametern als auch von der Qualifizierung des Pulvers. Über den Projektinhalt hinaus kann so eine neutrale Datenbasis auf Grundlage des Werkstoffzustands ohne Verlust unternehmensspezifischen Know-Hows erstellt werden. Arbeiten in verschiedenen Arbeitskreisen zur Normung additiv gefertigter, unbefuerter Druckbehälter bestätigen die Notwendigkeit zur Bearbeitung der konkretisierten Arbeitshypothese.

Die an dieses Projekt gesetzten Anforderungen zu verfahrenstechnischen Druckgeräten werden größtenteils von der Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU sowie von der Europäischen Norm EN 13445 beziehungsweise prEN 13445 definiert. Zusätzlich zu den genannten Anforderungen ist in Zusammenarbeit mit dem pbA eine Anforderungsliste erstellt worden, die unter anderem eine Fokussierung des zu untersuchenden Materials auf den austenitischen Stahl 1.4404 (316L) vorsieht.

## **5.2 Voruntersuchungen**

Der initiale Spiegelversuch wird aus AP 2 abgeleitet und dient der systematischen Voruntersuchung der mechanischen Eigenschaften, der Porosität und der Rauheit von Probekörpern aus zwei baugleichen Fertigungssystemen an verschiedenen Standorten. Die mittels PBF-LB/M hergestellten Wänden mit unterschiedlichen Wandstärken und Neigungswinkeln relativ zur Baurichtung untersucht. Insbesondere der Einfluss der Wandstärke auf die mechanischen Eigenschaften und die Porosität wurden bislang in Veröffentlichungen über PBF-LB/M nicht behandelt. Vor allem wird der Einfluss der Wandstärke bei gleicher Querschnittsfläche für unterschiedliche Wandstärken untersucht. Darüber hinaus werden Unterschiede in den Material- und mechanischen Eigenschaften zwischen zwei baugleichen Maschinen untersucht, um die Übertragbarkeit von Prozessparametern zwischen baugleichen Fertigungseinrichtungen zu bewerten. Untersuchungen zur Verwendung des gleichen pulverförmigen Ausgangsmaterials in baugleichen Maschinen sind bisher nicht ausreichend publiziert worden, sind aber von hohem technologischem Interesse für industrielle Fertigungsumfeld.

### **5.2.1 Spiegelversuch (Initialer Vergleich baugleicher Fertigungseinrichtungen)**

Die Probekörper wurden von zwei baugleichen M290-Geräten der EOS GmbH an zwei verschiedenen Fertigungsstandorten hergestellt. Die Spezifikationen für beide Maschinen und Verfahren sind in Abbildung 5 aufgeführt. Als Prozessparameter wurde auf beiden Maschinen der gleiche EOS-Standardparametersatz (316L 040 FlexM291 1.00) verwendet (Tabelle 3), wobei Skywriting und Scanvektoroptimierung eingeschaltet waren. Bei den Parametern für die Kontur, die unteren Bereiche und die kurzen Kanten werden geringere Energiedichten verwendet, während die oberen Bereiche im Vergleich zur Füllung einen höheren Energieeintrag

von  $57,7 \text{ J/mm}^3$  aufweisen. Dies liegt deutlich unter der in [37] ermittelten kritischen Energiedichte für 316L von  $104,2 \text{ J/mm}^3$  und aufgrund der höheren Schichtdicke bei etwa einem Drittel der in [26] verwendeten Energiedichte. Beide Maschinen wurden unter Verwendung derselben Standard Tessellation Language (STL)-Geometrie (Geometrische Bauteil-Rohdaten), des pulverförmigen Materials, der Software und der Bedienerichtlinien vorbereitet. Obwohl beide Maschinen baugleich sind, wurden kleine Unterschiede in der Rayleigh-Länge, dem Fokusbildmesser, dem Beugungskoeffizienten und der linearen Laserleistung festgestellt. Geometrieabhängige Unterschiede in der Scanstrategie, wie z. B. Outskinparameter, wurden nicht berücksichtigt.

Die Maschinen unterscheiden sich hauptsächlich in den Laserspezifikationen. Explizit unterscheiden sich die gemessene Rayleigh-Länge, der Fokusbildmesser und die Beugungsmaßzahl des verbauten Lasers.

	Maschine	TU Darmstadt PTW	Fraunhofer IGCV Augsburg
<b>Maschinen- kenndaten</b>	Seriennummer	3034	2359
	Software		Version 10 M291/Ed.10.18 RFS1.2
	Laser	YLR-400-WC	YLR-400-WC
	Rayleigh-Länge @ 200 W	4,588 mm	4,098 mm
	Fokusbildmesser @ 200 W	82,8 $\mu\text{m}$	75,3 $\mu\text{m}$
	Beugungsmaßzahl @ 200 W	1,09	1,01
<b>Wartung</b>	Linearisierung Laserleistung 370 W	370,7 W (01.03.2018)	365,5 W (07.11.2017)
	Überprüfung Skywriting	i.O. (01.03.2018)	i.O. (16.04.2018)
	Kalibrierung Scanner	01.03.2018	07.11.2017
	Zustand Partikel auffangbehälter	tba	tba
	Zustand Patronenfilter	tba	tba
	Zustand Feinpartikelfilter	tba	tba
<b>Rüstzustand</b>	Schutzgasdüse	EOS Gridnozzle (additiv)	
	Bauplatzform	C45 d 50 mm	C45 d 50 mm
	Schutzgas	Argon 5.0	
	Software Vorbereitung	EOSPRINT Version 2.6	
	Beschichterklänge	EOS HSS Recoater Blade 2200-4073	
	Reinigungsanweisung	Checkliste 31.10.2019	
	Rüstanweisung	Checkliste 28.08.2019	

Abbildung 5: Maschinen- und Verfahrensspezifikationen für die baugleichen Maschinen

Die Proben wurden auf einer quadratischen Plattform von 250 mm Länge aufgebaut, und jede Pulverschicht wurde in positiver x-Richtung aufgetragen. Als Prozessgas wurde Argon verwendet, das mit einem konstanten Eingangsdruck von 6 bar an der Maschine anliegt und dessen Strömung durch die Maschine geregelt wird. Die Strömungsrichtung in der Prozesskammer ist in y-Richtung. In Tabelle 3: Hauptprozessparameter (Infill-Bereich) Die Anordnung der Proben für jeden Bauauftrag sowie die verwendeten Probenparameter Neigungswinkel (N)

und Orientierung (a) sind in Tabelle 4 zusammengefasst und Abbildung 6 dargestellt. Es wurden neue Beschichter-Stahlklingen des Typs EOS 2200 4073 verwendet. Abbildung 6 zeigt einen beispielhaften Baujob mit den beschriebenen Fertigungsanordnungen der sechs Probekörperstapel.

Tabelle 3: Hauptprozessparameter (Infill-Bereich)

Spurabstand	Laserleistung	Scan- geschwindigkeit	Belichtungs- strategie	Schichtdicke
100 µm	214 W	928 mm/s	Streifen, 12 mm	40 µm

In Tabelle 4 sind die betrachteten Parameter und die Faktorstufen für die Fertigung am PTW (Maschine 1) und am Fraunhofer IGCV (Maschine 2) aufgeführt. Das lösungsgeglühte Referenzmaterial (Blech) wird im Weiteren als „Maschine 0“ bezeichnet. Es sind die Ausrichtung und Neigung zur Bauplattform sowie die Querschnittsverhältnisse auf Basis des äquivalenten Durchmessers (Vergleichbarkeit Rundzugprobe) und festgesetzten Wandstärken analog zu Tabelle 4 variiert worden.

Tabelle 4: Übersicht über die hergestellten und getesteten Flachzugproben

Maschine 1				Neigung			
				0°		45°	
				Wandstärke		Wandstärke	
		2 mm	4 mm	2 mm	4 mm		
Ausrichtung	vert.	äquivalent	3 mm	3		3	
		Durchmesser	5 mm	3	3	3	3
hor.	äquivalent	Durchmesser	3 mm	3		3	
		5 mm	3	3	3	3	
total				12	6	12	6
				36			

Maschine 2				Neigung			
				0°		45°	
				Wandstärke		Wandstärke	
		2 mm	4 mm	2 mm	4 mm		
Ausrichtung	vert.	äquivalent	3 mm	3		3	
		Durchmesser	5 mm	3		3	
hor.	äquivalent	Durchmesser	3 mm	3		3	
		5 mm	3		3		
total				12		12	
				24			

Blechmaterial				Neigung			
				0°		45°	
				Dicke		Dicke	
		2 mm	4 mm	2 mm	4 mm		
Ausrichtung	vert.	äquivalent	3 mm	3			
		Durchmesser	5 mm	3	3		
hor.	äquivalent	Durchmesser	3 mm				
		5 mm	3	3			
total				9	6		
				15			

Flachzugproben (T-Proben) wurden gemäß Form E der DIN 50125:2016 12 [38] mit unterschiedlichen Dicken (t), durch den äquivalenten Durchmesser (D) spezifizierten Querschnittsflächen und entsprechenden Messlängen hergestellt. Der äquivalente Durchmesser dient als Referenzgröße, wobei Proben mit gleichem äquivalentem Durchmesser die gleiche Querschnittsfläche aufweisen. Eine D5t2 Probe entspricht einer Form E Zugprobe mit einer Dicke von 2 mm und einem äquivalenten Durchmesser von 5 mm. Die Probenbreite ergibt sich hieraus. Zudem werden die Zugproben in unterschiedlichen Neigungswinkeln (N) zur Bauplattform und Richtungen (a) vertikal (vert.) und horizontal (hor.) zur Bauplattform ausgerichtet. Zur

Sicherstellung der Prozessstabilität sind jeweils drei Platten mit unterschiedlicher Dicke in einem Stack gefertigt worden (Vgl. Abbildung 6). Aus den Platten wurden die Probekörper mittels Wasserstrahlschneiden getrennt. Aufgrund von Problemen beim Wasserstrahlschneiden sind die T-Proben 2 mit einem äquivalenten Durchmesser von 5 mm und einer Wanddicke von 4 mm (M2-D5t4) im Spiegelversuch nicht enthalten. Referenz-T-Proben mit der gleichen Geometrie wurden aus gewalztem und lösungsgeglühtem 316L-Blech hergestellt und werden in dieser Arbeit als T-Proben 3 bezeichnet. Eine Zusammenfassung aller 72 T-Proben findet sich in Tabelle 4.

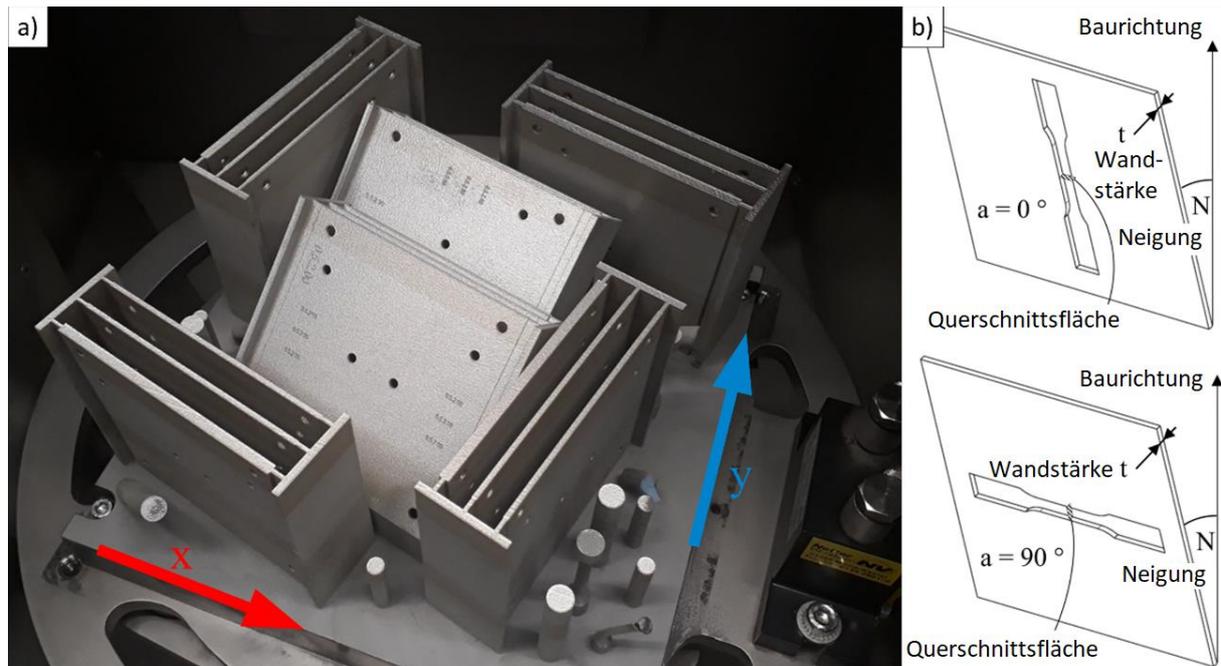


Abbildung 6: (a) Fertigungsanordnung der Proben auf der Bauplattform mit Pulverauftrag aus der x-Richtung (roter Pfeil) und Argon-Prozessgasfluss aus der y-Richtung (blauer Pfeil); (b) schematischer Überblick über die in dieser Untersuchung verwendeten Probenparameter Neigungswinkel (N), Ausrichtung (a), Wandstärke (t) und Querschnittsfläche, dargestellt durch den äquivalenten Durchmesser (D).

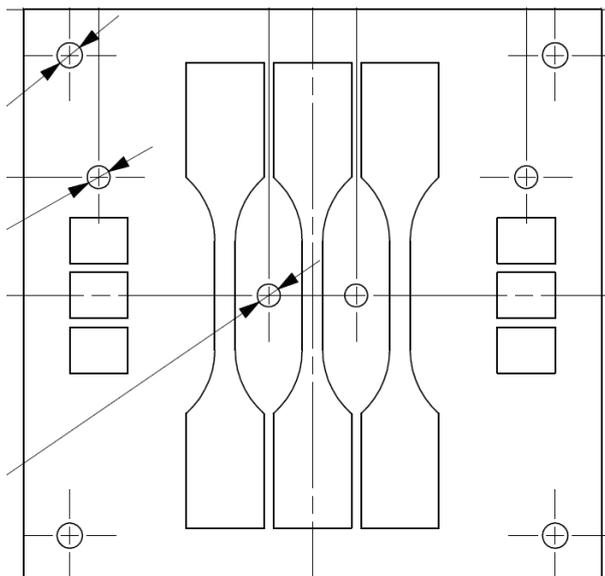
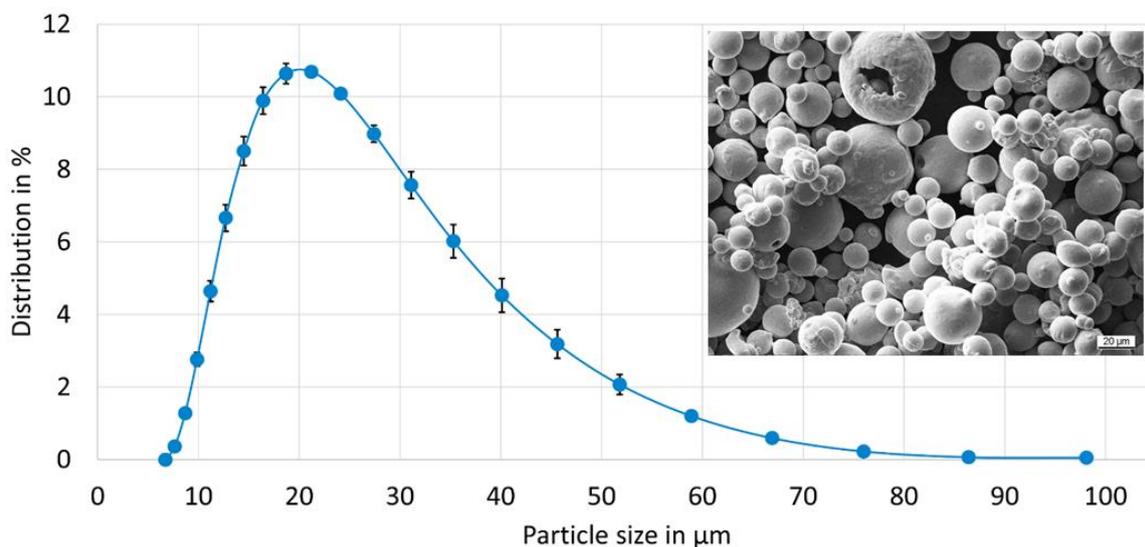


Abbildung 7: Probenplatte mit 3 stehenden Flachzugproben und 6 Schliiffproben

Als pulverförmiger Ausgangswerkstoff wurde ein gasverdüstes Pulver des Materials 1.4404 (316L) der Firma Nanoval GmbH & Co. KG mit einer gemessenen Partikelgrößenverteilung D10/D90 von 15/45  $\mu\text{m}$  verwendet (Vgl. Abbildung 8)

Abbildung 8). Das Pulver wurde vor der Verwendung schutzgesichtet, zeigt jedoch Porosität und Agglomerate in REM-Aufnahmen (EVO 60 – Carl Zeiss GmbH).



D10 ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )
13.1	$\pm 0.047$	22.7	$\pm 0.133$	42.4	$\pm 0.874$

Abbildung 8: Partikelgrößenverteilung gemessen über durch Laserdiffraktometrie

Bei der Auswertung des Spiegelversuchs werden folgende Zielstellungen festgelegt:

- Erhebung einer ersten Datenbasis
- Betrachtung der Streubänder zwischen gleichartigen Anlagen
- Überblick über den Einfluss der gewählten Parameter
- Überblick über die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und Werkstoffzuständen durch die Probengeometrie

### Ergebnisse Mikrostruktur

Beispielhafte Aufnahmen metallographischer Schlitze PBF-LB/M-gefertigten Proben von Maschine 1 und Maschine 2 sowie Schliffbilder von geätztem konventionellen Blechmaterial sind in Abbildung 9 dargestellt. In der Seitenansicht senkrecht zur Baurichtung sind in (a) und (b) für die additiv hergestellten Proben deutlich feine, säulenförmige Körner und Schmelzbadgrenzen aus den Laserspuren zu erkennen. Dies ist typisch für PBF-LB/M [26,39]. Das Kristallwachstum der Körner erfolgt orthogonal zu den Schmelzbadgrenzen entlang des höchsten Temperaturgradienten. In der Draufsicht parallel zur Baurichtung sind in (d) und (e) einzelne Laserspuren zu erkennen. Kleine runde Korngrenzen bestätigen die in der Literatur [30,34,40,41] gefundene säulenförmige Charakteristik des Gefüges, die auch in den EBSD-Bildern zu erkennen ist. Maschine 1 und Maschine 2 zeigen ein ähnliches Mikrogefüge ohne offensichtliche Unterschiede. Mikroskopiebilder(c) und (f) von konventionellen Blechproben R aus verschiedenen Richtungen zeigen für gewalzte und lösungsgeglühte 316L-Bleche ein typisches austenitisches Gefüge.

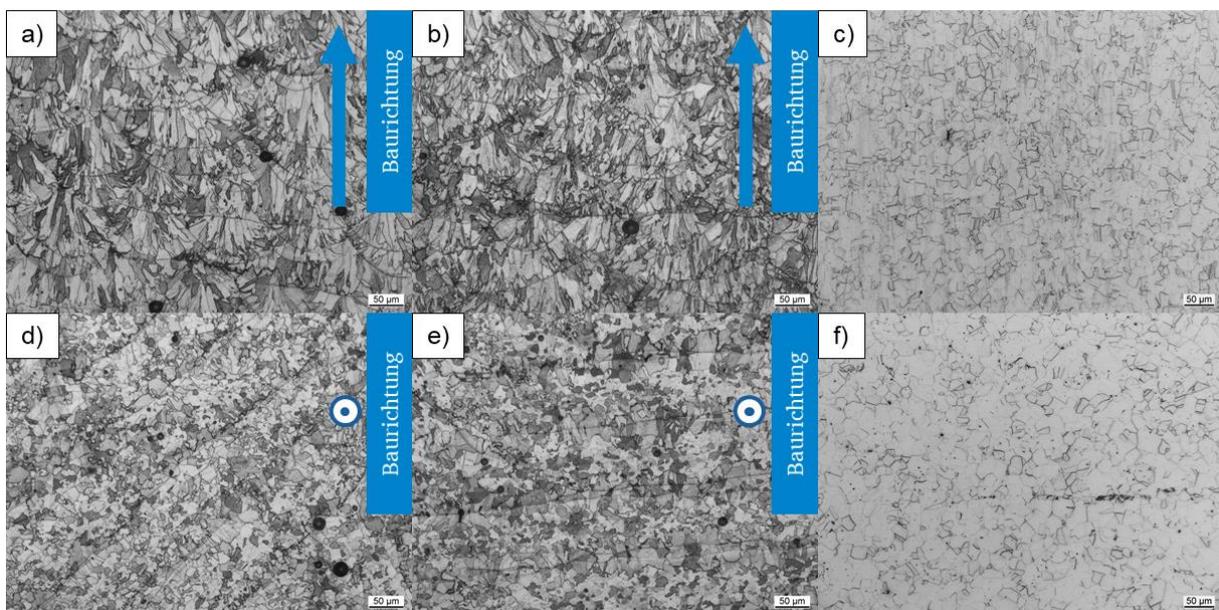


Abbildung 9: Optische Mikroskopie von geätzten Proben: a,d) Maschine 1, b,e) Maschine 2, c,f) konventionelles Blechmaterial

Obwohl festgestellt wurde, dass der austenitische 316L unter bestimmten Prozessbedingungen in Martensit umgewandelt werden kann [31], konnten weder durch optische Mikroskopie noch mit einer XRD-Analyse (Vgl. Abbildung 10) signifikante Hinweise auf die Bildung von Martensit gefunden werden. Dies bestätigt die Ergebnisse von [26]. Die Autoren von [29] beobachteten in der Gefügeanalyse Nadelstrukturen, die als Austenitnadeln identifiziert wurden. Nach [30] bildet sich Martensit nur bei sehr geringen Laserleistungen. Abbildung 10 zeigt ein

beispielhaftes XRD-Diffraktogramm einer additiv gefertigten Probe. Darüber hinaus ergab die quantitative Phasenanalyse nach ASTM E 975-13 keine alpha-Ferrit-Phase in den untersuchten PBF LB/M-Proben.

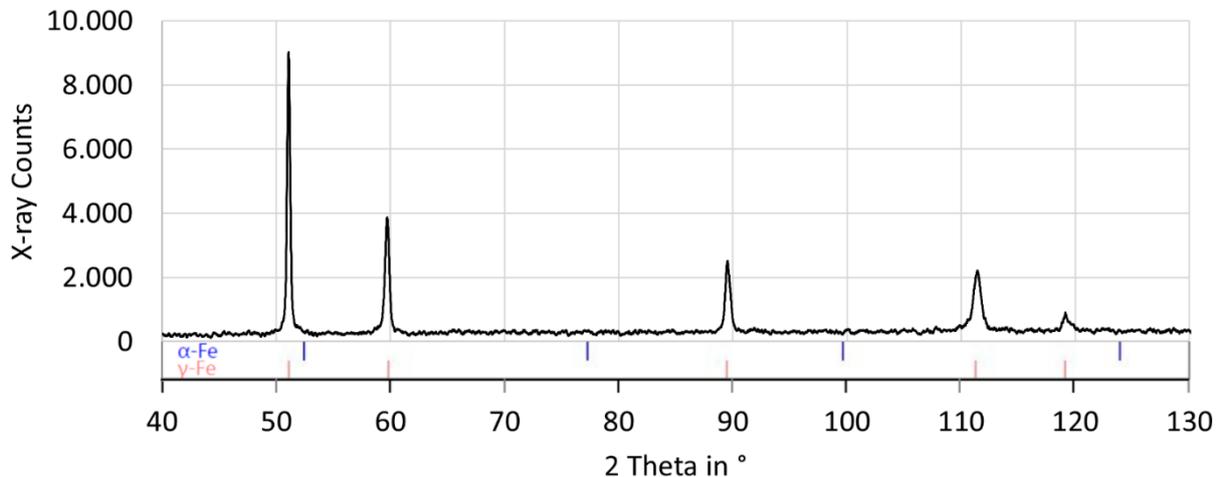


Abbildung 10: Beispielhaftes XRD-Diffraktogramm von additiv gefertigten Proben

Abschließend wird beobachtet, dass sich das anisotrope Gefüge der PBF-LB/M-Proben stark von dem konventionellem 1.4404-Gefüge unterscheidet. Deshalb werden die Mikrostrukturanalysen im weiteren Projektverlauf als zielführend bewertet. Die XRD Analyse ist repräsentativ für alle Proben im Schlussbericht.

### Ergebnisse statisch mechanischer Eigenschaften

Im Vergleich zu den aus konventionellem Blech gefertigten Referenzproben weisen die mit PBF-LB/M gefertigten Proben beider PBF-LB/M-Maschinen (M1, M2) ähnliche mechanische Eigenschaften auf. Sowohl die Zugfestigkeit aller Proben als auch die Bruchdehnung der vertikalen ( $\alpha 0^\circ$ ) Proben bei  $0^\circ$  Neigungswinkel zeigen einen übertragbaren Trend. Die Dehngrenze der additiv gefertigten Proben ist etwa 40 % höher. Bei den AM-Proben wurden leicht höhere Werte für die Dehngrenze und die Zugfestigkeit in horizontaler Richtung ( $\alpha 90^\circ$ ) sowie eine um etwa 20 % geringere Bruchdehnung im Vergleich zur vertikalen Richtung festgestellt. Horizontale additiv gefertigte Proben weisen im Vergleich zu konventionellen Maschine 3 Referenzproben eine um bis zu 35 % geringere Bruchdehnung auf.

Eine Übersicht über die verglichenen Proben mit einem äquivalenten Durchmesser (D) von 5 mm und einer Wanddicke (t) von 2 mm (Bsp. D5t2) ist in Abbildung 11 dargestellt.

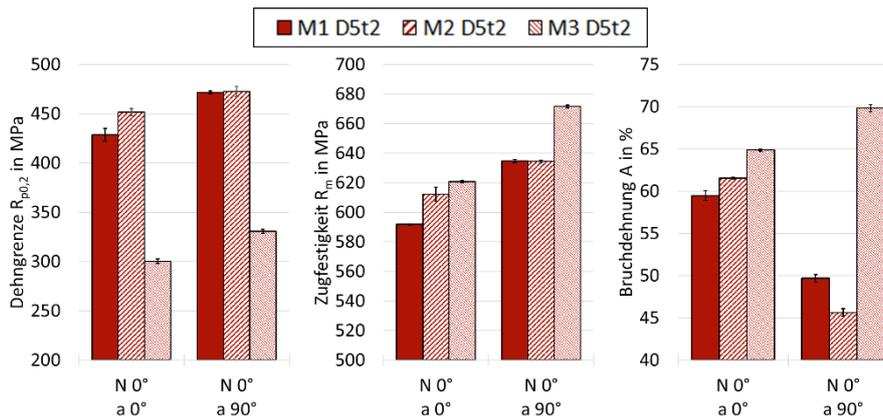


Abbildung 11: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Zugproben D5t2, die entweder mit PBF-LB/M (M1, M2) oder aus konventionellem Blechmaterial (M3) erzeugt wurden

Abbildung 12 zeigt den Vergleich der mechanischen Eigenschaften von zwei verschiedenen Probenabmaßen, mit unterschiedlichem äquivalentem Durchmesser bei gleicher Probendicke, aus zwei identischen PBF-LB/M-Maschinen an zwei verschiedenen Standorten.

Während die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften zwischen den Proben mit der Geometrie D5t2 aus beiden Maschinen gering sind, unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften für die Probengeometrie D3t2 deutlich, insbesondere bei der Dehngrenze sowie der Zugfestigkeit, mit rund 10 % bzw. rund 7 % höheren Werten für Maschine 2. Im Allgemeinen weist Maschine 2 für beide Probengeometrien bessere mechanische Eigenschaften auf. Somit ist die Übertragbarkeit von Festigkeitswerten nicht gegeben, selbst bei baugleichen Anlagen unter möglichst gleichen Fertigungsbedingungen.

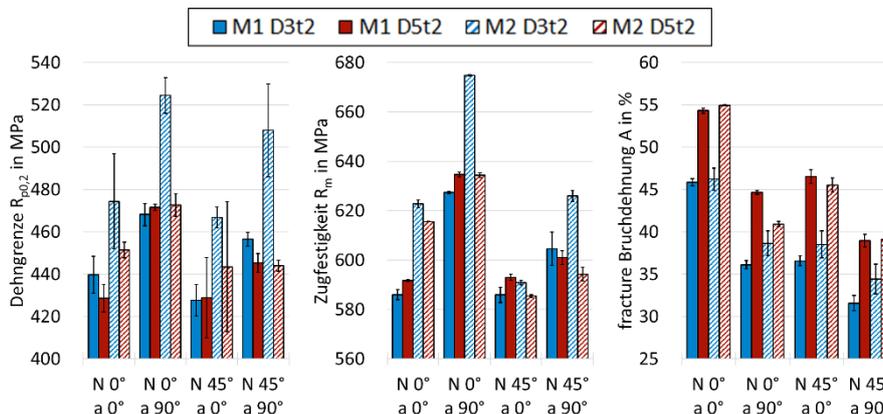


Abbildung 12: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Zugproben aus AM Maschine 1 und 2, mit zwei Querschnitts-Geometrien D3t2 und D5t2

Eine Übersicht über die Zugversuche gemäß DIN EN ISO 6892-1:2020-06 [42] der mit Maschine 1 hergestellten Proben ist in Abbildung 13 zu sehen. Im Allgemeinen zeigen die gemessenen Einzelwerte eine geringe Streuung, mit einigen Ausnahmen bei der Dehngrenze. Unterschiede in der Dehngrenze, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung sind deutlich zwi-

schen den Proben zu erkennen, wobei die Abweichungen vom Neigungswinkel (N), der Ausrichtung (a), der Wanddicke (t) und der Querschnittsfläche der Probe, die durch den äquivalenten Durchmesser (D) eines Kreises mit gleicher Fläche beschrieben wird, abhängen.

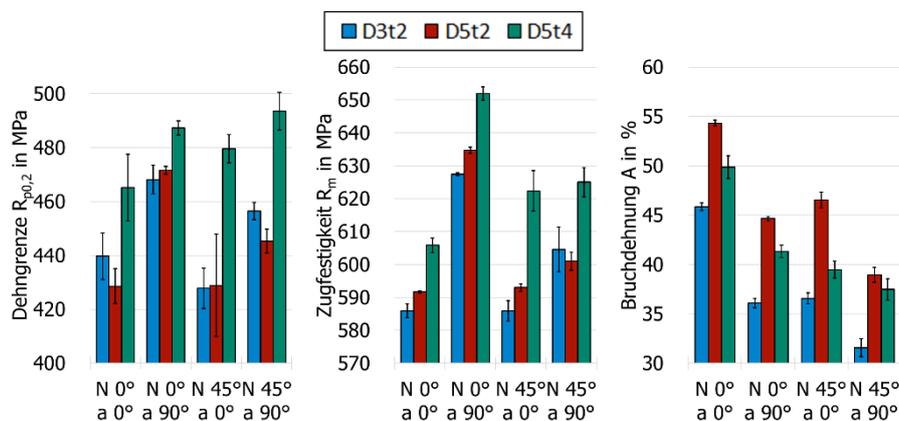


Abbildung 13: Mechanische Eigenschaften der mit Maschine 1 hergestellten Zugproben (T) mit Variationen des Neigungswinkels (N), der Ausrichtung (a), des äquivalenten Durchmessers (D) sowie der Wandstärke (t)

Der Einfluss des Neigungswinkels auf die statisch mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur ist in Abbildung 14 für die im Spiegelversuch hergestellten Zugproben dargestellt.

Alle folgenden Effekte stellen dabei Haupteffekte gemäß einer auf linearen Modellen basierenden Versuchsplanung (DoE) dar. Diese Haupteffekte beschreiben Trends der untersuchten Eigenschaft in Bezug auf alle in dieser Studie verwendeten Parameter und stellen nicht den tatsächlichen Verlauf der Abhängigkeiten dar.

Da die Probengeometrie D5t4 für Maschine 1, aber nicht für Maschine 2 zur Verfügung steht, unterscheidet sich der ermittelte Effekt des Neigungswinkels aufgrund möglicher Kreuzkorrelationen geringfügig. Im Allgemeinen neigen alle untersuchten Festigkeitseigenschaften dazu, mit zunehmendem Neigungswinkel abzunehmen, mit Ausnahme der Probe D5t4 der Maschine M1, die eine leicht zunehmende Dehngrenze mit zunehmendem Neigungswinkel aufweist, während das Verhalten der Zugfestigkeit und Dehnung dem der anderen Probengeometrien entspricht. Kreuzkorrelationen bezüglich des Einflusses des Neigungswinkels und des Einflusses der Probengeometrien können nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

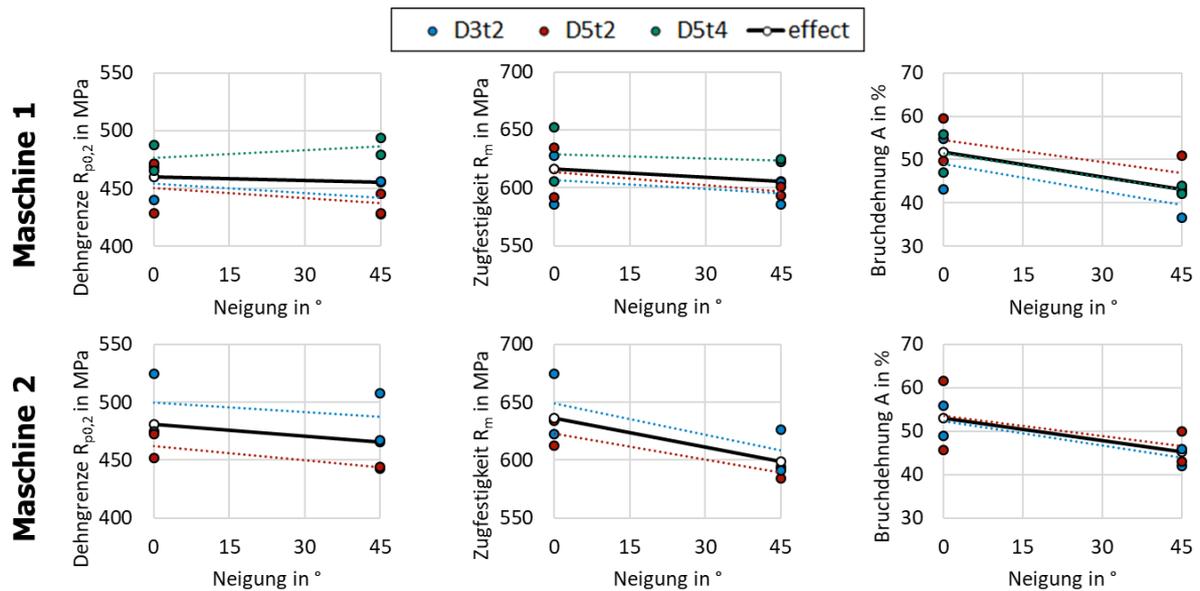


Abbildung 14: Einfluss des Neigungswinkels zur Bauplattform auf die Dehngrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Zugproben von Maschine 1 und 2

Was die Auswirkung der Ausrichtung betrifft, so lassen sich für beide Maschinen sehr ähnliche Tendenzen beobachten (Vgl. Abbildung 15).

Während die Dehngrenze und die Zugfestigkeit bei den horizontalen Proben beider Maschinen um etwa 5 % höher liegen, übersteigen die Bruchdehnungen der vertikalen Proben die der horizontalen Proben im Durchschnitt um bis zu 20 %. Bei den Proben mit einem Neigungswinkel von  $0^\circ$  zeigt die Probe M1 D3t2 eine um 27 %, die Probe M2 D3t2 eine um 21 %, die Probe M1 D5t2 eine um 22 % und die Probe M2-D5t2 eine um 34 % geringere Bruchdehnung in horizontaler Richtung als in vertikaler Richtung. Bei Proben mit Neigungswinkeln von  $45^\circ$  ist die Bruchdehnung in horizontaler Richtung ebenfalls durchweg geringer als in vertikaler Richtung. Die Abnahme der Bruchdehnung von  $45^\circ$ -Proben ist jedoch nicht so ausgeprägt im Vergleich zu den  $0^\circ$ -Proben. Ein Vergleich der Datenpunkte von D3t2 und D5t2 aus M2 zeigt eine geringe Kreuzkorrelation mit der Querschnittsfläche, was zu einem größeren Einfluss der Orientierung auf YS und UTS bei kleineren Querschnittsflächen führt. Dieser Effekt ist jedoch bei den Proben von Maschine 1 nicht zu beobachten.

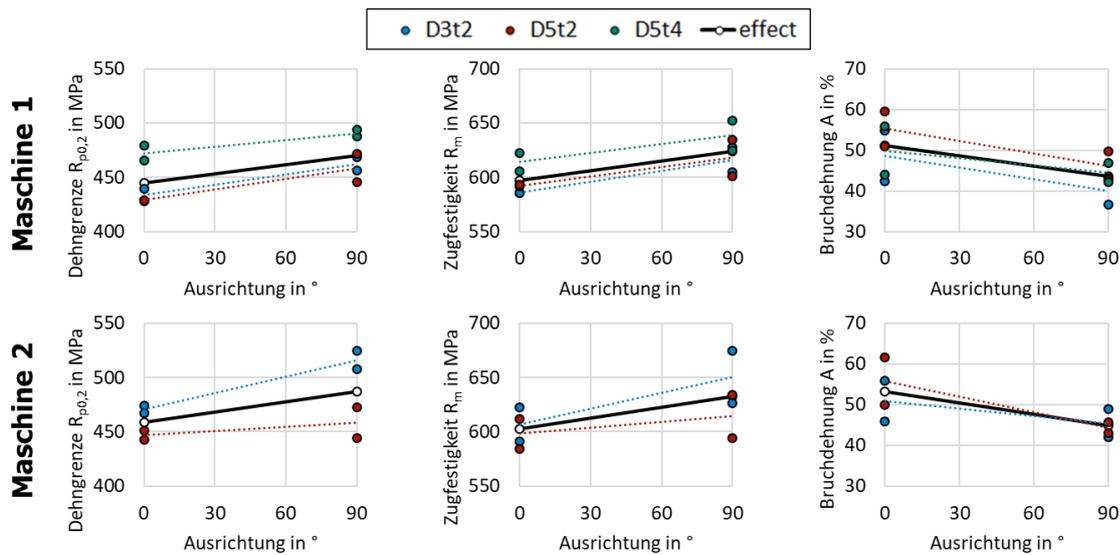


Abbildung 15: Einfluss der Ausrichtung auf die Dehngrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Zugproben von Maschine 1 und 2

Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften sind bei verschiedenen äquivalenten Durchmessern für beide Maschinen zu erkennen und sind in Abbildung 16 dargestellt.

Obwohl die Zugfestigkeit mit zunehmender Querschnittsfläche bei den Zugproben aus Maschine 1 leicht ansteigt und bei den Proben aus Maschine 2 mit zunehmender Querschnittsfläche abnimmt und somit die Tendenzen der Zugfestigkeit bei den beiden Maschinen nicht übereinstimmen, zeigt die Dehngrenze sowie die Dehnung bei beiden Maschinen ähnliche Abhängigkeiten von der Querschnittsfläche. Die Dehngrenze nimmt bei den Zugproben aus Maschine 2 mit zunehmender Querschnittsfläche um bis zu 10 % und die Zugfestigkeit um bis zu 5 % ab, während die Dehnung bei den Zugproben aus Maschine 1 mit zunehmender Querschnittsfläche um bis zu 20 % zunimmt. Der Effekt ist für die Dehngrenze und Zugfestigkeit bei Maschine 1 und für die Bruchdehnung bei Maschine 2 jedoch nicht sehr ausgeprägt.

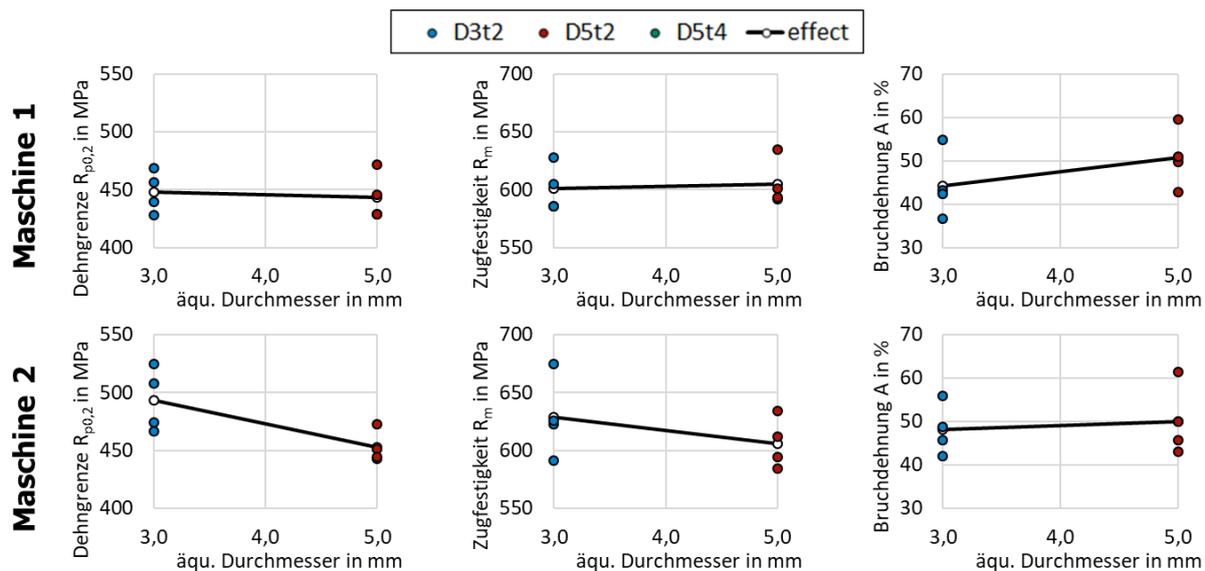


Abbildung 16: Einfluss des äquivalenten Zugprobendurchmessers auf die Dehngrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Maschine 1 und 2

Der Einfluss der Wanddicke auf die mechanischen Eigenschaften ist in Abbildung 17 zu sehen. Proben mit gleicher Querschnittsfläche, aber dickerer Wanddicke weisen im Vergleich zu Proben mit geringerer Wanddicke eine um etwa 10 % höhere Dehngrenzen und eine um etwa 5 % höhere Zugfestigkeit auf. Andererseits ist die Bruchdehnung bei einer größeren Wanddicke um bis zu 5 % geringer.

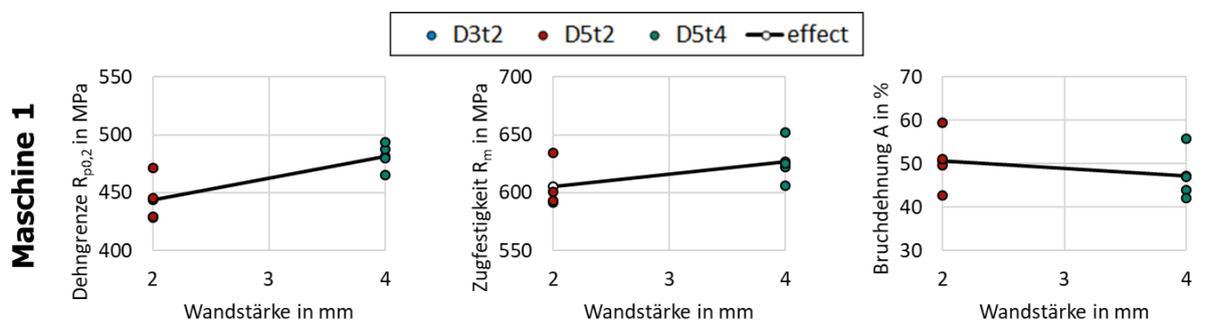


Abbildung 17: Einfluss der Wandstärke auf die Dehngrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Zugproben aus Maschine 1

In Bezug auf die Maschinenabhängigkeit kann subsumiert werden, dass trotz der Fertigung auf zwei identischen Fertigungseinrichtungen unterschiedliche Ergebnisse aus dem Zugversuch resultieren. Dies hat zur Folge, dass jedes Fertigungssystem gesondert qualifiziert werden muss. Die Probengeometrie scheint ebenfalls einen Einfluss auf die untersuchten mechanischen Kennwerte zu haben und werden durch eine gesonderte Versuchsreihe im Anschluss an den initialen Spiegelversuch vorgenommen und bewertet.

### Ergebnisse Eigenspannungen

In einer weiterführenden Untersuchung wurden die Eigenspannungen der Proben aus dem Spiegelversuch der Maschine 1 mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) nach DIN EN 15305:2009-01 [43] gemessen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen in verschiedenen Richtungen an Proben unterschiedlicher Geometrien und Neigungen kann in Abbildung 18 eingesehen werden.

XRD-Messungen in die gleiche Richtung relativ zur Probe (Probenquer- beziehungsweise Probenlängsrichtung) zeigen ähnliche Werte für die Eigenspannungen. Allerdings weisen diese bezogen auf die Ausrichtung auf eine deutliche Anisotropie hin. In Probenlängsrichtung liegen für alle Probengeometrien Zugeigenspannungen vor, die sich in der Höhe jedoch für die jeweiligen Geometrien unterscheiden. In Probenquerrichtung hingegen weisen die Proben relativ geringe Eigenspannungen im leichten Zug- als auch Druckbereich auf. Über den Einfluss der Neigung auf die Eigenspannungen ist auf Basis der Ergebnisse des Spiegelversuchs keine eindeutige Aussage möglich.

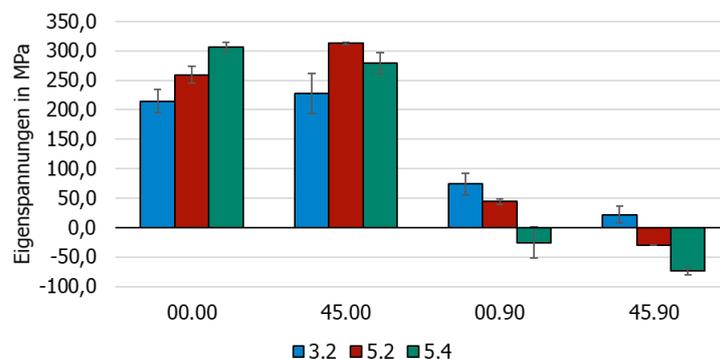


Abbildung 18: Eigenspannungen an Proben aus dem Spiegelversuch der Maschine 1 in 0° und 45° Neigung in Probenquer- (.90) und Probenlängsrichtung (.00)

### Einfluss des Spannungsarmglühens

Für die Reduktion fertigungsbedingter Eigenspannungen werden in der gängigen Praxis häufig Wärmebehandlungen in Form von Spannungsarmglühen durchgeführt. Um den Einfluss der Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften und die Eigenspannungen zu untersuchen, wurden Teile des Probenumfangs einer Wärmebehandlung bestehend aus:

- 3 h Aufheizen
- 5 h Halten bei 560°C und
- langsamem Ofenabkühlen bis auf Entnahmetemperatur

unterzogen. Die durchgeführte Wärmebehandlung entspricht nicht den Standardparametern für den Werkstoff 316L, sondern wird so in der Fertigung bei einem Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses angewendet. Die Ergebnisse der anschließenden Eigenspannungsmessung an jeweils drei senkrecht gebauten additiven Flachzugproben mit Wärmebehandlung (wb) und ohne Wärmebehandlung (ab) in Probenquer- (90°) und Probenlängsrichtung (00°) sind in Abbildung 19 gegenübergestellt.

Generell zeigen sich keine wesentlichen Verringerungen der Eigenspannungen in den wärmebehandelten Flachzugproben durch den Wärmebehandlungszyklus.

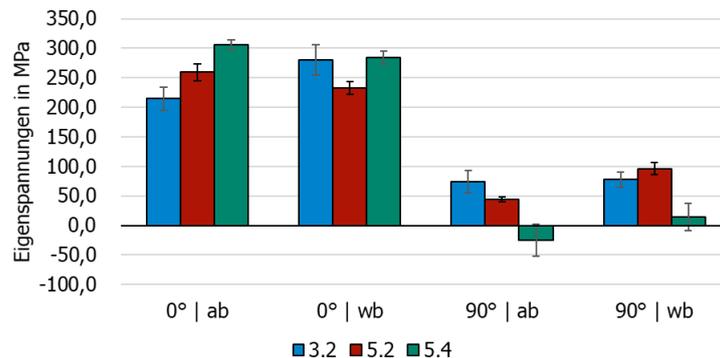


Abbildung 19: Vergleich der Eigenspannungen an senkrecht gebauten Flachzugproben mit Wärmebehandlung (wb) und ohne Wärmebehandlung (ab) in Probenquer- (90°) und Probenlängsrichtung (00°)

Die Ergebnisse der weiterführenden Zugversuche an den Flachzugproben mit Wärmebehandlung (wb) und ohne Wärmebehandlung (ab) sind in Abbildung 30 zusammengefasst. Generell weisen die wärmebehandelten Proben über alle mechanischen Kennwerte des Zugversuchs hinweg verringerte Werte auf. Ein Spannungsarmglühen des PBF-LB/M hergestellten Werkstoffs 316L in Form mit den verwendeten Parametern wurde daher nicht weiterverfolgt, weil keine positiven Effekte erzielt wurden.

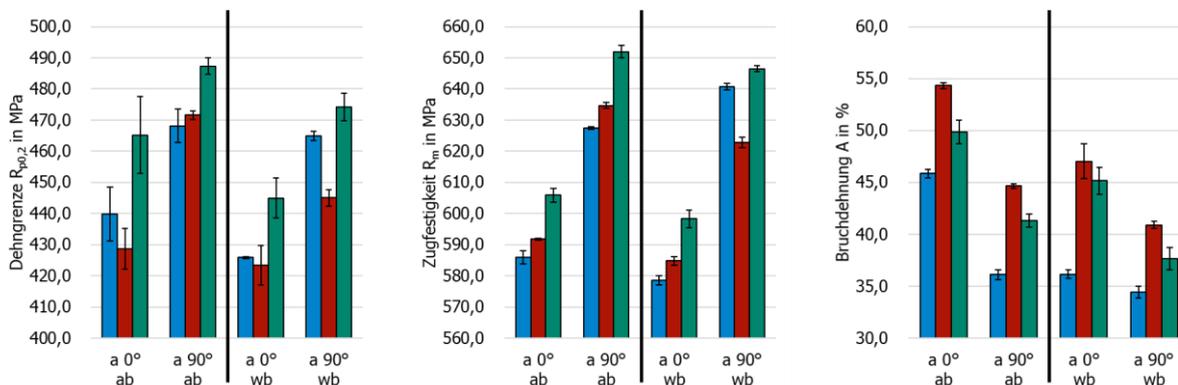


Abbildung 20: Vergleich der mechanischen Kennwerte von Flachzugproben aus dem Spiegelversuch mit Wärmebehandlung (wb) und ohne Wärmebehandlung (ab) in Probenquer- (90°) und Probenlängsrichtung (00°)

### Ergebnisse Dichtemessungen

Die Zugproben aus dem Spiegelversuch sind abschließend über eine archimedische Dichtemessung gemäß DIN 66137-3:2019-03 [44] analysiert worden, um Effekte der Neigung, Wandstärke sowie der Probenbreite bezüglich der Dichte zu identifizieren. Es ist zu beachten, dass über die Archimedes Dichtemessung weder eine quantitative Aussage über die Porosität noch über die Porenverteilung innerhalb des Kernmaterials bis zur Probenoberfläche getroffen werden kann.

Zwecks der fehlenden Aussagequalität wird empfohlen, zur Bewertung der Porosität Schlifffbilder und lichtmikroskopische Porositätsuntersuchungen zu verwenden.

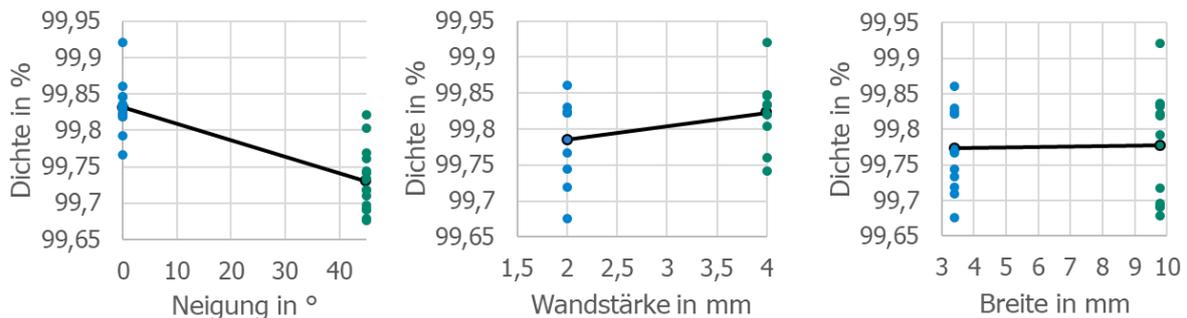


Abbildung 21: Haupteffektanalyse der Dichte von Zugproben (Spiegelversuch) durch archimedische Dichtemessung

Abbildung 21 zeigt die Effektanalyse der archimedischen Dichtemessung der Zugproben-Geometrien aus dem Spiegelversuch. Die Breite der Zugprobe zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die gemessene Dichte, wobei 45° geneigte Proben eine geringere Dichte aufweisen. Gleichermäßen zeigen dünnwandige Proben ebenfalls eine geringere Dichte als Proben mit höherer Wandstärke. Aufgrund dieser Ergebnisse werden im Weiteren lichtmikroskopische Porositätsanalysen in Abhängigkeit der Neigung zur Bauplattform und der Wandstärke durchgeführt.

### Zusammenfassung

Zugversuche an mit PBF-LB/M gefertigten Proben aus austenitischem rost- und säurebeständigem Stahl 316L zeigen im Vergleich zu konventionell gefertigten Proben aus Blech etwa 40 % höhere Dehngrenzen und vergleichbare Zugfestigkeiten. Darüber hinaus zeigen sie geringere Bruchdehnungen, insbesondere bei horizontalen Proben. Dies bestätigt die Ergebnisse bestehender Arbeiten [20]. Da mittels Röntgendiffraktometrie keine signifikanten Martensitanteile gemessen wurden, können die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften nicht auf die Bildung von Martensit während des Fertigungsprozesses zurückgeführt werden. Es wird vermutet, dass die höhere Dehngrenze aus dem feineren Gefüge und die geringere Bruchdehnung aus Porosität und Defekten an Schmelzbadgrenzen resultiert. Die etwas niedrigeren Zugfestigkeiten lassen einen Einfluss durch eine Verfestigung aufgrund des feineren Gefüges als auch durch eine Schwächung aufgrund der erhöhten Porosität vermuten. Die Mikrostruktur der Bruchfläche zeigt die charakteristischen Merkmale eines duktilen Scherbruchs mit Grübchen, was die Ergebnisse von [45] für Proben mit geringer Porosität bestätigt.

Die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Bruchdehnung, erweisen sich als anisotrop, was dazu führt, dass die Dehngrenze und die Zugfestigkeit in vertikaler Richtung parallel zur Baurichtung um etwa 5 % höher sind als in vertikaler Richtung und die Bruchdehnung um bis zu 20 % höher ist. Dies lässt sich auch durch die säulenförmige und damit anisotrope Mikrostruktur erklären, die sich aus dem schichtweisen Herstellungsprozess von PBF-LB/M ergibt und in der Literatur hinreichend beschrieben ist [32,33,46–48].

Die mit zunehmendem Neigungswinkel abnehmenden mechanischen Eigenschaften lassen sich sowohl durch die anisotropen Eigenschaften des Gefüges als auch durch höhere Porosität und Oberflächenrauheit aufgrund spezifischer thermischer Prozessbedingungen an den Downskin-Bereichen erklären.

Die Probengeometrie hinsichtlich Querschnittsfläche und der Wanddicke wirkt sich auf die ermittelten mechanischen Eigenschaften aus dem axialen Zugversuch aus. Es hat sich gezeigt, dass Proben mit gleicher Querschnittsfläche, aber geringerer Wanddicke, bis zu 10 % weniger Dehngrenze und bis zu 5 % weniger Zugfestigkeit, aber bis zu 20 % mehr Bruchdehnung aufweisen. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für Proben mit gleicher Wanddicke, aber größerer Querschnittsfläche festgestellt wurde.

Außerdem konnten differierende mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Dehngrenze und Zugfestigkeit zwischen den Zugproben aus Maschine 1 und Maschine 2 festgestellt werden. Darüber hinaus konnten Unterschiede in der Auswirkung der verwendeten Parameter, wie Querschnittsfläche und Neigungswinkel, auf die mechanischen Eigenschaften zwischen den Proben der beiden verwendeten Maschinen festgestellt werden. Diese Unterschiede können aus den in Abbildung 5 dargestellten Laserkennwerten liegen. Die tatsächliche Ursache für die differierenden mechanischen Eigenschaften und die Auswirkungen der Parameter kann jedoch nicht abschließend geklärt werden.

### 5.2.2 Einführung WOrM-Modell

Prozessbedingte Anisotropien der Materialeigenschaften sowie Fertigungsrestriktionen (Überhänge, Wandstärke, etc.) im PBF-LB/M Verfahren führen zu einem aufwändigen Prozessqualifizierungsprozess mit begrenzter Übertragbarkeit auf andere oder sogar vergleichbare Fertigungssysteme. Nach Rücksprache mit dem pbA wurde der Projektfokus auf ein Datenmodell gerichtet, welches begleitend zum Qualifizierungsprozess Verwendung finden und letztendlich konkrete Vorschläge zur Qualifizierung eines Fertigungsprozesses abbilden soll. Dieses Modell wird **W**andungs- und **O**rientierungsabhängiges **M**aterial-Modell (WOrM-Modell) genannt.

In Abbildung 22 ist eine schematische Übersicht zur Qualifizierung additiver Fertigungssysteme auf Basis des WOrM-Modells dargestellt.

Ziel ist die Reduktion des Untersuchungsraums auf druckgerätespezifische Bauteilmerkmale auf Basis eines geschlossenen Behälters, das Ableiten von Geometriemerkmalen für die Abstraktion anwendungsnaher Probekörper und letztendlich die Struktur zur systematischen Ablage von Versuchsergebnissen. Letztendlich soll auf Basis des WOrM-Modells die Vorhersage des Werkstoffzustands und somit Rückschluss auf Werkstoffeigenschaften (Vgl. Abbildung 23) in Abhängigkeit von Wandungsmerkmalen als wesentliches Merkmal eines klassischen Druckbehälters ermöglicht werden.



- die chemische Zusammensetzung mittels Funkenemissionsspektroskopie,
- die Mikrostruktur mittels Gefügeanalyse metallographischer Schriffe und
- die Analyse der chemischen Homogenität mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie

untersucht werden. Die *Materialeigenschaften* werden über

- die Härte mittels Härteprüfungen nach Vickers,
- die Festigkeitskennwerte mittels quasi-statischen Axial-Zugversuchen,
- die Kerbschlagzähigkeit mittels Kerbschlagbiegeversuchen und
- die Kurzzeitfestigkeit (Low-Cycle-Fatigue) mittels Dauerschwingversuchen

bestimmt.

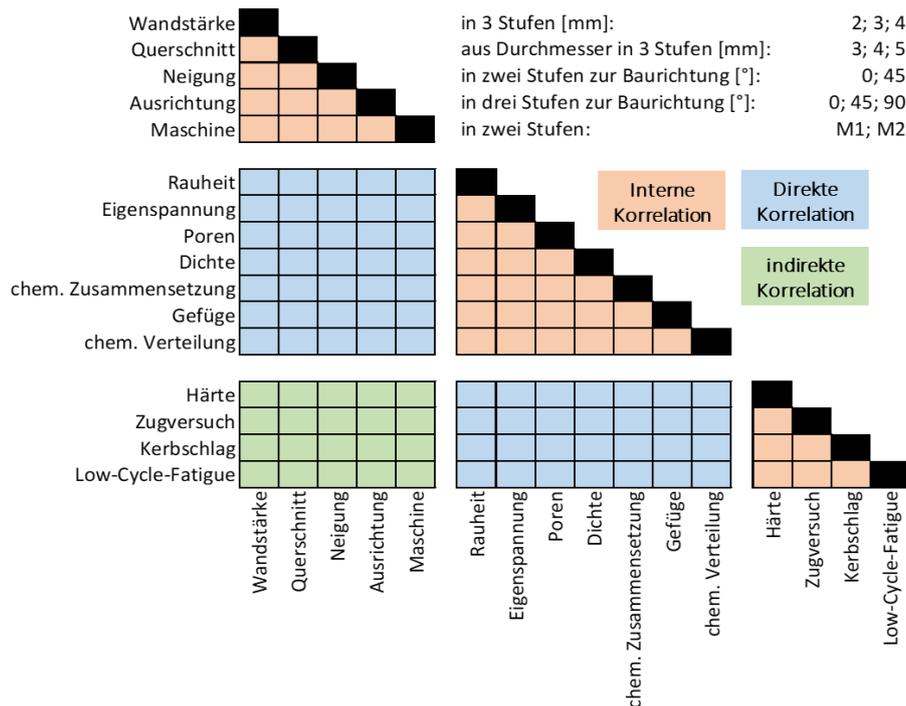


Abbildung 24: Übersicht der betrachteten Einfluss- und Zustandsgrößen in der entwickelten Untersuchungsmethodik

Verschiedene Analysemethoden und Probedesigns werden betrachtet, um die Übertragbarkeit auf Druckgeräte zu gewährleisten und die industrielle Anwendbarkeit sicherzustellen. Ziel ist es, für jede Materialeigenschaft ein geeignetes Analyseverfahren zu empfehlen als auch den Fertigungs- und Prüfaufwand durch definierte Parameter, Faktoren und Probedesigns sowie durch die Nutzung von Synergien zu reduzieren.

Zunächst sind Porosität und Rauheit untersucht worden. Am Beispiel der Porosität können Ziele und das Vorgehen entnommen werden. Unabhängig von der Analyse werden Wandstärke, Neigung und Ausrichtung als zu untersuchende Merkmale von Behälterstrukturen fixiert. Das WOrM-Modell ist jedoch durch zusätzliche Eigenschaften erweiterbar.

Das WOrM-Modell beinhaltet folgende geometrische Randbedingungen einer additiv hergestellten Behälterstruktur

- Wandstärke
- Neigung
- Ausrichtung

Dies hat zum Ziel anisotrope Werkstoffzustände sowie Materialeigenschaften vollständig zu dokumentieren, um darauf aufbauend modellbasiert Korrelationen zu ermitteln.

Der dafür benötigte Versuchsaufwand, wie auch die Bauteileinzelqualifikationen, ist in der bisherigen Praxis sehr hoch und kostenintensiv. Weiterhin sind die Vorteile der additiven Fertigung wie z.B. dünnwandige Strukturen und einstellbare Oberflächenrauheit aufgrund der nach wie vor auf konventionell hergestellten Werkstoffen ausgelegten Prüfmethodik nicht prüf- und nutzbar.

### **5.3 Untersuchung von Werkstoffzustand und Materialeigenschaften**

#### 5.3.1 WOrM-Wandungsversuche

In den WOrM- Wandungsversuchen werden zunächst Wandbereiche hinsichtlich der Porositätsausbildung, der Rauheitsausprägung sowie der thermisch induzierten Eigenspannungen untersucht. Hierfür werden die Faktoren Wandungsdicke und Neigung betrachtet. In den WOrM-Wandungsversuchen stehen drei Fertigungseinrichtungen zur Verfügung. Einerseits die im Spiegelversuch verwendeten Forschungsanlagen der TU Darmstadt (WOrM 1.2) und dem Fraunhofer IGCV (WOrM 3.1) sowie eine Industrieanlage der Fa. Rosswag (WOrM 2.3). Hierbei steht die erste Ziffer X der WOrM X.Y Versuche für die Nummer der Versuchsreihe und die zweite Ziffer Y für den Fertigungsstandort der Versuchsreihe. Weitere WOrM-Versuchsreihen werden entsprechend der Nomenklatur fortgeführt.

Abbildung 25 zeigt das exemplarische Versuchsdesign für die WOrM-Wandungsversuche 1.2 am PTW der TU Darmstadt. Jede Faktorkombination aus dem Versuchsplan wird dreifach angefertigt (Ausnahme WOrM 3.1) und in einem Bauteil vereint. An Trennfugen können die Wände geteilt werden, sodass die Analyseflächen für die Probenpräparation zugänglich sind und in den Analyseprozessen zugeführt werden können.

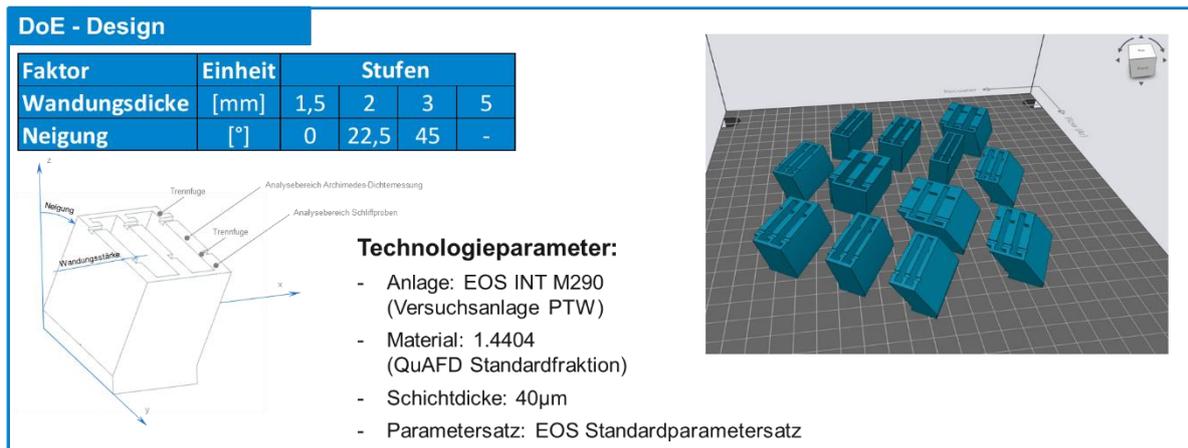


Abbildung 25: Versuchsdesign und DoE Faktorstufen für WOrM- Wandungsversuch 1.2 (PTW-TU Darmstadt)

Eine Übersicht der untersuchten Parameter und die jeweilige Anzahl der Proben kann in Abbildung 26 eingesehen werden. in der Versuchsreihe WOrM 3.1 wurden ebenfalls 5 Rundzugproben pro Neigung als Zylinder mitgefertigt, die mechanisch auf Kontur DIN 50125 – B 4 x 20 bearbeitet wurden.

WOrM 1.2		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3		3		3	
	2,0 mm	3		3		3	
	2,5 mm						
	3,0 mm	3		3		3	
	4,0 mm						
	5,0 mm	3		3		3	
Summe		12		12		12	
		36					

WOrM 2.3		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3	3	3	3	3	3
	2,0 mm	3	3	3	3	3	3
	2,5 mm	3	3	3	3	3	3
	3,0 mm	3	3	3	3	3	3
	4,0 mm	3	3	3	3	3	3
	5,0 mm	3	3	3	3	3	3
Summe		18	18	18	18	18	18
		108					

WOrM 3.1		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	2		2	2	2	2
	2,0 mm	2		2	2	2	2
	2,5 mm	2		2	2	2	2
	3,0 mm	2		2	2	2	2
	4,0 mm						
	5,0 mm	2		2	2	2	2
Summe		10		10	10	10	10
		50					

Abbildung 26: Versuchsplan für die Versuchsreihe WOrM- Wandungsversuche

Porositätsanalyse mittels Lichtmikroskopie

In den beispielhaften lichtmikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 27) der Porosität nicht geätzter WOrM 1.2 Proben ist eine Anhäufung runder Poren sowie eine höhere Oberflächenrauheit im Bereich der Unterseite bei Proben mit einem Neigungswinkel von 45° zur Bauplattform zu erkennen.

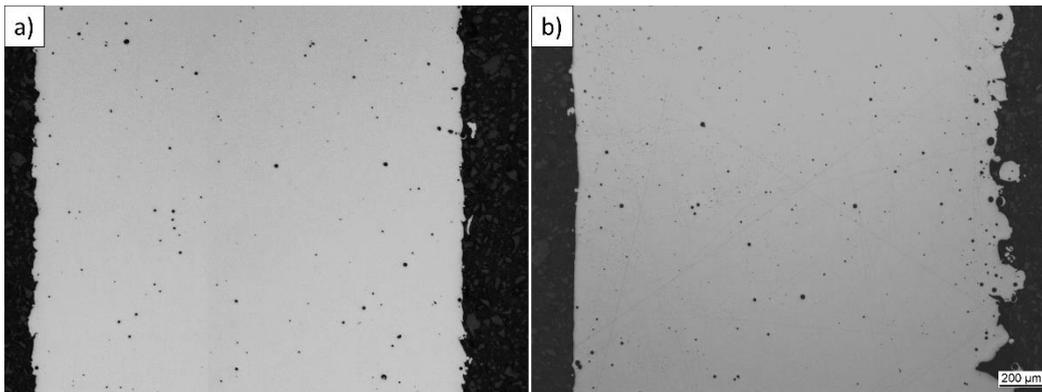


Abbildung 27: Beispielhafte lichtmikroskopische Aufnahmen der Porosität in ungeätzten WOrM 1.2 Proben bei (a) 0° und (b) 45° Neigungswinkel, die eine hohe Oberflächenrauheit und eine Anhäufung von oberflächennaher Porosität im Bereich der Unterseite zeigen

Die Porosität der WOrM 1.2, 2.3, 3.1 Versuchsreihe, in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Wanddicke ist in Abbildung 28 dargestellt.

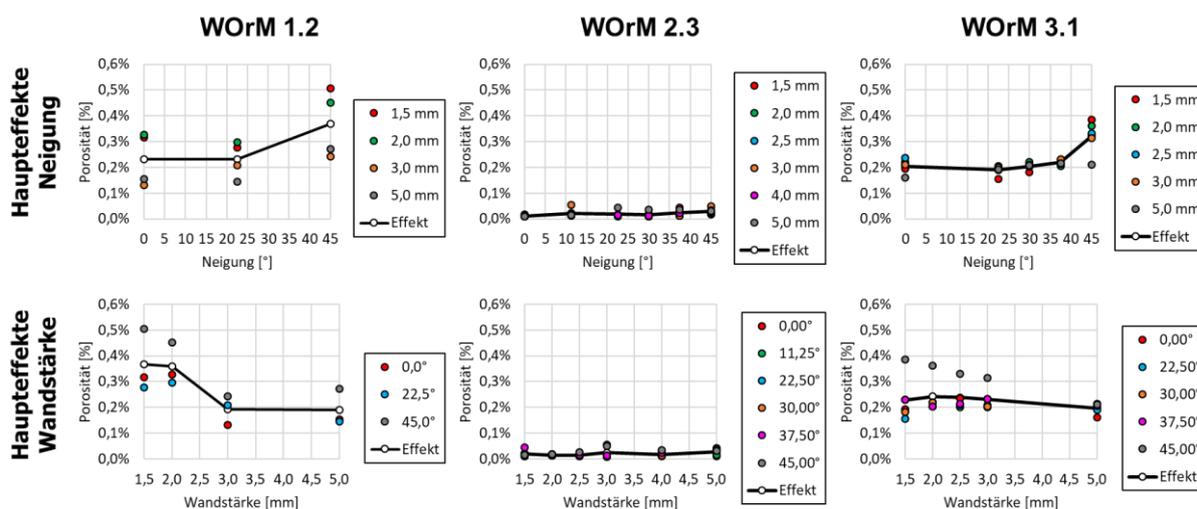


Abbildung 28: Porosität der WOrM -Wandungsversuche in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Wandstärke

Die WOrM 1.2- und WOrM 3.1-Proben zeigen ähnliche Porositätswerte von etwa 0,2 % mit sehr ähnlichen Tendenzen bei zunehmendem Neigungswinkel mit einer Porosität von bis zu 0,5 %. Zunächst ändert sich die Porosität bei kleineren Neigungswinkeln bis zu 37,5° nur geringfügig, steigt dann aber bei 45° stark an. Während jedoch die Porosität in WOrM 1.2 Proben mit zunehmender Wanddicke im Durchschnitt um etwa 45 % abnimmt, ist diese Abhängigkeit nur bei Wänden mit Neigungswinkeln von 45° in WOrM 3.1 zu erkennen. Wände mit geringeren Neigungswinkeln der WOrM 3.1 zeigen keine offensichtlichen Abhängigkeiten von der Wandstärke. Trotz gleicher Fertigungsparameter sowie Verwendung Fertigungseinrichtungen des gleichen Modells (analog zu Kapitel 5.2.1) muss angemerkt werden, dass sich die zu er-

wartende Porosität unterscheidet. Die Ergebnisse aus dem Spiegelversuch werden somit gefestigt. Die bei der Fa. Rosswag GmbH gefertigten WOrM 2.3 Proben zeigen keine signifikanten Unterschiede der Porosität in Abhängigkeit der Neigung und Wandstärke innerhalb des Untersuchungsraumes. Es kann abgeleitet werden, dass das unterliegende Fertigungssystem, bestehend aus Fertigungsanlage, Ausgangsmaterial, Prozessparametersatz sowie Fertigungsablauf einen signifikanten Einfluss auf die betragsmäßige Porosität hat und daher Optimierungspotenziale durch System- und Parameteroptimierung erzielt werden können. Eine allgemeingültige, prozessunabhängige Modellbildung ist somit nicht möglich.

### Rauheitsanalyse mittels Lichtmikroskopie

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen, die in Abbildung 29 für die Downskin Flächen und in Abbildung 30 für die Upskin Flächen dargestellt sind, zeigen für alle WOrM Wandungsversuche nahezu identische Tendenzen. Als Downskin-Flächen werden Bauteiloberflächen bezeichnet, deren Oberflächennormale in Richtung der Bauplattformebene zeigt (Vgl. VDI 3405 Blatt 3.2 [49]).

Im Bereich der Downskin Flächen nimmt die Rauheit mit steigendem Neigungswinkel zu. Wie bei der Porosität der WOrM Versuche 1.2 und 3.1 ist die Zunahme bei größeren Neigungswinkeln höher als bei kleineren Winkeln und erreicht ihren Höhepunkt bei einem Neigungswinkel von 45° mit einer Rauheit von Rz bei rund 200 µm, was etwa viermal höher ist als bei senkrecht orientierten WOrM Wandungsproben. Abhängigkeiten von der Wanddicke sind nicht eindeutig zu erkennen. Abweichend zu den Porositätswerten der WOrM 2.3 Proben (Rosswag GmbH) zeigen die Proben einen ähnlichen Rauheitsverlauf wie die WOrM 1.2 und 3.1 Probekörpern.

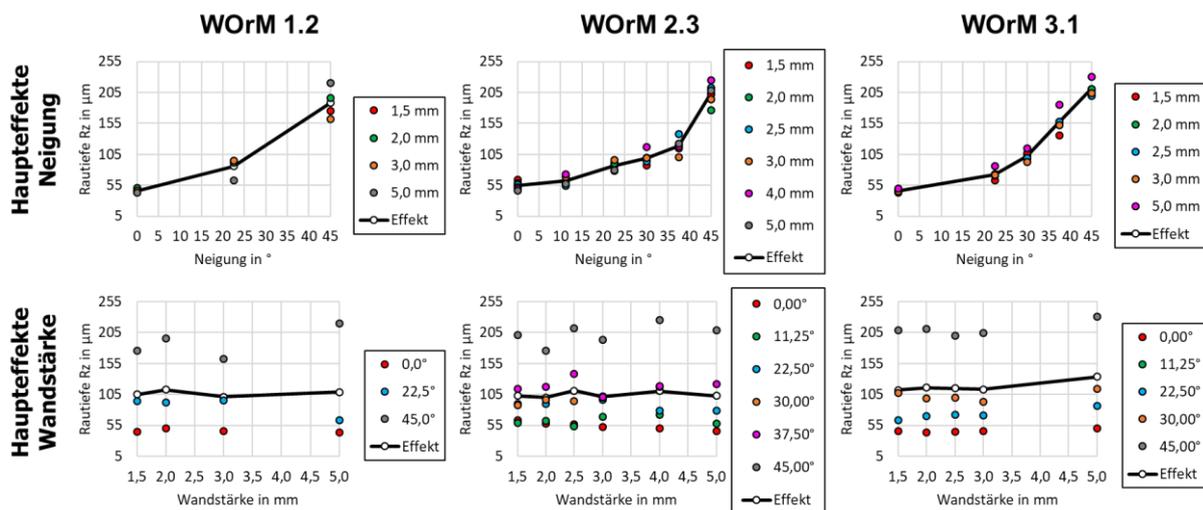


Abbildung 29: Oberflächenrauheit des Downskin Flächen der WOrM -Wandungsversuche in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Wandstärke.

Obwohl alle WOrM Wandungsproben auch für die Rauheit auf der Upskin Fläche eine vergleichbare Tendenz aufweisen, sind die gemessenen Rauheitswerte bei höheren Neigungswinkeln im Vergleich zur Unterseite deutlich geringer. Die Rauheitswerte steigen mit zunehmenden Neigungswinkeln an. Die höchsten Rauheitswerte werden bei einem

Neigungswinkel von 45° mit einem Maximalwert von Rz ca. 100 µm gemessen. Eine Abhängigkeit der Oberflächenrauheit von der Wanddicke lässt sich auch für die Upskin Flächen nicht feststellen (Vgl. Abbildung 30).

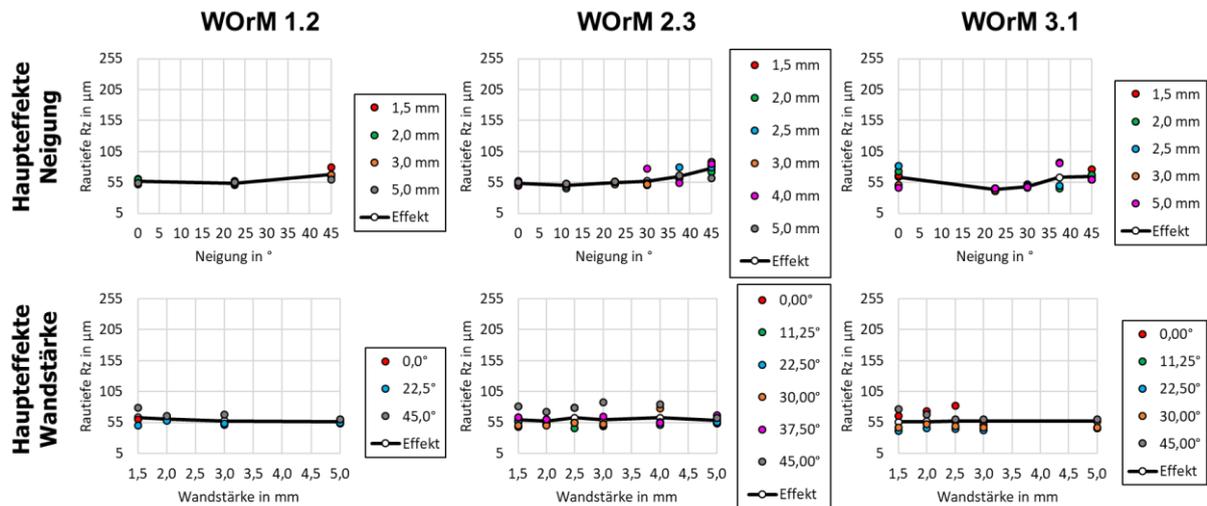


Abbildung 30: Oberflächenrauheit des Upskin Flächen der WOrM -Wandungsversuche in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Wandstärke.

Abbildung 31 zeigt exemplarische REM-Aufnahmen der Oberflächen von additiv gefertigten Zugproben, die mit einem Neigungswinkel von (a) 0° und (b) 45° im Bereich der Downskin Fläche hergestellt wurden. Diese zeigen eine stärkere Anhäufung von ungeschmolzenen oder teilweise geschmolzenen Partikeln des pulverförmigen Ausgangsmaterials bei größeren Neigungswinkeln.

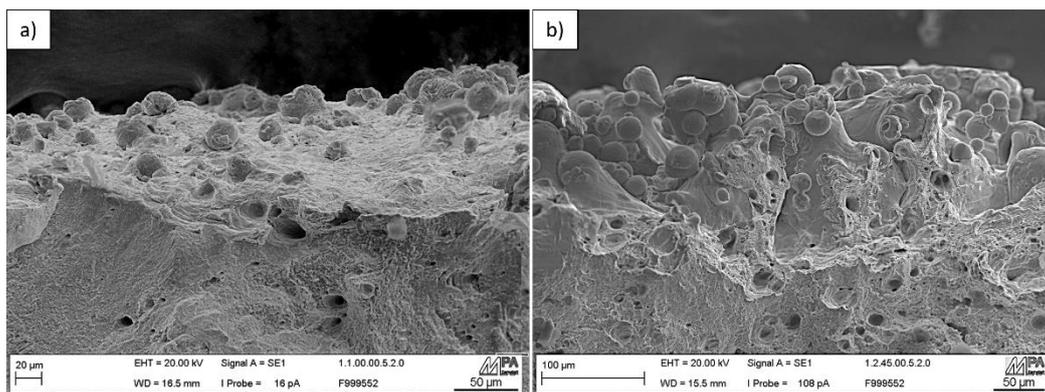


Abbildung 31: Beispielhafte REM-Aufnahmen der Oberfläche von additiv gefertigten Zugproben mit einem Neigungswinkel von (a) 0° und (b) 45° im Bereich der Downskin Fläche

### Eigenspannungsmessung mittels Röntgendiffraktometrie

In einer weiterführenden Untersuchung wurden die Eigenspannungen der Proben aus der Versuchsreihe WOrM 2.3 durch Röntgendiffraktometrie bestimmt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Messung an der Oberfläche im Upskin-Bereich der Proben ist in Abbildung

32 dargestellt. Jeder Punkt in der Abbildung steht für den Mittelwert aus 3 Einzelmessungen an gleichen Flachzugproben. Die Messunsicherheiten der Einzelmessungen liegen im Mittelwert bei ungefähr 15 MPa mit geringeren Messunsicherheiten bei niedrigen Neigungen und vereinzelt höheren Messunsicherheiten bis ca. 30 MPa bei höheren Neigungen. Eigenspannungsmessungen im Downskin-Bereich resultierten aufgrund der hohen Rauheiten und Anhaftungen von Pulverpartikeln zu fehlerhaften und nicht belastbaren Ergebnissen, die in dieser Ausarbeitung nicht weiter ausgeführt werden.

In Baurichtung liegen hohe Zugeigenspannungen bis fast 360 MPa vor. Eigenspannungen orthogonal zur Baurichtung sind generell deutlich geringer bis ungefähr 100 MPa im Vergleich zu den Eigenspannungen in Baurichtung und liegen teilweise, vor allem bei hohen Neigungswinkeln, im Druckbereich. Dies bestätigt die Eigenspannungsmessungen aus dem Spiegelversuch (Abbildung 18).

Alle Eigenspannungen im Upskin-Bereich, sowohl in Baurichtung als auch orthogonal zur Baurichtung zeigen eine abnehmende Tendenz bei hohen Neigungswinkeln, wobei die Eigenspannung in Baurichtung bis  $22,5^\circ$  zuerst leicht ansteigt, beziehungsweise in etwa gleich bleibt.

Eigenspannungen in Baurichtung zeigen generell eine steigende Tendenz bei größeren Wandstärken, wobei Werte für die Wandstärken 2,5 mm und 3 mm eine hohe Streuung aufweisen. Eigenspannungen orthogonal zur Baurichtung zeigen bis 3 mm eine abnehmende Tendenz, die vor allem für hohe Neigungswinkel auch Werte im Druckbereich aufweisen können. Für die Eigenspannungen der Wandstärke 4,0 zeigen die Messergebnisse generell ähnliche Werte wie für die Wandstärke 3 mm mit einer etwas höheren Streuung. Die Eigenspannungen für Proben mit Wandstärke 5 mm weisen im Vergleich zu Eigenspannung der Proben mit Wandstärke 3 mm und 4 mm eine steigende Tendenz im Zugbereich auf.

Generell zeigen die Eigenspannungen damit sowohl eine Abhängigkeit zur Neigung als auch eine Abhängigkeit zur Wandstärke.

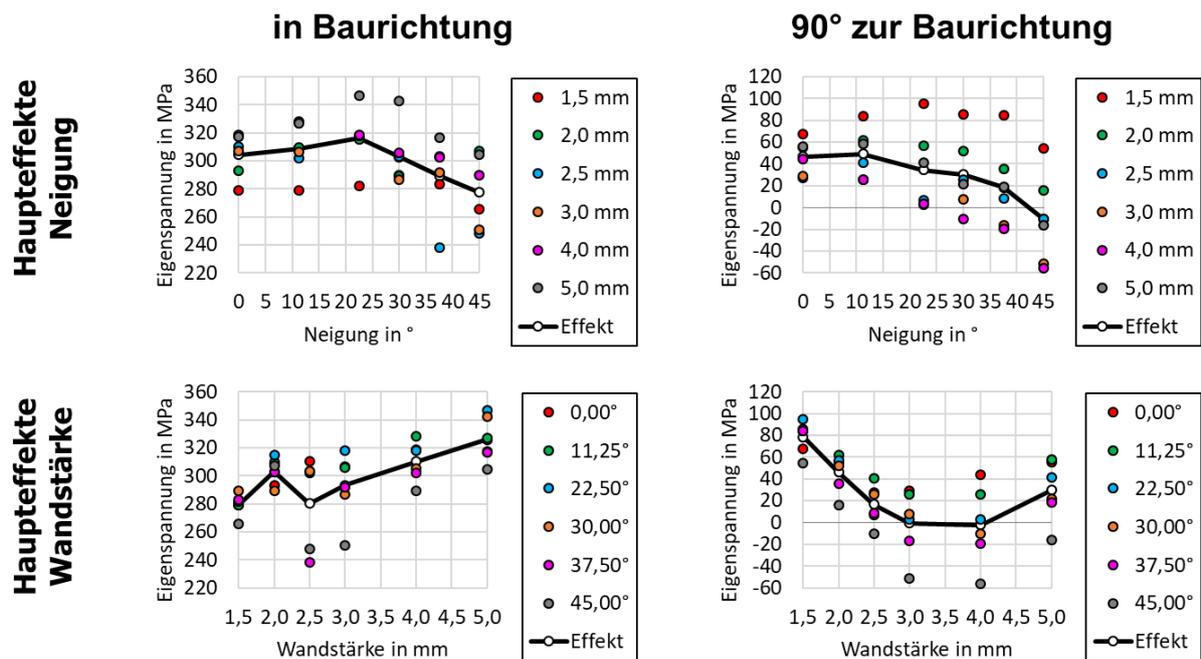


Abbildung 32: Zusammenfassung der Eigenspannungsmessungen an der Oberfläche im Upskinbereich der Proben aus der Versuchsreihe WORM 2.3

Interne Forschungsarbeiten zu anderen Werkstoffen zeigen, dass die größten Eigenspannungen mittels PBF-LB/M hergestellter Proben unterhalb der Oberfläche liegen. Dies kann zum einen durch Anhaftungen von eigenspannungsarmem Pulvermaterial an der Oberfläche und zum anderen durch Kontur-Parameter an den Rändern erklärt werden, welche durch mehrmaliges Aufschmelzen und Erstarren der Randschichten einen Eigenspannungsabbau bewirken können. Daher wurden beispielhaft weitere Eigenspannungsmessungen mit elektrochemischem Tiefenabtrag an Proben der Versuchsreihe WORM 2.3 durchgeführt. Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen mit Tiefenabtrag sind in Abbildung 33 für verschiedene Wandstärken und verschiedene Neigungen vergleichend dargestellt. Die Linien in der Abbildung sind nur zur Anschauung und entsprechen nicht dem tatsächlichen Verlauf der Eigenspannungen. Der Abtrag erfolgte in Intervallen von jeweils 0,1 mm bis zu einer maximalen Tiefe von 1 mm. Die Messunsicherheiten der Einzelmessungen liegen im vergleichbaren Bereich zu denen der Eigenspannungsmessungen an der Oberfläche bei bis zu 30 MPa. Die Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse der internen Forschungsarbeiten. Das Maximum der Zugeigenspannungen liegt unterhalb der Oberfläche und der Betrag der Eigenspannung sinkt mit dem Abstand zur Probenmitte bis die Eigenspannungen in den Druckbereich übergehen. Auf Grundlage der Ergebnisse wird die maximale Druckspannung in der Mitte der Wandstärke vermutet.

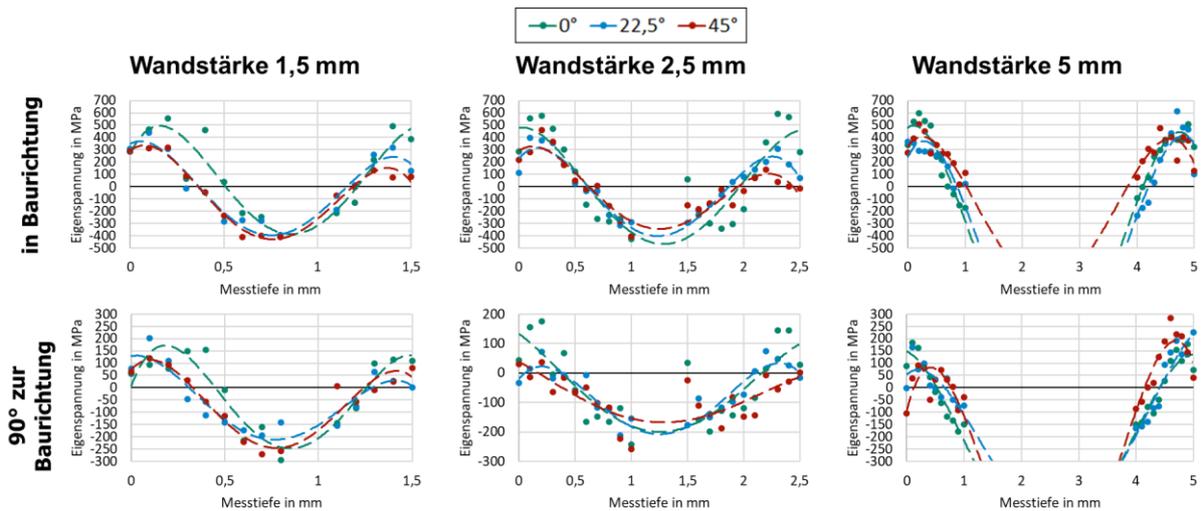


Abbildung 33: Vergleich der Eigenspannungen von Proben unterschiedlicher Wandstärke aus der Versuchsreihe WOrM 2.3 bei elektrochemischem Tiefenabtrag. Linien sind nur zur Anschauung und entsprechen nicht dem tatsächlichen Verlauf der Eigenspannungen.

Die maximalen Zugeigenspannungen innerhalb der Proben der Versuchsreihe WOrM 2.3 sind in Abbildung 34 zusammengefasst. Während die maximalen Eigenspannungen in Baurichtung in Bezug auf die Neigung in ähnliche abnehmende Verläufe wie die Ergebnisse der oberflächennahen Messungen resultieren, weisen die maximalen Eigenspannungen orthogonal zur Baurichtung unterschiedliche Tendenzen für unterschiedliche Wandstärken auf.

Die Abhängigkeit der maximalen Zugeigenspannungen zur Wandstärke zeigt in Baurichtung relativ einheitliche steigende Tendenzen mit zunehmender Wandstärke, während die Werte orthogonal zur Baurichtung analog zu den oberflächennahen Messungen zuerst bei 2,5 mm abnehmen und anschließend bei 5 mm ansteigen.

Generell sind die maximalen Eigenspannungen im Inneren der Probe deutlich höher als die gemessenen Eigenspannungen an der Oberfläche. Vor allem in Baurichtung weisen vertikale Proben unabhängig von der Wandstärke Zugeigenspannungen von bis zu 600 MPa auf.

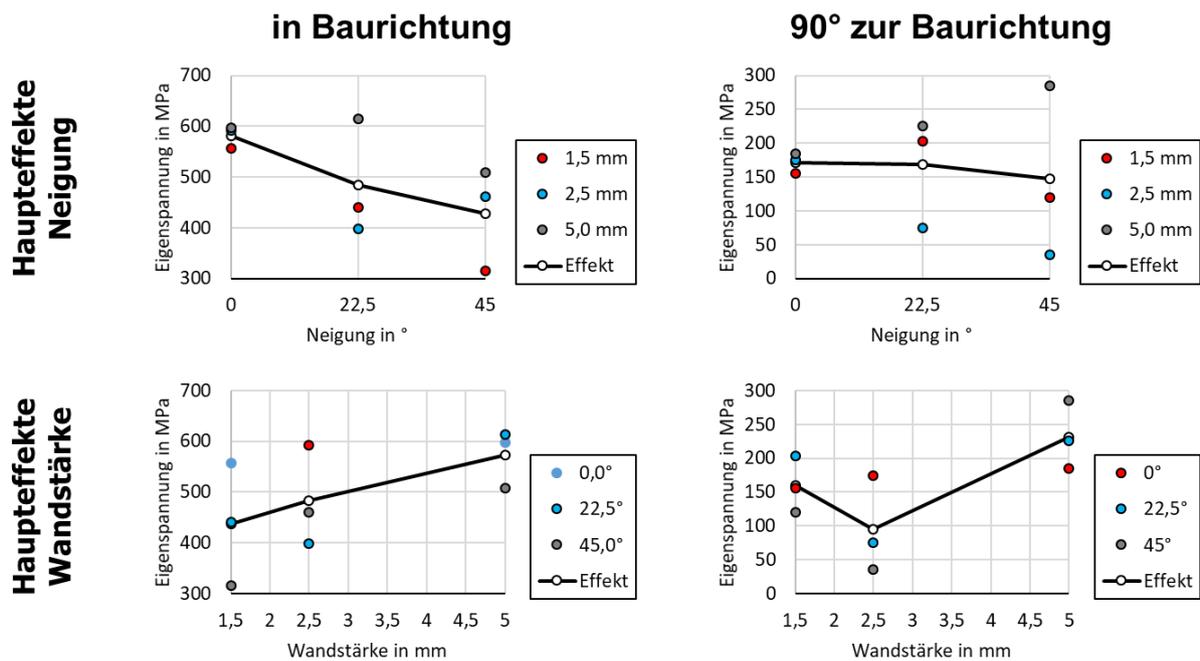


Abbildung 34: Maximale Zugeigenspannungen bei Eigenspannungsmessungen mit elektrochemischem Tiefenabtrag in Proben der Versuchsreihe WOrM 2.3

Die Eigenspannungsmessungen an Proben der Versuchsreihe WOrM 2.3 haben gezeigt, dass PBF-LB/M hergestellte Proben große Zugeigenspannungen in Baurichtung aufweisen und diese vor allem mit geringem Abstand zum Rand unterhalb der Oberfläche liegen. Die Eigenspannungen sind anisotrop und sind orthogonal zur Baurichtung deutlich geringer ausgeprägt. Weiterhin zeigen sie Abhängigkeiten zur Neigung und zur Wandstärke beziehungsweise Geometrie der Proben. Im Tiefenverlauf wandeln sich die Zugspannungen unter Annäherung der Probenmitte in Druckspannungen um. Für die Untersuchung der Eigenspannungen ist dementsprechend eine Messung mit Tiefenabtrag zu empfehlen.

Unter Berücksichtigung der starken Abhängigkeit von der Geometrie und unter Annahme, dass Eigenspannungen keinen wesentlichen Einfluss auf quasi-statische mechanische Eigenschaften haben, werden in Anbetracht des praktischen Nutzens für die Industrie und der Projektziele keine weiteren Untersuchungen an Eigenspannungen durchgeführt.

### Quasi-statische Zugversuche an Rundzugproben

Um den Einfluss der Neigung und der veränderlichen Werkstoffzustände, vor allem die Porosität, auf die mechanischen Eigenschaften im Kern ohne Einfluss der Oberflächeneffekte zu untersuchen, wurden als Referenz zu den mechanischen Kennwerten der Flachzugproben aus dem Spiegelversuch in der Versuchsreihe WOrM 3.1 ebenfalls 5 Rundzugproben pro Neigung als Zylinder mitgefertigt, die mechanisch auf Kontur DIN 50125 – B 4 x 20 bearbeitet wurden. Diese wurden anschließend in einem quasi-statischen Zugversuch geprüft. Abbildung 35 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 3.1. Generell zeigen die Rundzugproben steigende Zug-

festigkeiten und Dehngrenzen und sinkende Bruchdehnungen bei steigendem Neigungswinkel. Diese im Vergleich zum Spiegelversuch gegensätzliche Tendenz werden in weiteren Versuchen untersucht. Im Vergleich zum Spiegelversuch zeigen die Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 3.1 geringere Dehngrenzen und Zugfestigkeiten bei einer Neigung von 45°. Die gegensätzlichen Tendenzen als auch die unterschiedlichen mechanischen Kennwerte lassen einen überlagerten Einfluss von Oberflächeneffekten bei Flachzugproben vermuten.

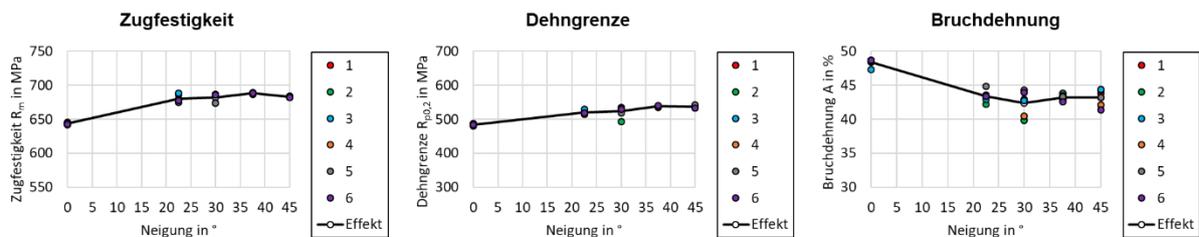


Abbildung 35: Zusammenfassung der Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 3.1 mit den Einzelmessungen 1-6 und des Effekts in Abhängigkeit der Neigung

Anhand der Ergebnisse der Versuche WOrM 1.2, 2.3 und 3.1 lässt sich eine Abhängigkeit des Werkstoffzustands, vor allem von der Neigung der Probe feststellen. Es konnte keine Abhängigkeit der Rauheit von der Wandstärke festgestellt werden. Tendenziell sinkende und in Abhängigkeit der Neigung unterschiedlich sinkende Porositäten bei größeren Wandstärken lassen eine gegenseitige Abhängigkeit der Porosität von Neigung und Wandstärke vermuten. Gemessene Eigenspannungen weisen Unterschiede auf, welche vermutlich auf den Geometrieunterschieden zwischen den verschiedenen Probenvarianten basieren. Es wird jedoch angenommen, dass Eigenspannungen in quasi-statischen Belastungsfällen eine eher untergeordnete Rolle spielen, wodurch auf die Messung der Eigenspannungen in folgenden Versuchen verzichtet wird.

Signifikante Abhängigkeiten der mechanischen Kennwerte zur Neigung konnten durch quasi-statische Zugversuche an Rundzugproben festgestellt werden. Unterschiede in den Tendenzen bezüglich der Neigung als auch in den absoluten Werten zwischen Flachzugproben und Rundzugproben weisen auf überlagerte Oberflächen und Geometrieeffekte hin.

### 5.3.2 Mechanische Kennwerte aus Zugversuchen

Um die Einflüsse der identifizierten Abhängigkeiten des Werkstoffzustands von der Neigung auf die Werkstoffeigenschaften zu untersuchen, wurde im Folgenden eine weitere Versuchsreihe WOrM 4.4 ausgelegt. Hierfür sollen vor allem Flachzugproben untersucht werden, da diese alle Wandungsmerkmale eines Druckgeräts aufweisen und dadurch die Untersuchung der Einflüsse der Wandungsmerkmale auf Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften ermöglichen.

Versuchsplan

In WOrM 4.4 sollen je 3 Flachzugproben mit gleichem Probenquerschnitt in 5 unterschiedlichen Neigungen und 5 unterschiedlichen Wandstärken im as-built-Zustand untersucht werden. Als Referenz für die mechanischen Kenngrößen des Kernwerkstoffs, das heißt, zur Betrachtung der Werkstoffeigenschaften ohne Oberflächeneffekte, wurden in jeder Neigung 5 Rundzugproben als Zylinder mit Durchmesser 8 mm hergestellt und mechanisch auf Kontur DIN 50125 – B 4 x 20 mechanisch bearbeitet. Zudem wurden Flachzugproben aus 15 vertikalen Blöcken mit einer Wandstärke von 8 mm gefertigt, welche anschließend in die 5 verschiedenen Probengeometrien mechanisch nachbearbeitet wurden. Der mechanische Materialabtrag auf die entsprechende Wandstärke der Probengeometrie erfolgte dabei symmetrisch von beiden Seiten des Quaders. Diese im Folgenden als t8-Flachzugproben bezeichneten Proben sollen eine erste Abschätzung des Geometrieinflusses ohne Randeffekte ermöglichen. Für die Untersuchung des Werkstoffzustands wurden jeweils 6 Schliffproben pro Wandstärke und Neigung vorgesehen, wovon jeweils drei in Probenquer- und drei in Probenlängsrichtung der Zugproben untersucht wurden. Eine Übersicht der untersuchten Parameter und die jeweilige Anzahl der Proben kann in Tabelle 5 eingesehen werden. Auf die Ergebnisse der mechanisch bearbeiteten t8-Flachzugproben wird in 5.3.5 Untersuchung des Geometrie-Effekts eingegangen.

Tabelle 5: Versuchsplan für die Versuchsreihe WOrM 4.4 zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von additiv hergestelltem 316L mittels as-built Flachzugproben (Flach) sowie mechanisch nachbearbeiteten Rundzugproben (Rund) und mechanisch nachbearbeiteten Flachzugproben (t8-Flach)

4.4 Flach		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3		3	3	3	3
	2,0 mm	3		3	3	3	3
	2,5 mm	3		3	3	3	3
	3,0 mm	3		3	3	3	3
	4,0 mm						
	5,0 mm	3		3	3	3	3
Summe		15		15	15	15	15
		75					

4.4 Rund		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3		3	3	3	3
	2,0 mm	3		3	3	3	3
	2,5 mm	3		3	3	3	3
	3,0 mm	3		3	3	3	3
	4,0 mm						
	5,0 mm	3		3	3	3	3
Summe		15		15	15	15	15
		75					

4.4 t8-Flach		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3					
	2,0 mm	3					
	2,5 mm	3					
	3,0 mm	3					
	4,0 mm						
	5,0 mm	3					
Summe		15					
		15					

Zur Erhöhung der Prozesssicherheit wurden in dieser Versuchsreihe die Proben gleicher Geometrie an den Einspannflächen durch Verbindungselemente in einer Art Wand zusammengehalten. Diese wurden dann zur Erhöhung der Stabilität analog zum Spiegelversuch mit Probenwänden anderer Geometrie in Normalenrichtung mittels Verbindungselementen an der Seite gestapelt. In Abbildung 36 ist der Fertigungszyklus mit der Anordnung auf der Bauplattform dargestellt.

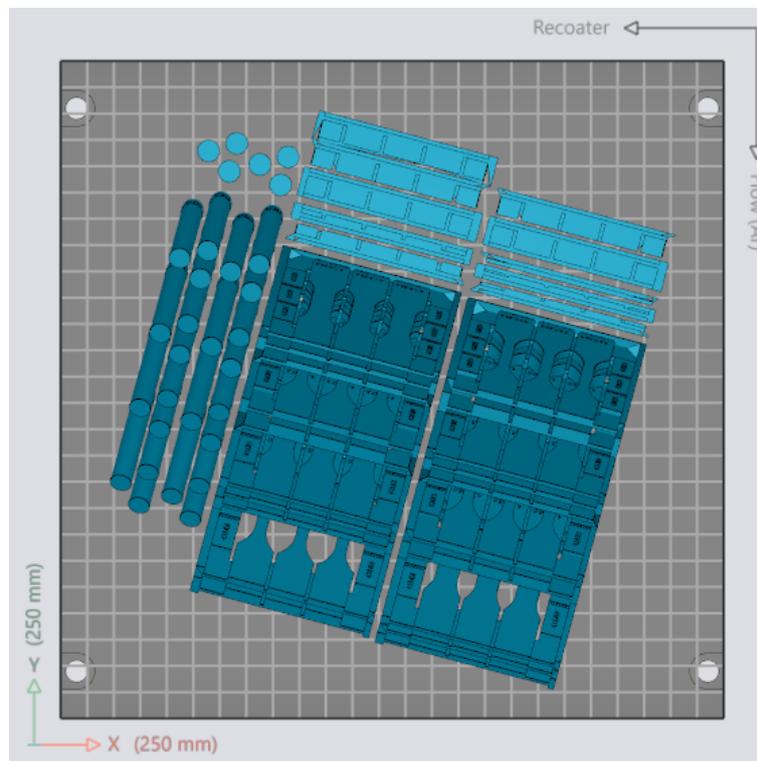


Abbildung 36: Anordnung der Versuchsproben der Versuchsreihe WOrM 4.4 auf der Bauplattform

#### Quasi-statische Zugversuche an Flachzugproben

Die Ergebnisse der statischen Zugversuche an den as-built Flachzugproben des Versuchs WOrM 4.4 sind in Abbildung 37 dargestellt. Alle mechanischen Kennwerte sind hier auf den Soll-Querschnitt der Flachzugproben bezogen.

Im Vergleich zu den mechanischen Kennwerten aus dem Spiegelversuch zeigen die Werte der Versuchsreihe WOrM 4.4 etwas geringere Zugfestigkeiten bei einer Neigung von  $0^\circ$  und geringere Dehngrenzen bei einer Neigung von  $45^\circ$ . Im Vergleich zum Spiegelversuch ist die Bruchdehnung bei einer Neigung von  $45^\circ$  deutlich geringer. Abgesehen davon, sind die mechanischen Kennwerte der Versuchsreihe WOrM 4.4 und des Spiegelversuchs in einem vergleichbaren Bereich.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung zur Neigung. Während die Zugfestigkeit mit zunehmendem Neigungswinkel zunimmt, verringern sich sowohl die Dehngrenzen der Proben als auch die dazugehörigen Bruchdehnungen. In Bezug auf eine Zunahme der Wandstärke lassen

sich leicht steigende Tendenzen der Zugfestigkeit und der Dehngrenze vermuten, jedoch können keine signifikanten Aussagen hinsichtlich der Abhängigkeit zur Wandstärke getroffen werden. Die Bruchdehnung zeigt keine erkennbaren Tendenzen bezüglich der Wandstärke.

Die Abhängigkeiten und Tendenzen stimmen bis auf die Abhängigkeit der Zugfestigkeit zur Neigung mit denen im Spiegelversuch überein. Unterschiedliche Abhängigkeiten der Zugfestigkeit zur Neigung können nicht eindeutig einer Ursache zugeordnet werden, können aber in unterschiedlich ausgeprägten Oberflächeneffekten in Abhängigkeit der Neigung liegen.

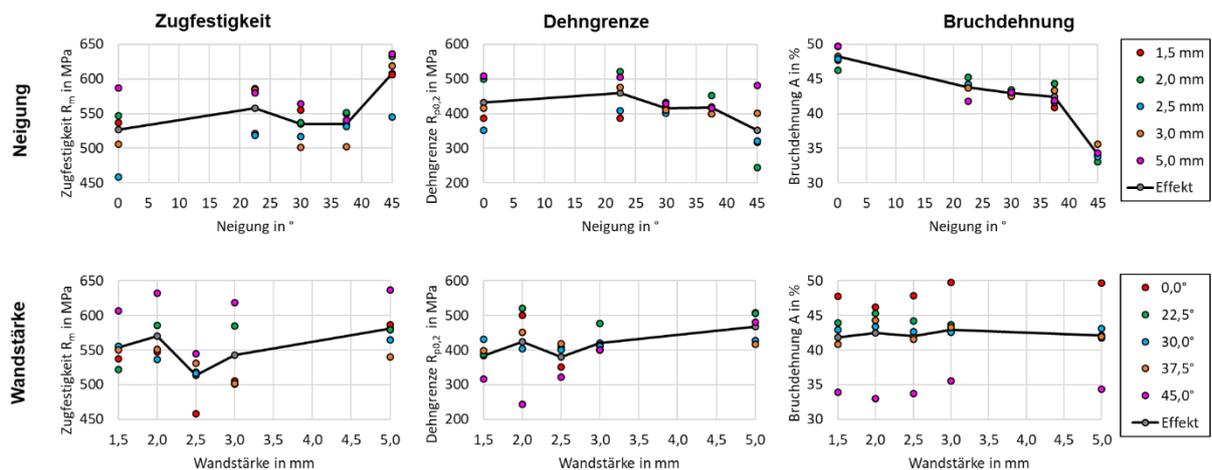


Abbildung 37: Zugversuche an as-built Flachzugproben des Versuchs WOrM 4.4

### Zusammenhang mechanische Kennwerte und Abbildungsgenauigkeit

In Abbildung 38 sind die Abhängigkeiten von Zugfestigkeit, Abbildungsgenauigkeit und Rauheit zur Neigung und zur Wandstärke gegenübergestellt. Die Abbildungsgenauigkeit stellt dabei den Unterschied der Ist-Wandstärke von der Soll-Wandstärke dar. Dabei wurde am Längsschliff der Proben mittels Lichtmikroskopie der durchschnittliche Querschnitt unter Berücksichtigung der lokalen Rauheit und der lokalen Porosität ermittelt. Alle drei Verläufe zeigen in Bezug auf die Neigung einen ähnlichen Verlauf. Während die Rauheit einen stetigen Anstieg mit steigendem Neigungswinkel aufweist, zeigen sich deutliche Ähnlichkeiten der Verläufe in der Zugfestigkeit und der Wandstärke mit leicht fallenden Werten bei 30° und 37,5°. Es liegt daher nahe, dass die Ergebnisse der Zugfestigkeit und generell der mechanischen Kennwerte bezogen auf den Soll-Querschnitt signifikant von der Abbildungsgenauigkeit abhängig ist. Dabei zeigt sich, dass die Abbildungsgenauigkeit vor allem durch die Neigung und nur sehr gering durch die Wandstärke der Proben beeinflusst wird. Es wird daher vermutet, dass der Einfluss der Abbildungsgenauigkeit auf die mechanischen Kennwerte bei dünnen Proben größer ist als bei dicken.

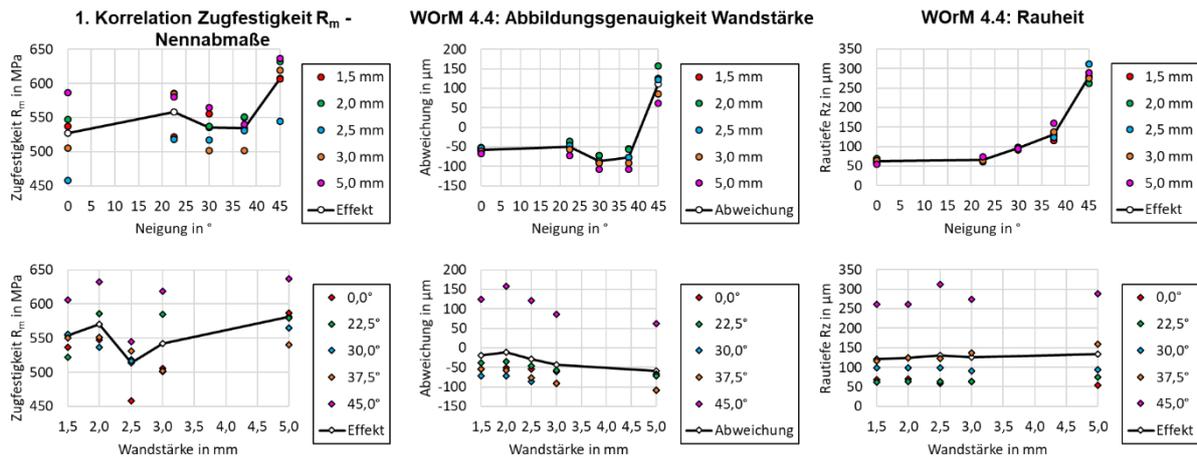
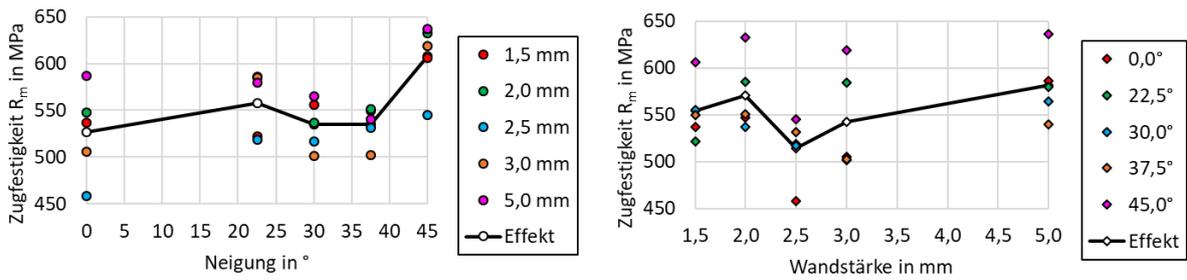


Abbildung 38: Vergleich der Abhängigkeit von Zugfestigkeit, Wandstärke und Rauheit zur Neigung und Wandstärke

Zur isolierten Betrachtung weiterer Effekte durch Wandstärke und Neigung ist es auf Basis der Erkenntnisse aus dem Vergleich der Verläufe als nächstes notwendig, den Einfluss der Abbildungsgenauigkeit auf die mechanischen Kennwerte herauszurechnen. Hierfür werden die mechanischen Kennwerte auf die effektive Ist-Wandstärke bezogen. Die Ergebnisse der Bereinigungen für die Zugfestigkeit und die Dehngrenze sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt. Während für beide mechanischen Kennwerte der Effekt der Wandstärke nach der Bereinigung weiterhin gering ausfällt, zeigt sich eine deutliche Reduktion des Effekts der Neigung auf die Zugfestigkeit. Im Gegensatz dazu erhöht sich der Effekt der Dehngrenze mit zunehmendem Neigungswinkel. Hieraus lässt sich folgern, dass die Effekte, die in Bezug auf die Neigung bei der Dehngrenze zu erkennen sind, nicht durch die Abbildungsgenauigkeit erklärt werden können. Dies gilt auch für die restliche erkennbare Abhängigkeit der Zugfestigkeit zur Neigung nach der Bereinigung. Für die Ursache der verbliebenen erkennbaren Effekte wird ein überlagerter Einfluss der Neigung, der Oberflächeneffekte und der Geometrie vermutet.

Ob die Unterschiede in der Wandstärke durch die steigende Rauheit und Porosität bei steigender Rauheit oder durch den Fertigungsprozess und den Fertigungsparametern begründet sind, kann nicht klar unterschieden werden.

**1. Referenzquerschnitt = Soll-Wandstärke**



**2. Referenzquerschnitt = Mikroskopische Wandstärkenermittlung (Ist-Wandstärke)**

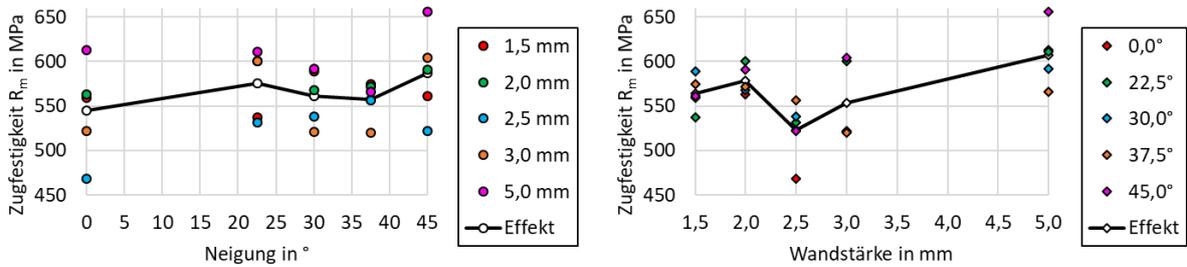
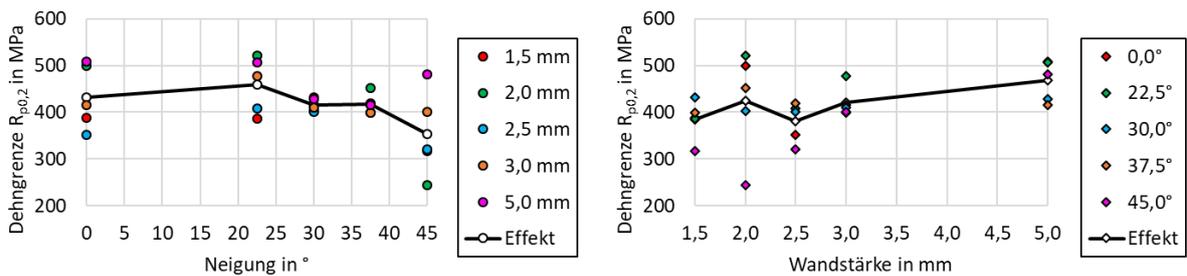


Abbildung 39: Betrachtung der Abhängigkeiten der Zugfestigkeit zur Neigung und Wandstärke unter Berücksichtigung der Abbildungsgenauigkeit

**1. Referenzquerschnitt = Soll-Wandstärke**



**2. Referenzquerschnitt = Mikroskopische Wandstärkenermittlung (Ist-Wandstärke)**

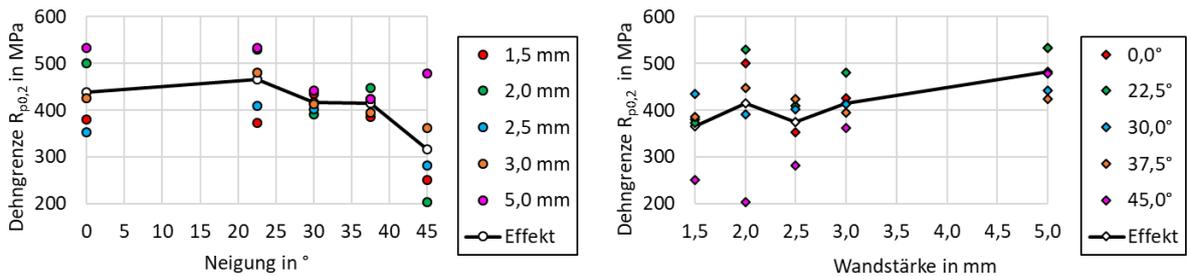


Abbildung 40: Betrachtung der Abhängigkeiten der Dehngrenze zur Neigung und Wandstärke unter Berücksichtigung der Abbildungsgenauigkeit

Quasi-statische Zugversuche an Rundzugproben

Die Ergebnisse der mechanisch bearbeiteten Referenz-Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 4.4 in den gleichen Neigungen wie die Flachzugproben sind in Abbildung 41 zusammengefasst. Insgesamt zeigen die mechanischen Kennwerte einen ähnlichen Verlauf zu denen der quasi-statischen Zugversuche an Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 3.1. Zugfestigkeit und Dehngrenze steigen jeweils mit steigender Neigung, während die Bruchdehnung bei höheren Neigungswinkeln geringer ausfällt. Diese Ergebnisse konnten mit einem weiteren

Fertigungszyklus WOrM 5.1 mit ebenfalls mechanisch bearbeiteten Rundzugproben in verschiedenen Neigungen bestätigt werden. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 42 zusammengefasst.

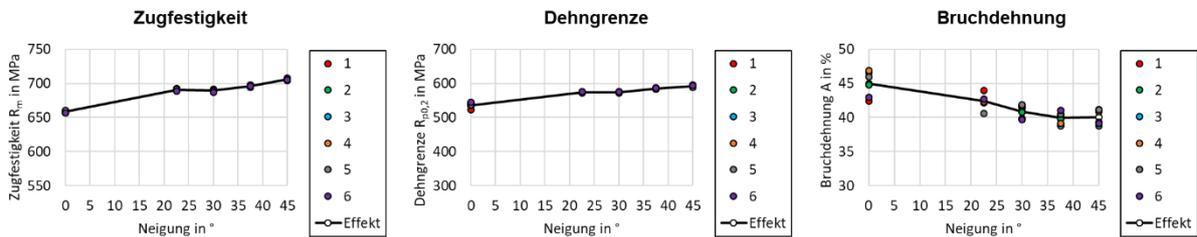


Abbildung 41: Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 4.4 mit den Einzelmessungen 1-6 und des Effekts in Abhängigkeit der Neigung

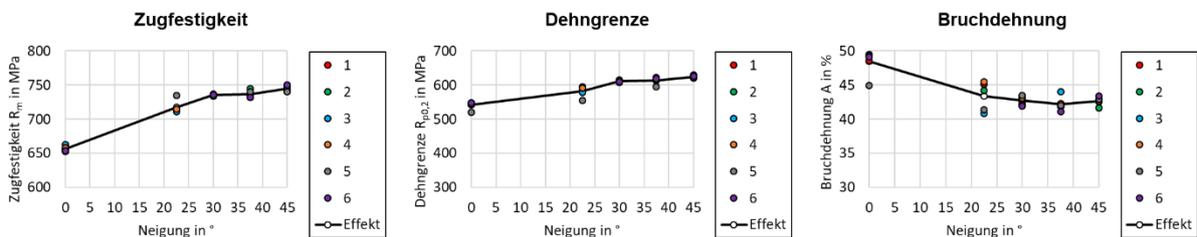


Abbildung 42: Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 5.1 mit den Einzelmessungen 1-6 und des Effekts in Abhängigkeit der Neigung

### 5.3.3 WOrM-Härtemessungen

Um die Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Geometrie und im Speziellen von der Wandstärke ohne eine Überlagerung der Oberflächeneinflüsse zu untersuchen, wurden Härtemessungen nach Vickers an Schlifflinien der Proben aus den WORM-Versuchsreihen durchgeführt.

#### Härtemessung nach Vickers in Probenquerrichtung

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessungen an Proben der Versuchsreihen WOrM 2.3, WOrM 3.1 und WOrM 4.4 in Probenquerrichtung ist in Abbildung 43 zusammengefasst. Jeder Punkt in den Diagrammen stellt dabei den Mittelwert von 3 Einzelmessungen für die jeweilige Neigung und Wandstärke dar. Die Normale der Schliffebene ist die horizontale Richtung und die Richtung der Härteeindrücke sind damit senkrecht zur Baurichtung.

Aufgetragen über die Neigung zeigen die Härtemessungen entsprechend der Orientierung eine hohe Streuung und es ist keine Aussage über einen Einfluss der Neigung möglich. Dies entspricht in Anbetracht der Richtung der Härtemessungen den Erwartungen, da eine geneigte Probe von der Seite immer noch das gleiche Gefüge zeigt wie eine senkrechte Probe und nur die Mikrostruktur verdreht ist. Die hohe Streuung lässt sich auf die breite Korngrößenverteilung der Mikrostruktur und die geringe Anzahl an Einzelmessungen zurückführen. Die Messunsicherheit liegt bei ungefähr 10 HV 1.

Bezüglich der Abhängigkeit zur Wandstärke können aus den Ergebnissen der Härtemessungen der Versuchsreihen WOrM 2.3 und WOrM 3.1 keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Die Ergebnisse der Versuchsreihe WOrM 4.4 lassen eine abnehmende Tendenz der Vickershärte bei größeren Wandstärken vermuten. Eine eindeutige Aussage über die Abhängigkeit zur Neigung kann nicht getroffen werden.

Die Härtemessungen in Probenquerrichtung sind aufgrund der unterschiedlichen untersuchungsrichtung im Vergleich zu den Zugversuchen in Probenlängsrichtung nur schwer mit den ermittelten mechanischen Kennwerten aus den quasi-statischen Zugversuchen zu vergleichen. Um ebenfalls die Effekte der Neigung zu erfassen wurden im Folgenden weitere Härtemessungen nach Vickers in Probenlängsrichtung an Proben der Versuchsreihe WOrM 4.4 durchgeführt.

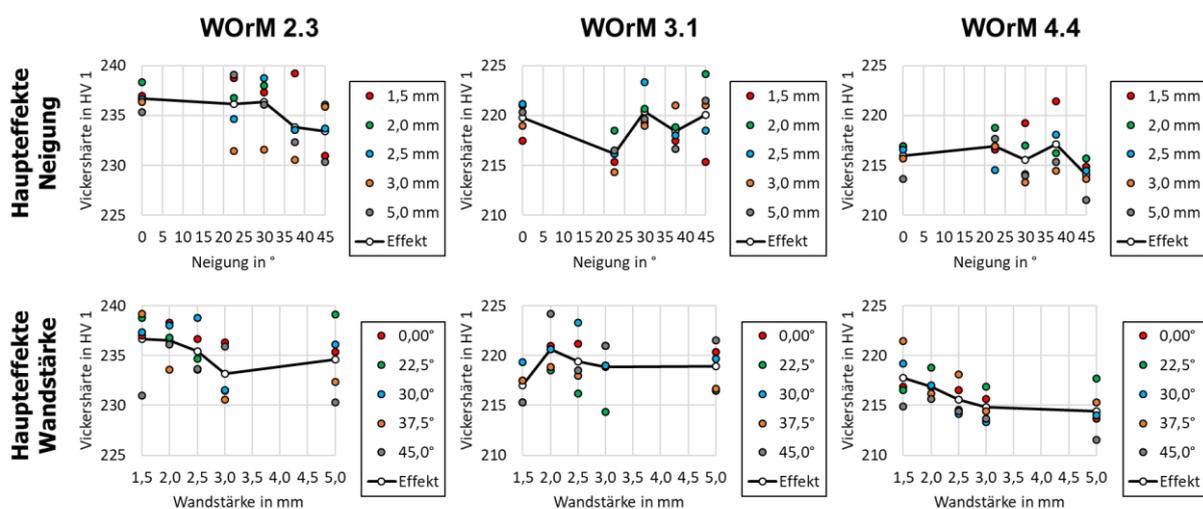


Abbildung 43: Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessungen nach Vickers an Proben der Versuchsreihen WOrM 2.3, WOrM 3.1 und WOrM 4.4 in seitlicher Probenrichtung, orthogonal zur Bau- richtung

#### Härtemessung nach Vickers in Probenlängsrichtung

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessungen nach Vickers an den Proben der Versuchsreihe WOrM 4.4 in Probenlängsrichtung sind in Abbildung 44 einsehbar. Auch für diese Härtemessungen liegt die Messunsicherheit bei ungefähr 10 HV 1.

In Abhängigkeit der Neigung zeigt sich eine tendenziell zunehmende Härte bei zunehmendem Neigungswinkel. Generell lässt sich im Verlauf des Effekts eine Ähnlichkeit zum Verlauf der Zugfestigkeit aus den Zugversuchen an Flachzugproben (Abbildung 39) erkennen.

Bezüglich der Abhängigkeit zur Wandstärke kann auch in Probenlängsrichtung, ähnlich wie in seitlicher Probenrichtung, eine abnehmende Tendenz der Vickershärte bei steigenden Wandstärken vermutet werden. Dieser Effekt ist vor allem bei Proben mit der Neigung 45° prägnant, weshalb eine gegenseitige Abhängigkeit der Effekte Neigung und Wandstärke vermutet werden kann.

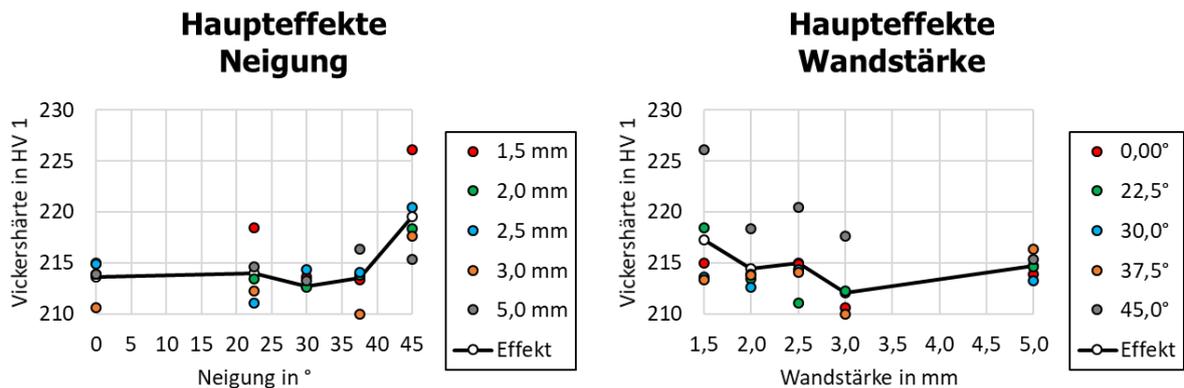


Abbildung 44: Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessungen nach Vickers an Proben der Versuchsreihe WOrM 4.4 in Probenlängsrichtung

### 5.3.4 WOrM-EBSD

Um die Effekte aus den Zugversuchen und aus den Härtemessungen nach Vickers auf mikrostrukturelle Unterschiede zurückführen zu können, wurden im Folgenden EBSD an den Schlif- fen der Versuchsreihe WOrM 4.4 sowohl in Probenlängs- als auch in Probenquerrichtung durchgeführt. Alle EBSD wurden dabei mittels einer EBSD-Kamera Nordlys II Channel 5 von Oxford Instruments HKL im REM EVO 60 von Carl Zeiss AG durchgeführt. Pro Probe wurden dabei 220 x 180 Datenpunkte mit einem Raster von 1  $\mu\text{m}$  aufgenommen.

#### Mikrostruktur PBF-LB/M hergestellter Proben

Die Kornstruktur weist in beide Richtungen eine sehr hohe Streuung der Korngröße auf, welche die Interpretation der EBSD erschwert. Die Mikrostruktur in Probenquerrichtung (Abbildung 45) zeigt eine deutlich in Baurichtung gelängte Kornausbildung, die die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Versuchsreihen WOrM 1.2 und 2.3 bestätigen. Im Gegensatz dazu weist die Probenlängsrichtung (Abbildung 46) ebenfalls analog zu den lichtmikroskopischen Aufnahmen der Versuchsreihen WOrM 1.2 und 2.3 kleinere Körner auf. Sowohl die in Probenlängs- als auch in Probenquerrichtung ist keine spezifische Vorzugsrichtung erkennbar. Abhängigkeiten zur Wandstärke und zur Neigungen sind anhand der Orientierungsmaps nicht erkennbar.

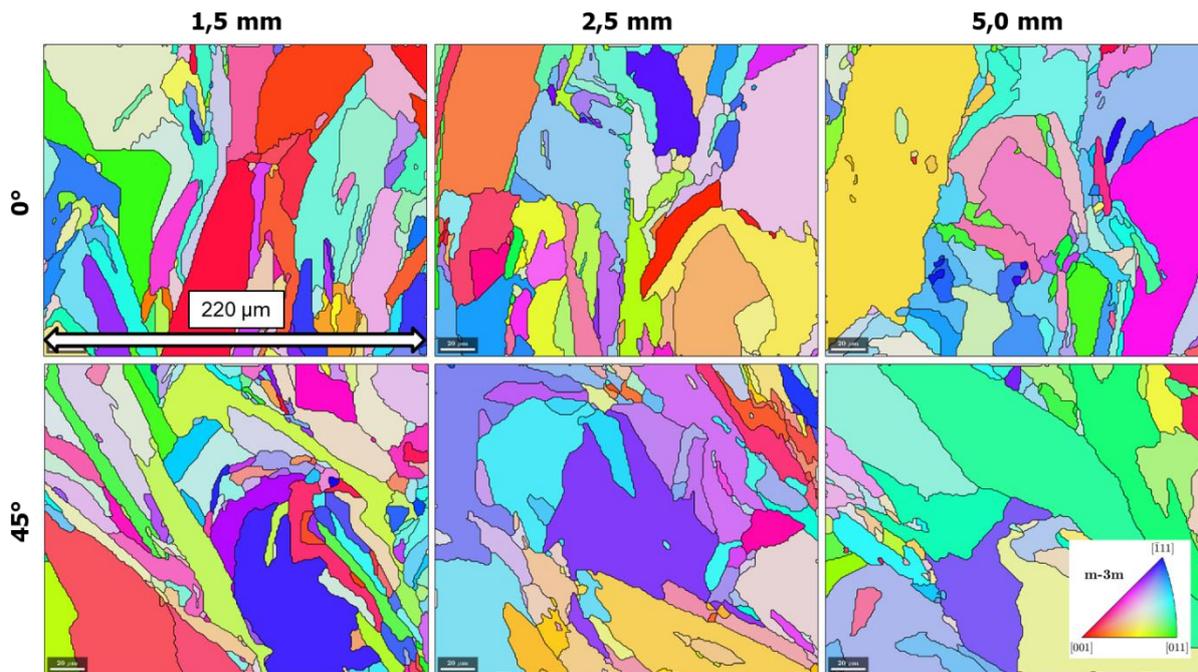


Abbildung 45: Beispielhafte EBSD Orientierungsmaps in Probenquerrichtung der Versuchsreihe WOrM 4.4

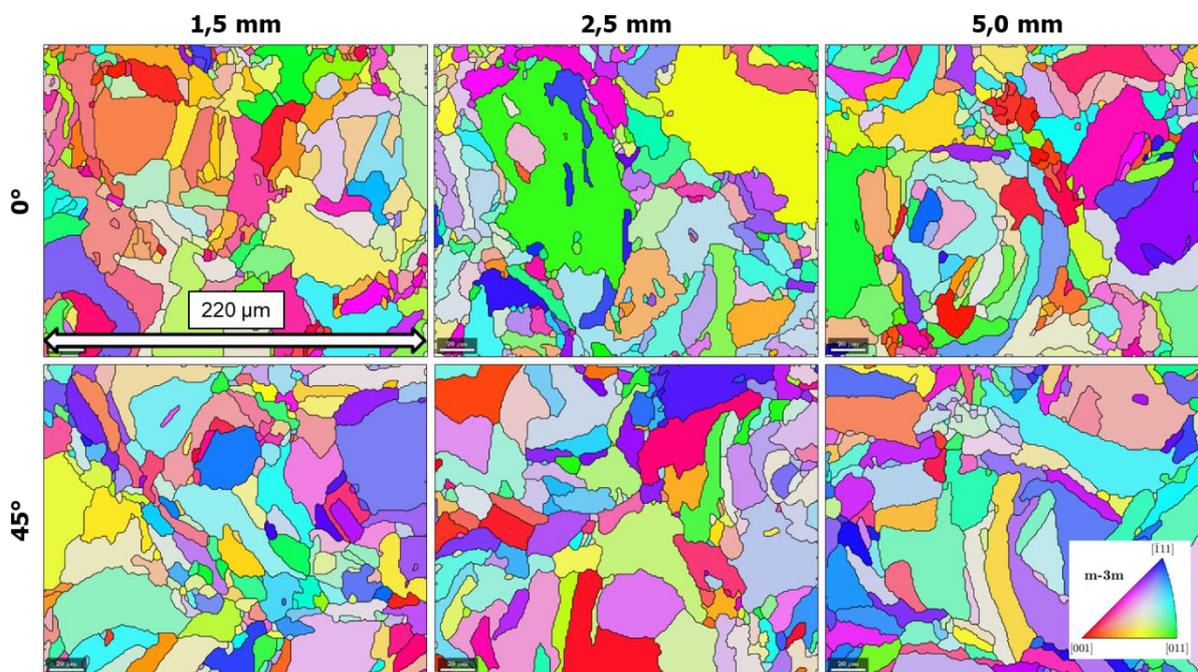


Abbildung 46: Beispielhafte EBSD Orientierungsmaps in Probenlängsrichtung der Versuchsreihe WOrM 4.4

Kennwerte zur Untersuchung der Mikrostruktur

Für eine weitere Untersuchung der Abhängigkeiten der Mikrostruktur zur Neigung und zur Wandstärke wurden die EBSD mittels der Software MATLAB® von The MathWorks Inc. ausgewertet. Als Grenzwinkel für die Korngrenzenbestimmung wurde dabei ein Orientierungsunterschied von 5° festgelegt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Korngröße

und der Kornverstreckung aus den Auswertungen können in Abbildung 47 und Abbildung 48 eingesehen werden. Aufgrund großer Unterschiede der Korngrößen innerhalb einer Probe weisen die Korngrößenbestimmungen hohe Streuungen auf. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Mikrostruktur wird daher der Median der Korngrößen als Kennwert verwendet. Als Korngröße wird dabei hier die Querschnittsfläche eines Korns im Schliff in  $\mu\text{m}^2$  bezeichnet.

Während in Bezug auf die Abhängigkeit zur Neigung in seitlicher Probenrichtung (Probenquerrichtung) keine wesentlichen Unterschiede in den Korngrößen erkennbar sind, zeigen die Ergebnisse in Probenlängsrichtung eine signifikante Vergrößerung der Körner mit zunehmender Neigung. Gleichzeitig lassen sich hinsichtlich der Wandstärke zunehmende Tendenzen mit zunehmender Wandstärke vermuten. Dies würde die Verringerung der Vickershärte mit zunehmender Wandstärke erklären. Eine eindeutige Aussage ist aufgrund der hohen Streuung der EBSD-Ergebnisse jedoch nicht möglich.

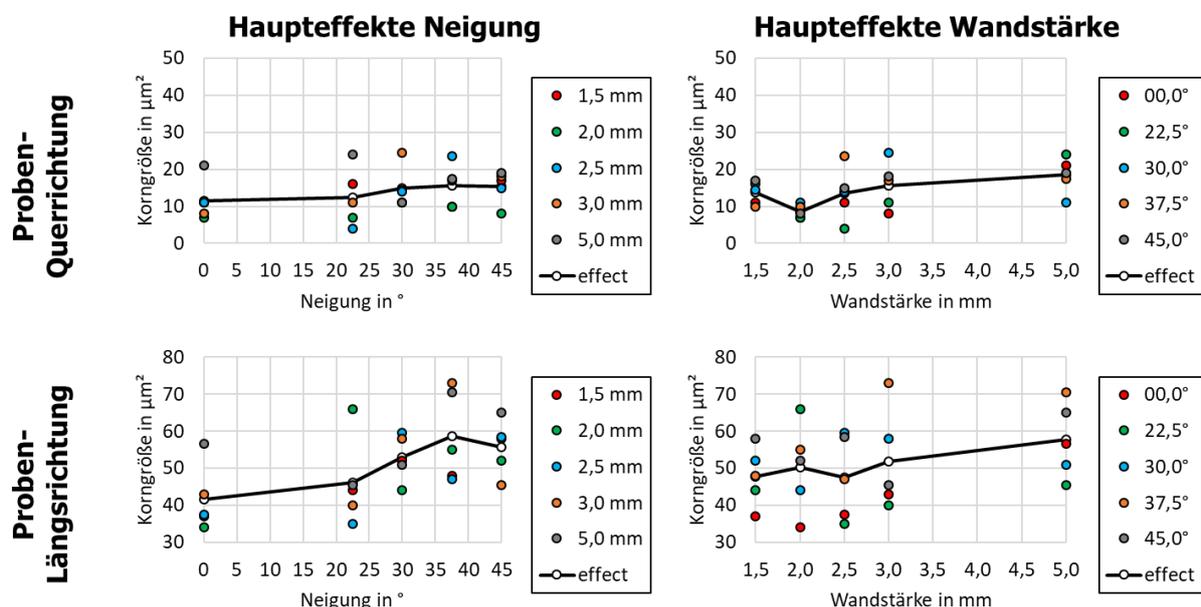


Abbildung 47: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Korngröße aus den EBSD an Proben der Versuchsreihe WORM 4.4 in Probenlängs- und Probenquerrichtung

Für die Bestimmung der Kornverstreckung werden die Korngrenzen der betrachteten Mikrostruktur mit einer Ellipse angenähert. Die Kornverstreckung ergibt sich dann aus dem Verhältnis der größten zur kleinsten Halbachse der Ellipse. Die Ergebnisse der Auswertung der Kornverstreckung sind in Abbildung 48 zusammengefasst. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse anhand der Orientierungsmaps, die im Vergleich zur Probenlängsrichtung deutlich gelängte Körner in der Probenquerrichtung zeigen. Durch die komplexere Säulenstruktur resultiert die Auswertung der Mikrostruktur in Bezug auf die Kornverstreckung in Probenquerrichtung in einer deutlich höheren Streuung der Kennwerte. Für die Probenquerrichtung kann dementsprechend keine belastbare Aussage über die Abhängigkeiten zur Neigung und Wandstärke getroffen werden. In Probenlängsrichtung ist ansatzweise eine geringe Zunahme der Kornverstreckung mit zunehmendem Neigungswinkel ableitbar, jedoch fällt auch hier der Effekt sehr gering aus und kann dementsprechend nicht eindeutig postuliert werden. In Bezug

auf die Abhängigkeit zur Wandstärke kann kein Effekt auf die Kornverstreckung festgestellt werden.

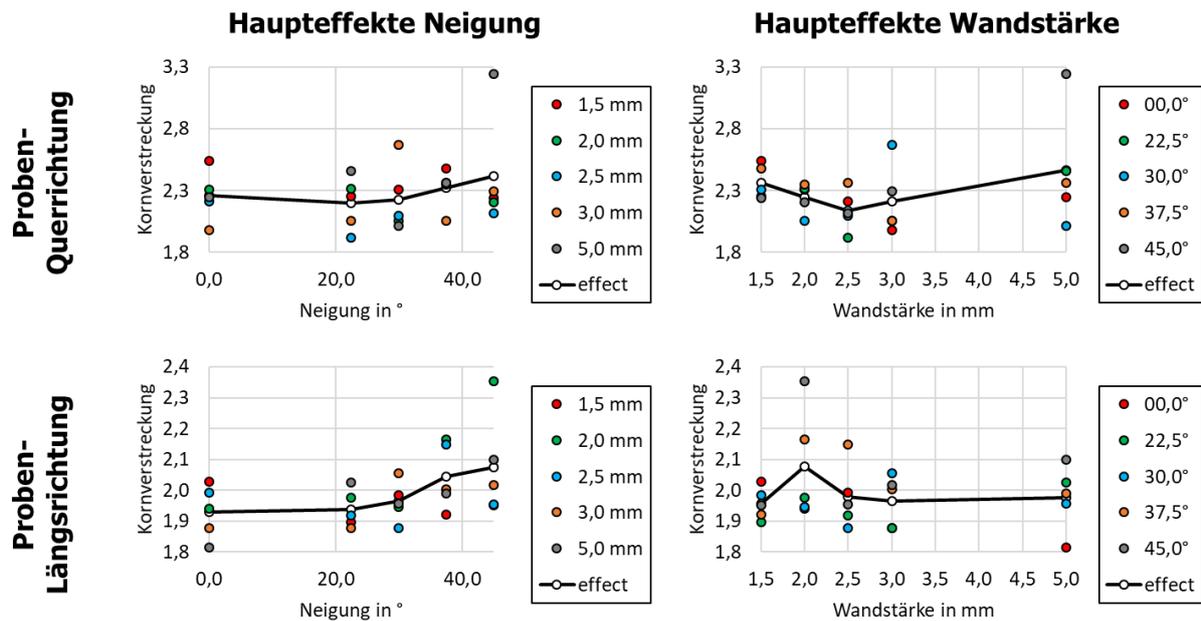


Abbildung 48: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kornverstreckung aus den EBSD an Proben der Versuchsreihe WOrM 4.4 in Probenlängs- und Probenquerrichtung

### 5.3.5 Untersuchung des Geometrie-Effekts

Anhand der Ergebnisse aus den bisherigen WOrM-Versuchen wurden zur isolierten Betrachtung des Einflusses der Probengeometrie im Rahmen der Versuchsreihe WOrM 4.4 noch vertikale Blöcke der Wandstärke 8 mm gefertigt, die anschließend mechanisch zu Flachzugproben gefertigt wurden. Die Flachzugproben haben dabei die gleichen Maße, wie die as-built Flachzugproben der Versuchsreihe WOrM 4.4. Durch die mechanische Nachbearbeitung aus gleichen Blöcken werden sowohl thermische Effekte aufgrund der Probengeometrie als auch Oberflächeneffekte nicht berücksichtigt. Dadurch ist eine isolierte Betrachtung des Einflusses der Geometrie der Querschnittsfläche möglich, die für alle t8-Flachzugproben gleich groß ist und einem äquivalenten Durchmesser von 4 mm entspricht. Die Ergebnisse aus den quasi-statischen Zugversuchen an diesen sogenannten t8-Flachzugproben sind in Abbildung 49 zusammengefasst.

Generell können auf Basis der Ergebnisse keine klaren Abhängigkeiten formuliert werden. Probleme im Versuchsaufbau führten zu nur schwer auswertbaren Ergebnissen. Probleme in der optischen Erkennung der Dehnung resultieren in verfälschten Werten für Dehnung und Dehngrenze. Eigenspannungen in den t8-Flachzugproben könnten zu einer Verformung der Proben bei der mechanischen Bearbeitung und dadurch bei den quasi-statischen Zugversuchen zu einer Biegebeanspruchung geführt haben. Die Eigenspannungen im Werkstoff wurden bei der Bearbeitung weiterer t8-Proben berücksichtigt. Ähnliche Biegebeanspruchungen können aufgrund einer schrägen Einspannung der Proben beim quasi-statischen Zugversuche auftreten.

Aufgrund der beschriebenen Problematik im Versuchsablauf weisen Flachzugproben mit einer Wandstärke von 2,5 mm im Rahmen der Versuche bessere mechanische Eigenschaften auf als andere Probengeometrien. Die Werte der Flachzugproben mit Wandstärke 2,5 mm zeigen jedoch auch die höchste Streuung. Flachzugproben mit 5 mm Wandstärke weisen ebenfalls hohe Zugfestigkeiten und Dehngrenzen bei geringer Streuung auf, zeigen aber die geringste Bruchdehnung in den quasi-statischen Zugversuchen. Im Rahmen des Schlussberichts wird aufgrund der beschriebenen Problematik nicht weiter auf diese Ergebnisse eingegangen.

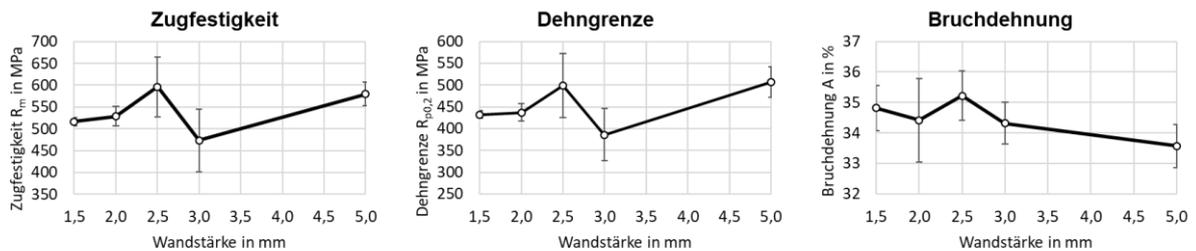


Abbildung 49: Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an vertikalen, mechanisch nachbearbeiteten t8-Flachzugproben der Versuchsreihe WOrM 4.4

Auf Grundlage der ersten Versuche an vertikalen t8-Flachzugproben im Rahmen der Versuchsreihe WOrM 4.4 konnten keine klaren Aussagen zu Abhängigkeiten der mechanischen Kennwerte von der reinen Probengeometrie getroffen werden. Dies liegt auch daran, dass die Streuung in den untersuchten Proben relativ hoch ist.

Für die Auslegung der Versuchsreihe WOrM 6.1 zur Untersuchung der geometrischen Effekte wird daher der betrachtete bereinigte Geometrie-Effekt anhand von t8-Flachzugproben weiterhin mitberücksichtigt.

Der Versuchsplan der Versuchsreihe WOrM 6.1 kann in Tabelle 6 eingesehen werden.

Aufgrund des begrenzten Bauraums auf der Bauplattform wurden jeweils drei Parameterstufen der Parameter Neigung und Wandstärke betrachtet. Sowohl die Flachzugproben als auch die t8-Flachzugproben liegen in dreifacher Redundanz vor. Die t8-Flachzugproben wurden analog zu denen aus der Versuchsreihe WOrM 4.4 mechanisch nachbearbeitet. Während die t8-Flachzugproben den bereinigten Effekt der Geometrie und der Neigung für den additiv hergestellten Werkstoff 316L wiedergeben, werden diese Effekte bei den as-built Flachzugproben überlagert mit den Oberflächeneffekten und der Abbildungsgenauigkeit untersucht. An seitlich angeordneten Schliffproben analog zur Versuchsreihe WOrM 4.4 wurden darüber hinaus Härtemessungen nach Vickers sowie EBSD durchgeführt.

Tabelle 6: Versuchsplan für die Versuchsreihe WOrM 6.1 zur Untersuchung des Einflusses der Geometrie mittels as-built Flachzugproben (Flach) und mechanisch nachbearbeiteten Flachzugproben (t8-Flach)

4.4 Flach		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3			3		3
	2,0 mm	3			3		3
	2,5 mm						
	3,0 mm	3			3		3
	4,0 mm						
	5,0 mm						
Summe		9			9		9
		27					

4.4 t8-Flach		Neigung					
		0,00°	11,25°	22,50°	30,00°	37,50°	45,00°
Wandstärke	1,5 mm	3			3		3
	2,0 mm	3			3		3
	2,5 mm						
	3,0 mm	3			3		3
	4,0 mm						
	5,0 mm						
Summe		9			9		9
		27					

Die Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an t8-Flachzugproben können in Abbildung 50 eingesehen werden. In Bezug auf die Neigung zeigt sich ein klarer Anstieg der Zugfestigkeit und der Dehngrenze sowie eine Abnahme der Bruchdehnung bei höheren Neigungswinkeln analog zu den Rundzugproben der Versuchsreihe WOrM 4.4. In Bezug auf die Wandstärke fallen die Unterschiede der mechanischen Kennwerte sehr gering aus. Eine geringe Abnahme der Zugfestigkeit und Dehngrenze sowie eine Zunahme der Bruchdehnung kann vermutet werden, jedoch ist der Unterschied im Vergleich zu den absoluten Werten nicht signifikant. Die Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte zur Probengeometrie kann daher als vernachlässigbar angesehen werden. Alle weiteren Abhängigkeiten der mechanischen Kennwerte der Flachzugproben zur Wandstärke können demnach auf den thermischen Geometrieeffekt, die Oberflächeneffekte und die Abbildungsgenauigkeit zurückgeführt werden. Unter dem thermischen Geometrieeffekt wird hierbei die Veränderung des Werkstoffzustands aufgrund der unterschiedlichen thermischen Historie verstanden, die bei verschiedenen Probengeometrien im PBF-LB/M-Prozess verschieden ausfallen können.

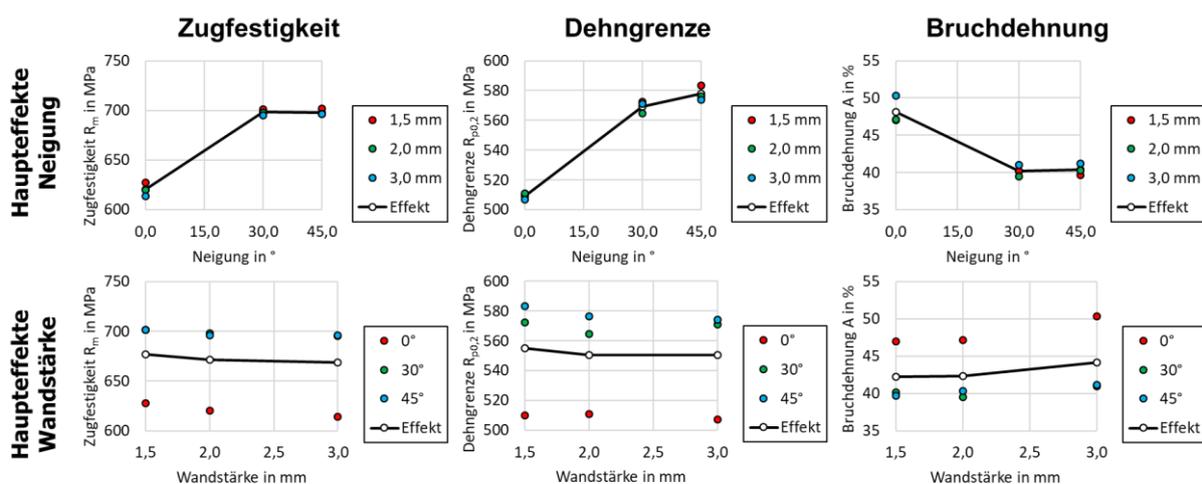


Abbildung 50: Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an mechanisch nachbearbeiteten t8-Flachzugproben der Versuchsreihe WOrM 6.1

Die Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an as-built Flachzugproben können in Abbildung 51 eingesehen werden. Ein Vergleich der mechanischen Kennwerte von t8-Flachzugproben zu as-built Flachzugproben kann in Abbildung 52 eingesehen werden. Die hier dargestellten Werte ergeben sich aus der Differenz der mechanischen Kennwerte der t8-Flachzugproben zu denen der as-built Flachzugproben. Die Verläufe stellen somit den überlagerten Einfluss aus Oberflächeneffekten und thermischem Geometrieeffekt dar.

Generell fallen Zugfestigkeit und Dehngrenze bei den as-built Flachzugproben geringer aus als bei den mechanisch bearbeiteten t8-Flachzugproben, was auf die Rauheit und oberflächennahe Porosität zurückgeführt werden kann. Bei der Berechnung der Zugfestigkeit und der Dehngrenze führt dies zu einer Verringerung der effektiven Querschnittsfläche beziehungsweise zu einer Überschätzung des tatsächlichen Querschnitts. Vor allem bei einem hohen Neigungswinkel von  $45^\circ$  und einer geringen Wandstärke von 1,5 mm zeigen sich Unterschiede von mehr als 100 MPa in Zugfestigkeit und Dehngrenze bezogen auf die Soll-Wandstärke. Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung zeigen jedoch bei den as-built Flachzugproben einen ähnlichen Verlauf in Abhängigkeit der Neigung im Vergleich zu denen der mechanisch bearbeiteten t8-Flachzugproben. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der t8-Flachzugproben weisen die Werte bei den as-built Flachzugproben für die Zugfestigkeit und die Dehngrenze bei höherer Neigung eine höhere Streuung auf. Auch dies ist auf Grundlage der Reduktion des effektiven Querschnitts durch Rauheit und Porosität erklärbar, welche bei geringeren Wandstärken aufgrund des größeren Oberfläche-zu-Querschnitt-Verhältnisses einen größeren Einfluss hat.

Im Vergleich der beiden Probenvarianten zeigt sich, dass Oberflächen- und thermische Geometrieeffekte zu sinkenden Werten für Zugfestigkeit und Dehngrenzen bei steigender Neigung führen. Die Effekte wirken somit gegenläufig zu den Effekten der reinen Neigung und gleichen diese teilweise aus, wodurch eine vermeintlich geringere Anisotropie bei as-built Flachzugproben vermittelt wird.

Der Verlauf der Bruchdehnung weist bei einer Neigung von  $30^\circ$  Differenzen zwischen mechanisch bearbeiteten t8- und as-built Flachzugproben auf. Die Bruchdehnung fällt hier für as-built Flachzugproben höher aus als für t8-Flachzugproben. Es wird vermutet, dass der Unterschied in der Bruchdehnung auf den kombinierten Einfluss von Oberflächeneffekten und thermischem Geometrieeffekt zurückzuführen ist.

In Bezug auf die Wandstärke zeigen sich deutlich andere, steigende Tendenzen für Zugfestigkeit und Dehngrenze im Gegensatz zu denen der t8-Flachzugproben. Die Bruchdehnung weist bei as-built Flachzugproben keine Abhängigkeit zur Wandstärke auf. Insgesamt weisen Zugfestigkeit und Dehngrenze bei as-built Flachzugproben geringere Werte bei geringeren Wandstärken auf.

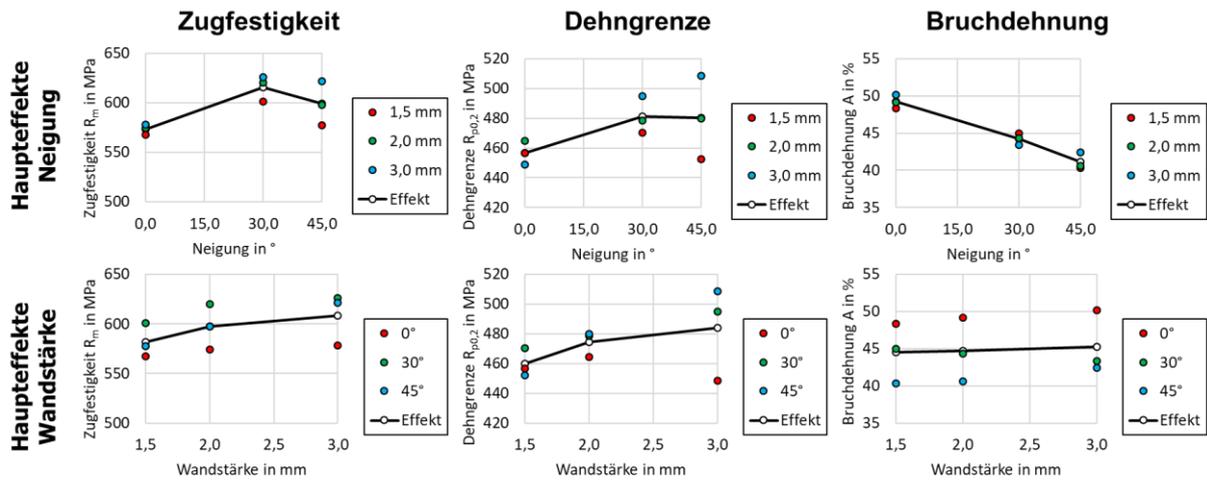


Abbildung 51: Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche an as-built Flachzugproben der Versuchsreihe WOrM 6.1

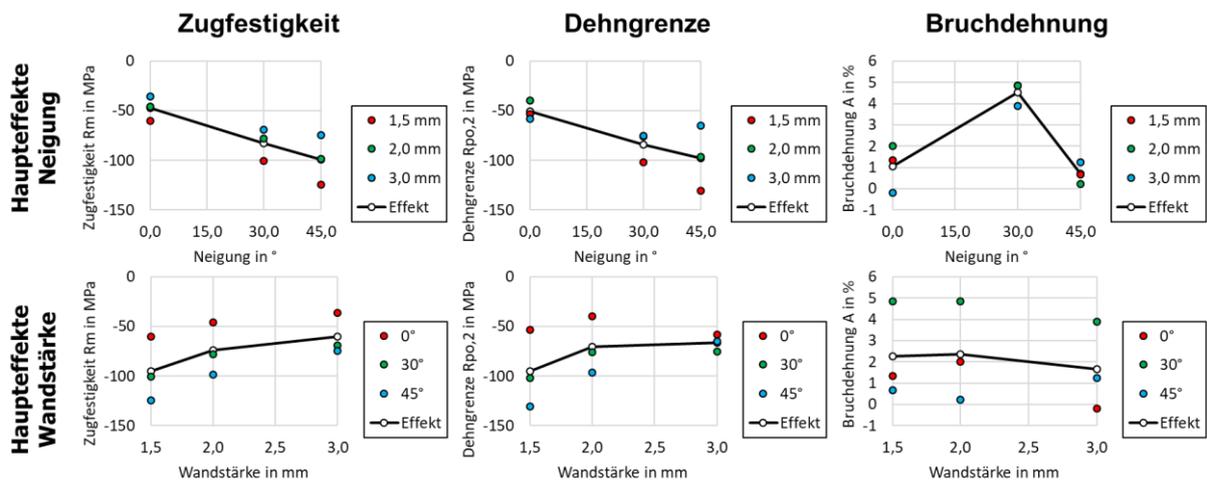


Abbildung 52: Vergleich der in quasi-statischen Zugversuchen ermittelten mechanischen Kennwerte von mechanisch nachbearbeiteten t8-Flachzugproben zu as-built Flachzugproben der Versuchsreihe WOrM 6.1. Kombiniertes Einflüsse von Oberflächeneffekte und thermischem Geometrieeffekt.

Um den Einfluss der Neigung weiter zu untersuchen sowie den isolierten thermischen Geometrieeffekt zu betrachten, werden im Folgenden Härtemessungen nach Vickers an as-built Schlifflproben durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessung nach Vickers können in Abbildung 53 eingesehen werden. Jeder Punkt in der Abbildung repräsentiert dabei den Mittelwert aus 18 Einzelmessungen an insgesamt drei Proben gleicher Wandstärke und Neigung. Generell liegen die gemessenen Werte für verschiedene Parameterstufen sehr nah beieinander und sichtbare Trends liegen innerhalb der Standardabweichung. Jedoch zeigt sich sowohl in Probenquer- als auch in Probenlängsrichtung mit zunehmender Neigung eine steigende Tendenz der Vickershärte und mit zunehmender Wandstärke eine abnehmende Tendenz der Vickershärte.

Generell folgt daraus, dass der thermische Geometrieeffekt zumindest bei kleinen Wandstärken entgegen des Oberflächeneffekts wirkt, der Oberflächeneffekt jedoch im überlagerten Einfluss auf die Zugfestigkeit und Dehngrenze der as-built Flachzugproben dominiert.

Ein Einfluss der Zugeigenspannungen auf die mechanischen Eigenschaften, welche bei der mechanischen Bearbeitung der t8-Flachzugproben entfernt werden, kann nicht ausgeschlossen werden. Unterschiede in mechanischen Eigenschaften zwischen as-built Flachzugproben und mechanisch bearbeiteten t8-Flachzugproben können aus den hohen Zugeigenspannungen unterhalb der Oberfläche der as-built Flachzugproben resultieren.

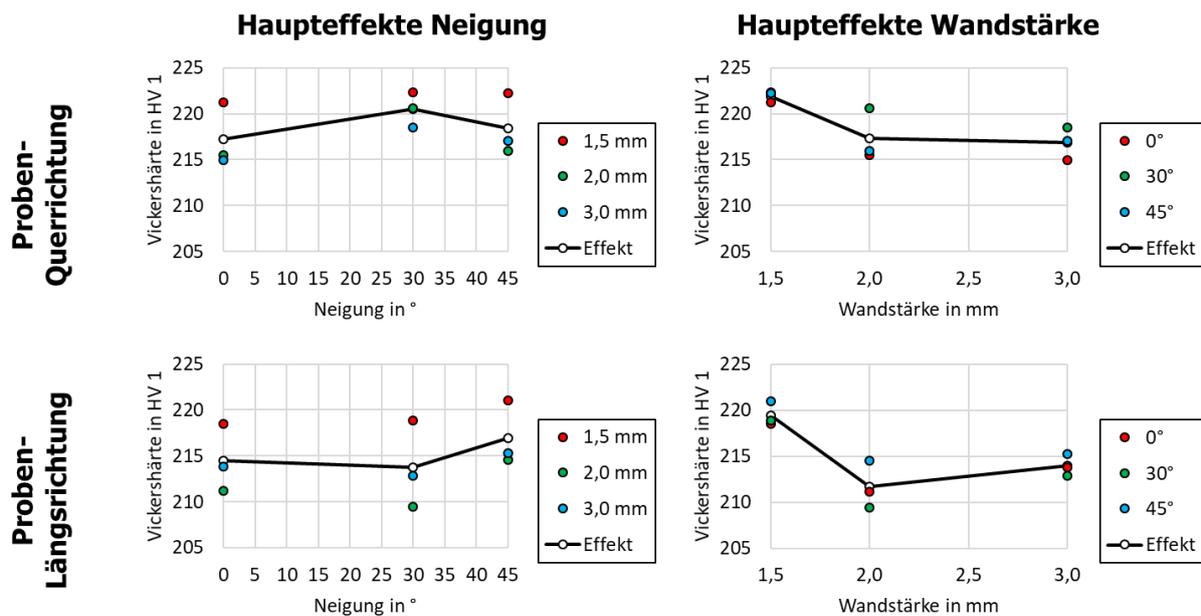


Abbildung 53: Zusammenfassung der Ergebnisse der Härtemessungen nach Vickers an Proben der Versuchsreihe WOrM 6.1 in Probenquer- und Probenlängsrichtung

Um die Ergebnisse der quasi-statischen Zugversuche sowie der Härtemessung nach Vickers in Bezug auf die Neigung und den thermischen Geometrieeffekt auf Unterschiede im Werkstoffzustand zurückführen zu können, wurden im Folgenden EBSD analog zu denen in Versuchsreihe WOrM 4.4 durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Messungen in Form der Korngröße und der Kornverstreckung sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 zusammengefasst. Im Gegensatz zur Versuchsreihe WOrM 4.4 wurden zur Verbesserung der Statistik pro Probe 500 x 400 Datenpunkte mit einem Raster von 1  $\mu\text{m}$  aufgenommen.

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen exemplarisch die Orientierungsmaps in Probenquer- und Probenlängsrichtung der Versuchsreihe WOrM 6.1 für die Neigungen 0° und 45°. Generell weist die Kornstruktur analog zur Versuchsreihe WOrM 4.4 wieder eine hohe Streuung in der Korngröße auf. In Probenquerrichtung ist eine deutliche Kornverstreckung in Aufbaurichtung zu erkennen. In Probenlängsrichtung zeigt sich eine rundlichere Kornausbildung im Vergleich zur Probenquerrichtung für die Proben mit 0° Neigung. Weiterhin sind die Belichtungsbahnen deutlich in den Orientierungsmaps zu erkennen.

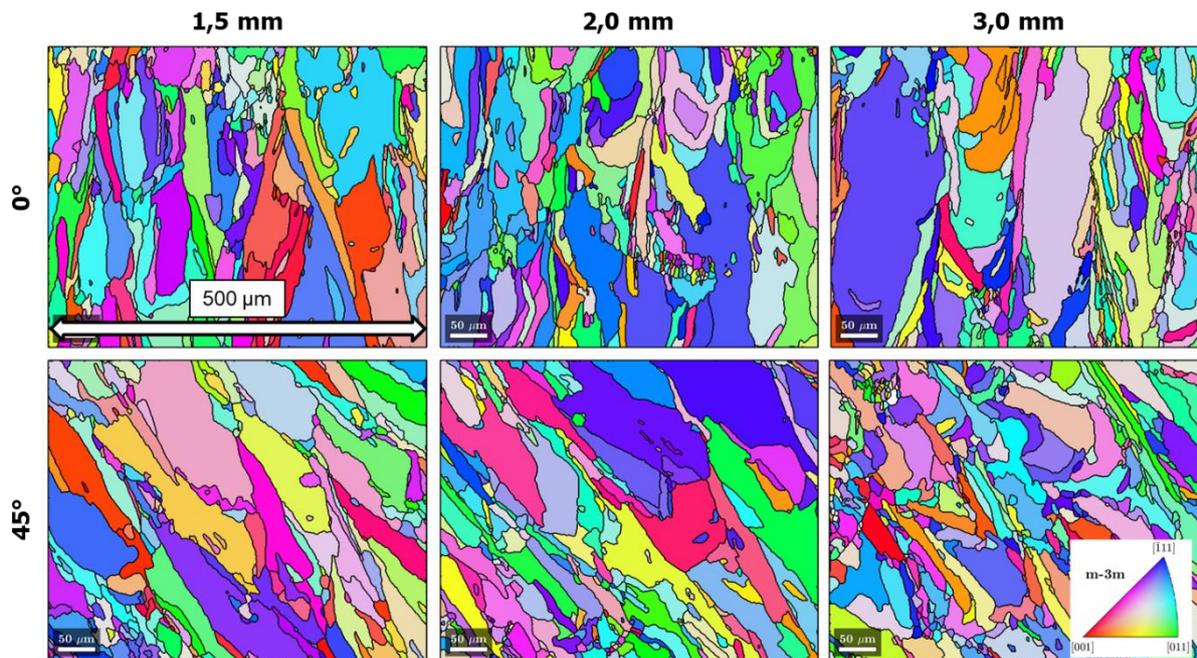


Abbildung 54: Beispielhafte EBSD Orientierungsmaps in Probenquerrichtung der Versuchsreihe WOrM 6.1

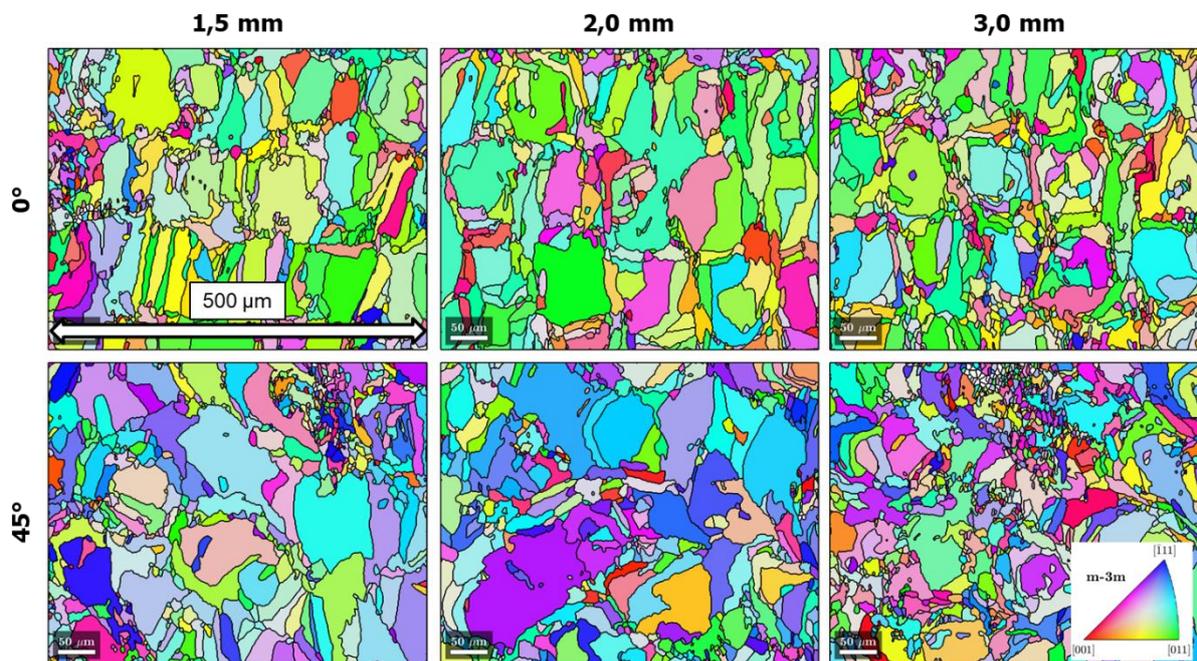


Abbildung 55: Beispielhafte EBSD Orientierungsmaps in Probenlängsrichtung der Versuchsreihe WOrM 6.1

Die Auswertung der Korngröße und Kornverstreckung ist in Abbildung 56 und Abbildung 57 zusammengefasst. Da eine hohe Anzahl an vor allem größeren Körnern im Messbereich vorliegen wurde für die Versuchsreihe WOrM 6.1 der Mittelwert als Kenngröße für Korngröße und

Kornverstreckung genommen. Die Korngrößen fallen dadurch deutlich größer aus als in Ergebnissen der EBSD der Versuchsreihe WOrM 4.4, da die Mediane der Korngröße tendenziell in kleinere Wertebereiche fallen.

In Probenquerrichtung zeigt sich für höhere Winkel über  $0^\circ$  eine zunehmende Streuung der Korngröße. Für die Abhängigkeit zur Neigung als auch zur Wandstärke können aufgrund der hohen Streuung keine Aussagen getroffen werden.

In Probenlängsrichtung sind ebenfalls hohe Streuungen vorhanden. Jedoch kann eine Tendenz zu größeren Korngrößen bei zunehmender Wandstärke vermutet werden. Dies unterstützt die Ergebnisse aus der Härtemessung nach Vickers, welche geringfügig höhere Werte bei niedrigeren Wandstärken aufweisen und ist analog zu den EBSD der Versuchsreihe WOrM 4.4.

In Bezug auf die Neigung kann in Probenlängsrichtung keine Abhängigkeit der Korngröße festgestellt werden. Eine tendenziell steigende Korngröße bei steigender Neigung wie sie bei der Versuchsreihe WOrM 4.4 vermutet werden konnte, ist nicht zu erkennen. Unterschiede können in der Größe des analysierten Bereichs und der Charakteristik von Median, welcher zur Auswertung der WOrM 4.4 Proben und Median, welcher zur Auswertung der WOrM 6.1 Proben herangezogen wurde, liegen. Aufgrund des kleineren analysierten Bereichs ist das Verhältnis von kleinen zu großen Körnern deutlich in Richtung der kleinen Körner verzerrt, da nur komplett im Analysebereich liegende Körner ausgewertet werden. Der Median führt hier zu belastbareren Werten im Bereich kleinerer Korngrößen und vernachlässigt die wenigen großen Körner. Währenddessen sind im größeren Analysebereich bei WOrM 6.1 deutlich mehr größere Körner beinhaltet, sodass über die im Vergleich gleichmäßigere Verteilung der Mittelwert eine bessere Aussage über die tatsächlich vorliegende Korngrößenverteilung liefert. Generell kann im Rahmen des Projekts keine optimale Kenngröße zur Auswertung der komplexen PBF-LB/M Kornstruktur empfohlen werden.

Wie in der Orientierungsmap zu erkennen, fallen die berechneten Werte für die Kornverstreckung in Probenquerrichtung deutlich höher aus als in Probenlängsrichtung. In Probenquerrichtung ist wieder eine sehr hohe Streuung zu erkennen. Es können daher keine Aussagen zur Abhängigkeit der Kornverstreckung von Neigung und Wandstärke getroffen werden. Die Kornverstreckung ist deutlich höher im Vergleich zu der von Proben der Versuchsreihe WOrM 4.4. Auch hier können Unterschiede aus der geringen Anzahl an vollständig erfassten größeren Körnern in der Versuchsreihe WOrM 4.4 resultieren, da längere Körner eher unvollständig erfasst werden als kleine und runde Körner, wodurch diese nicht in der Wertung aufgenommen werden.

Die Werte für die Kornverstreckung der Probenlängsrichtung zeigen im Vergleich zur Probenquerrichtung geringere Streuungen auf. Eine leicht abnehmende Tendenz für die Kornverstreckung bei steigendem Neigungswinkel ist erkennbar, was gegensätzlich zu der in der Versuchsreihe WOrM 4.4 erkannten steigenden Tendenz bei steigenden Neigungswinkeln ist. Jedoch liegen alle Effekte deutlich innerhalb der Streuung, weshalb eine eindeutige Aussage über eine Abhängigkeit nicht möglich ist.

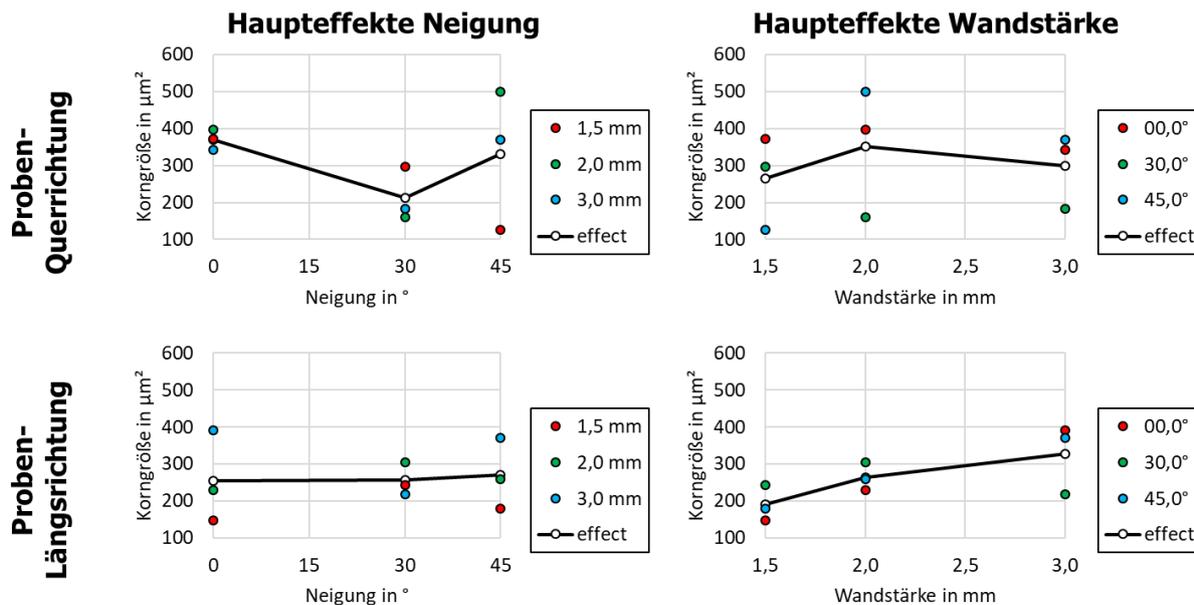


Abbildung 56: Zusammenfassung der Mittelwerte aus den Ergebnissen zur Korngröße aus den EBSD an Proben der Versuchsreihe WOrM 6.1 in Probenlängs- und Probenquerrichtung

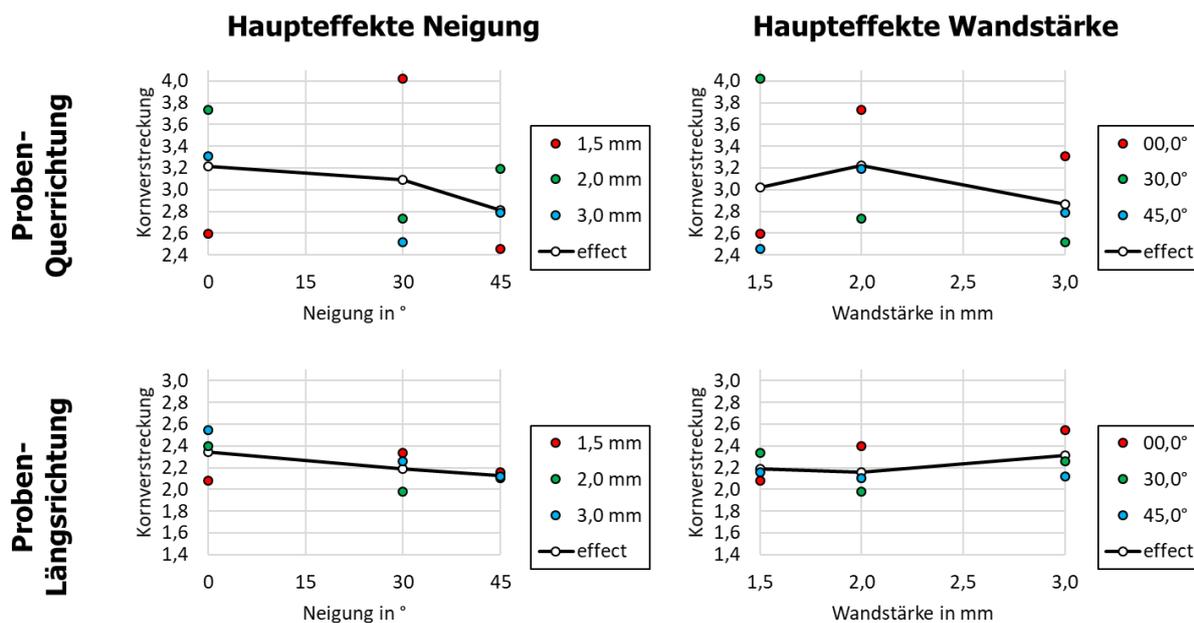


Abbildung 57: Zusammenfassung der Mittelwerte aus den Ergebnissen zur Kornverstreckung aus den EBSD an Proben der Versuchsreihe WOrM 6.1 in Probenlängs- und Probenquerrichtung

## 5.4 Arbeitspaket 5: Entwicklung einer kennwertbasierten Auslegung relevanter Gestaltungskenngrößen

### 5.4.1 Vorgehensweisen zur Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften

Allgemein bekannt und in den vorangestellten AP gezeigt ist, dass der im Laserstrahlschmelzen hergestellte Werkstoffzustand raumrichtungsabhängig (Anisotropie) und infolge des thermischen Haushaltes im Prozess (Temperatur-Zeit-Verlauf) geometrieabhängig ist. Das heißt, die Materialeigenschaften sind inhomogen. Zusätzlich ist der selektive Schweißprozess statistischen Einflüssen ausgesetzt, weshalb Unregelmäßigkeiten im Bauteil auftreten können. Dem gegenüber stehen Auslegungsvorgehensweisen für metallische Werkstoffe, die typischerweise isotrope und homogene Werkstoffeigenschaften voraussetzen. Den statistischen Einflüssen wird bereits in der Technischen Spezifikation DIN/TS 17026 durch Auslegungsklassen und darin festgelegten Prüfnotwendigkeiten Rechnung getragen (siehe Abschnitt 5.5.2). Die inhomogenen Eigenschaften werden derzeit nur durch die Anwendung der schwächsten Materialkennwerte abgefangen. Eine spezifische Betrachtung z.B. der Raumrichtung ist nicht bekannt. Das bedeutet, es werden Stand heute die schwächsten Werte aus der Werkstoffqualifizierung ermittelt und für die Auslegung genutzt.

Um die inhomogenen Eigenschaften gezielter zu berücksichtigen wurden mithilfe von Expertengesprächen und Recherchen drei Vorgehensweisen identifiziert:

- Anpassung bekannter Auslegungsvorgehen
- Nachträgliche Korrektur bekannter Auslegungsvorgehensweisen
- Vollständige Berechnungsgrundlage für inhomogene Werkstoffe

#### 1) Anpassung bekannter Auslegungsvorgehen

Für verschiedene Anwendungsgebiete und Bauteilgruppen existieren Normen und Regelwerke die industriell erprobte, formelbasierte Berechnungsvorschriften verfügbar machen. DIN EN 13445 Blatt 3 liefert Berechnungsvorschriften für klassische Druckbehältergeometrien mit isotropen Materialkennwerten. In der Regel ist die Auslegungszielgröße für Behälter die Wandstärke. Der Berechnung zugrunde liegen technologische Materialkennwerte wie die Streckgrenze oder die Zugfestigkeit. In den vorangegangenen Kapiteln werden technologiespezifische Inhomogenitäten bei den Werkstoffeigenschaften beim Laserstrahlschmelzen beschrieben. Gleichzeitig werden Vorgehen und Prüfmöglichkeiten vorgeschlagen, welche zur Ermittlung dieser Unterschiede bzw. Kennwerte durch die Maschinen- und Werkstoffqualifizierung ermittelt werden können. Daraus resultiert eine Datenbank aus der die Abhängigkeit einzelner Kennwerte von Parametern wie der Wandstärke oder dem Überhangwinkel abgeleitet werden können. Dieses Wissen erlaubt im hier vorgeschlagenen Berechnungsprozess das Ersetzen eines globalen (isotropen) Materialkennwertes durch einen variablen bzw. lokal gül-

tigen Kennwert. Die inhomogenen Werkstoffeigenschaften lassen sich somit z.B. für das Design-by-Formula nach DIN EN 13445-3 berücksichtigen. Abbildung 58 zeigt das Vorgehen schematisch.

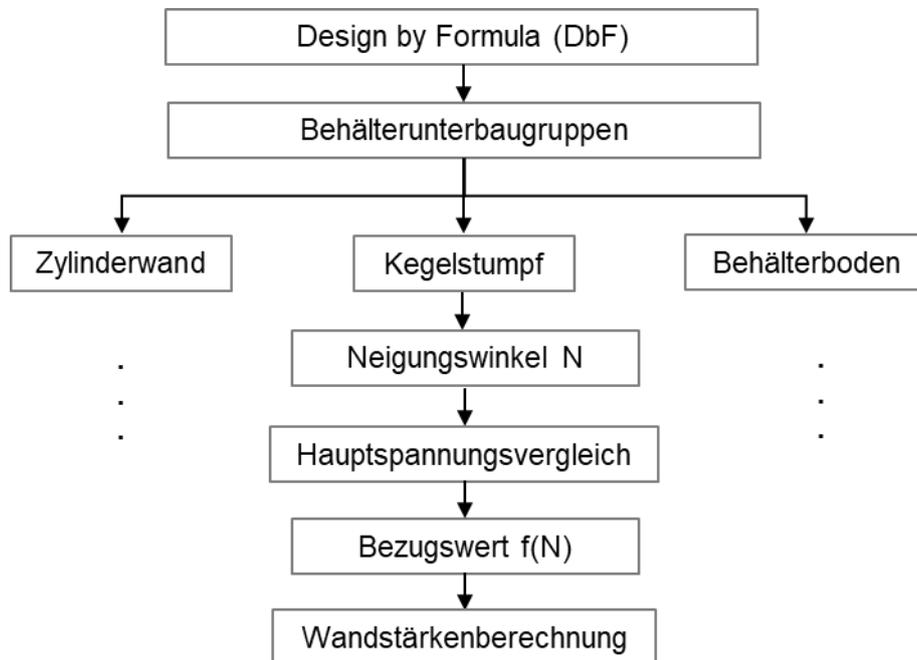


Abbildung 58: Eigene Darstellung für die Anpassung bekannter Berechnungsvorgehen zur Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften

Umsetzen lässt sich die Methode insbesondere für regelmäßige, wie z.B. rotationssymmetrische, Geometrien indem die Wandstärkenberechnung parametrisierbar durch Formeln beschrieben ist. Gültigkeitsbereiche für technologische Kennwerte werden anhand von Aufbauwinkel und Geometrietypen (Features) definiert. Diese Teilbereiche bzw. Formen werden separat individuell berechnet und verbunden bzw. zusammengesetzt, wie es nach DIN EN 13445-3 [2] oder AD 2000 [50] Stand der Technik ist. Eine wichtige Randbedingung dafür ist jedoch die Notwendigkeit die Aufbaurichtung früh (vor der Wandstärkenberechnung) zu definieren. Mittels einer vollständigen Datenbasis und der Übertragung aller Berechnungsvorschriften in eine CAD Umgebung kann theoretisch auch eine Automatisierung umgesetzt werden, die eine Neuberechnung bei Änderung der Aufbaurichtung durchführt.

Ist die Ausprägung der größten Hauptspannungskomponente an der Vergleichsspannung (z.B. von-Mises) im auszulegenden Behälterbereich dominant, so wird vorgeschlagen die Festigkeitskennwerte die der Ausrichtung dieser größten Hauptspannungskomponente zugeordnet sind, für die Ermittlung des Bezugswertes und damit der Wandstärke zu verwenden. Dies gilt nur, wenn das Verhältnis dieser Festigkeitswerte zu den schwächsten (Ausrichtung) im Anwendungsfall (Neigung, Wandstärkeklasse, Oberflächenbeschaffenheit, usw.) kleiner ist, als das Verhältnis der ersten zur zweiten Hauptspannungskomponente. Insbesondere bei stehenden, zylindrischen Behältern, bei denen die Tangentialspannung etwa doppelt so groß ist wie die Axialspannung, lassen sich für den Stahl 1.4404 ohne Verlust der Tragfähigkeit die Festigkeitskennwerte der horizontalen (tangentialen) Ausrichtung verwenden. Dazu wird von den Projektbearbeitenden vorgeschlagen, einen Bemessungswert  $G_o$  größer eins einzuführen, um

das Verhältnis von den Hauptspannungskomponenten sowie der unterschiedlichen Materialkennwerte zu bewerten. Das Konzept ist in Abbildung 59 dargestellt.

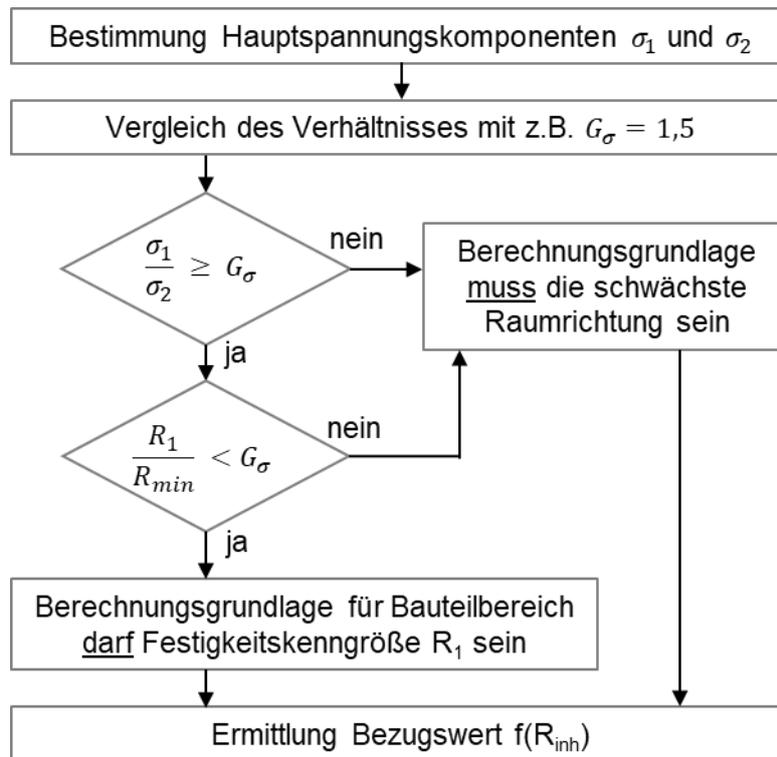


Abbildung 59: Vorschlag Hauptspannungsvergleich für die Ermittlung der Grundlage des Bezugswertes  $f$  zur Berechnung der Wandstärke abhängig von der Ausprägung der Hauptspannungskomponenten  $\sigma$  und der richtungsabhängigen Festigkeitskennwerte  $R$

## 2) Nachträgliche Korrektur bekannter Auslegungsvorgehensweisen

Die zweite hier beschriebene Vorgehensweise basiert auf der Beibehaltung aktueller Konstruktions- und Berechnungsmethoden mit isotropen Materialkennwerten. Bestehende oder neue Bauteilgeometrien werden nach ihrer Auslegung gezielt verändert, um den Besonderheiten des additiven Fertigungsverfahrens bzw. der verwendeten Maschine Rechnung zu tragen. Wie in Abbildung 60 gezeigt, wird unterschieden, ob die verwendeten Berechnungsgrundlagen den Minimal- oder den Maximalkennwerten des im PBF-LB/M hergestellten Werkstoffs entsprechen. Das bedeutet bei Verwendung zum Beispiel der Kennwerte der schwächsten Raumrichtung, schwächsten Wandstärke oder schwächsten Neigung resultiert für davon abweichende Bauteilbereiche eine Überdimensionierung. Hier werden nun Abschlüsse zur Korrektur vorgenommen. Wie in 1) beschrieben sind immer auch die Hauptspannungskomponenten zu berücksichtigen, um die Richtung der größten Belastung im Bauteilbereich zu bestimmen. Abbildung 60 stellt jeweils oberen und unteren Grenzen bei der Auslegung dar. Es kann auch sinnvoll sein mit Kennwerten zwischen Minima und Maxima zu Rechnen und eine Kompensation in beide Richtungen vorzunehmen, wenn dadurch z.B. Aufwände bei der Konstruktion reduziert werden können. Dem folgend würde geometriemerkmalspezifisch Material hinzugefügt und entfernt werden. In den vorangestellten Kapiteln sind solche Features beschrieben worden. Diese werden insbesondere bestimmt durch Wandstärken und Neigungen, aus denen

wiederum gültig für ein System Werkstoffzustände und technologische Eigenschaften resultieren (Porositätsverteilungen, Rauigkeiten, Korngrößen, usw.). Eine automatisierte Umsetzung der Wandstärkenanpassung in Abhängigkeit des Überhangwinkels konnte in einem anderen Projekt bereits mit der Software ELISE Generative Engineering Plattform (Elise GmbH, Bremen, Germany) am Fraunhofer IGCV gezeigt werden. Eine Verallgemeinerung dieses Vorgehens für eine Industrielle Umsetzung bedarf der Entwicklung einer ausgereiften Featureerkennung speziell für das eingesetzte Fertigungssystem und die zu fertigenden Komponenten. Abbildung 61 stellt das Vorgehen bezogen auf einzelne Feature nochmal dar. Nach der Anpassung des jeweiligen bzw. aller Features ist eine Kontrolle der Plausibilität und der Spannungsverteilung im Bauteil durchzuführen. Insbesondere sind Kerbeffekte durch Wandstärkensprünge an den Grenzen geänderte Features auszuschließen.

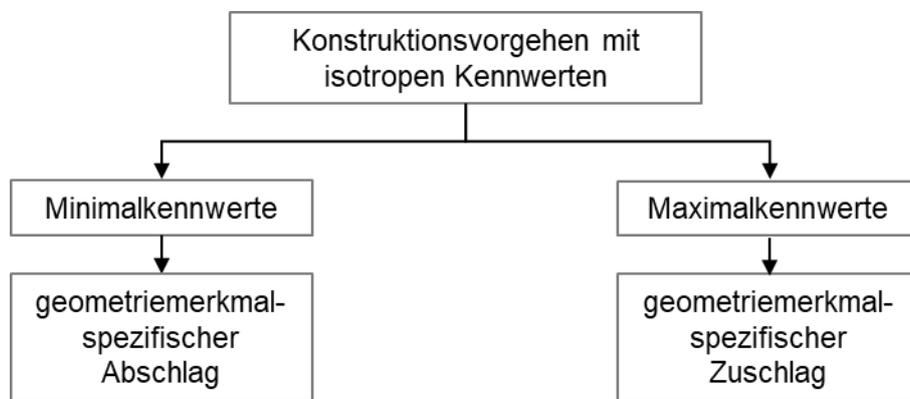


Abbildung 60: Schema zum Vorgehen zur nachträglichen Korrektur von vorhandenen Komponenten oder Auslegungsvorgehensweisen mit minimalen oder maximalen Kennwerten

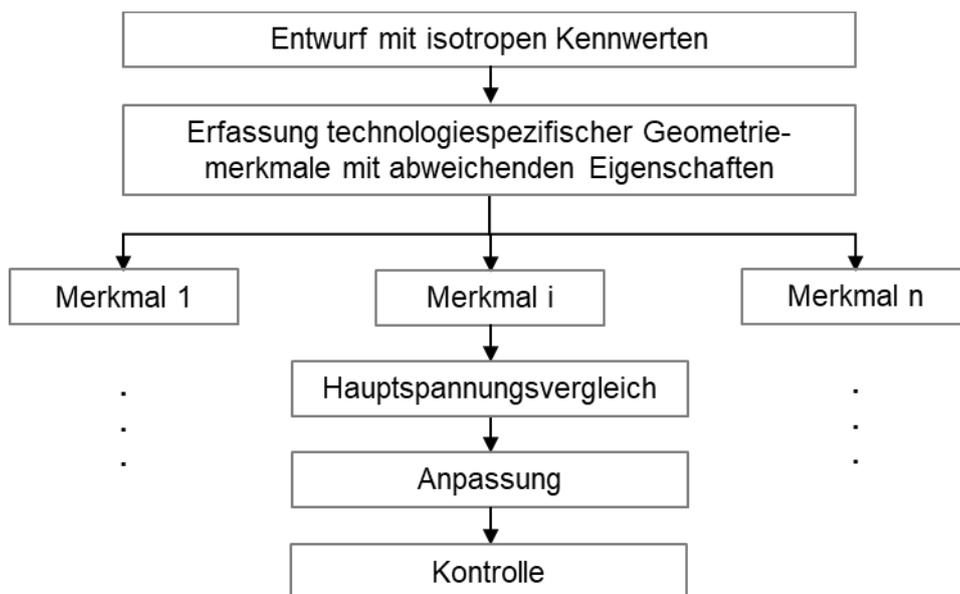


Abbildung 61: Schema zur Umsetzung geometriemerkmalspezifischer Anpassungen

### 3) Vollständige Berechnungsgrundlage für inhomogene Werkstoffe

Basierend auf einer für das Bauteil als vollständig erachteten Materialdatenbank ist es grundsätzlich vorstellbar mit modernen Optimierungswerkzeugen entsprechende Druckgerätegeometrien zu errechnen. Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens konnte jedoch kein Hersteller eines geeigneten Softwarewerkzeuges identifiziert werden. Während der Ausarbeitung dieses Berichts wird von der Firma The Plastic Economy Ltd. (London, England) das Tool „Additive Flow“ mit der notwendigen Fähigkeit, inhomogene Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen, beworben. Eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit war im Projektrahmen nicht möglich. Insbesondere müssen für eine solche Festigkeitsbetrachtung mindestens die in diesem Projekt erarbeiteten spezifischen Kennwerte vorhanden sein und in einer Materialkarte hinterlegt werden können. Für die Berechnung mit linear-elastischem Materialgesetz wäre mindestens der Übertrag des E-Moduls und der Querkontraktionszahl abhängig von der Wandstärke, der Neigung (zur Aufbaurichtung) sowie der Ausrichtung (zur Aufbaurichtung) notwendig. Zur Errechnung einer Struktur z.B. durch Topologieoptimierung müssten weiterhin die Bezugswerte (Streckgrenze, Dehnung), die zur Lösungssuche verwendet werden, lokal abhängig eingeführt werden können. Logischerweise muss außerdem Druck als Lastfall zur Verfügung stehen.

Die geometrischen und richtungsbezogenen Abhängigkeiten sind im Rahmen dieses Projektes aufgezeigt. Die experimentelle Erfassung wird anhand von Versuchsplänen dargestellt und Lösungsprinzipien zur Berücksichtigung bei der Auslegung vorgestellt. Kommerziell verfügbare Softwarewerkzeuge für eine einfache industrielle Anwendung dieser Vorgehensweisen existieren nur teilweise bzw. müssen angepasst und weiterentwickelt werden.

Die in der Druckgeräterichtlinie aufgeführten Auslegungsverfahren Design-by-Formula (DbF), Design-by-Analysis (DbA) und Design-by-Experiment (DbE) können mit den hier genannten Ansätzen kombiniert werden. Eine Auslegung nach DbE, also einem iterativen Vorgehen mit zerstörenden Berstdruckprüfungen, kommt insbesondere für Bauteiländerungen oder Metiers bei denen bereits Erfahrung für ähnliche Bauteile besteht zum Einsatz. Ein Design ist schnell erarbeitet und kann geprüft werden. Hierbei können Designanpassung reagierend auf die zerstörende Prüfung oder im Vorfeld mit Methode 2) durchgeführt werden. Im Rahmen dieses Projektes wird diese Vorgehensweise nicht weiterverfolgt, da die experimentelle Prüfung nicht direkt auf die erarbeitete Datenbasis bezogen werden kann und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse hin zu anderen Systemen und Komponenten nicht gegeben ist. Für DbA sind die derzeit verfügbaren Softwarewerkzeuge zur Berechnung nicht hinreichend entwickelt, um die inhomogenen Werkstoffeigenschaften von AM auf Bauteilebene darzustellen. Möglich wäre die Kombination von DbA (wie auch DbE) mit der in 5.4.1 dargestellten Vorgehensweise 2) „Nachträgliche Korrektur bekannter Auslegungsvorgehensweisen“. DbF ist zumeist nur für typische bzw. klassische Behältergeometrien umsetzbar, da eine mathematische Berechnungsvorschrift zugrunde gelegt wird. Komplexe Topologien für die keine Berechnungsvorschrift existiert, können nicht ausgelegt werden. In AP 6 wird daher am Beispiel eines Demonstrators mit einer konventionell gestalteter Außenhülle erläutert, wie sich die der formelbasierte Ansatz für inhomogene Werkstoffeigenschaften anpassen und nutzen lässt.

### 5.4.2 Integration von Funktionen

in den folgenden Abbildungen Abbildung 62 bis Abbildung 65 werden Rechercheergebnisse zur Funktionsintegration in additiv herzustellende Druckgeräte aufgelistet. Diese sind unterteilt in Sensoren und Funktionsstrukturen zum Wärmetausch, zur Festigkeit und zum Schutz gegen katastrophales Versagen. Sensoren eignen sich für kontinuierliche oder sich regelmäßig wiederholende Betriebsprüfungen an mit Druck beaufschlagten Komponenten. Funktionsstrukturen werden vor dem Kontext verfahrenstechnischer Druckgeräte weiter unterteilt. Strukturen zum Wärmetausch sind insbesondere Gitter und Kanäle die sich durch eine geschlossene und regelmäßige Struktur dimensionieren und vervielfältigen lassen (Abbildung 63).

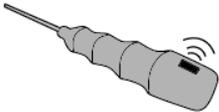
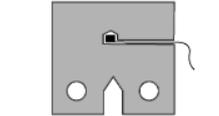
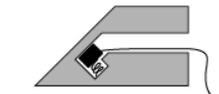
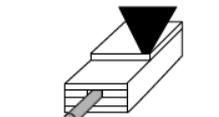
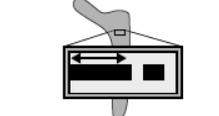
	Prinzip/Zweck	Quelle
	<b>RFID:</b> Ortung und Verifizierung, zum Beispiel im Griffstück eines medizinischen Instruments	verändert nach Lehmhus et al. (2016, S. 294)
	<b>Wirbelstrom:</b> Messung von Rissausbreitung am Beispiel einer CT-Probe	verändert nach Stoll (2020, S. 124)
	<b>Temperatursensor:</b> Lokale Temperaturüberwachung durch Einbringen im Fertigungsprozess	verändert nach Stoll et al. (2017, S. 278)
	<b>FBG:</b> Temperatur- und Dehnungsmessung mit eingebrachten Lichtwellenleitern	verändert nach Havermann et al. (2015, S. 2475)
	<b>Piezo:</b> Verformungssensor und Aktuator eingebracht in Hüftimplantat	verändert nach Töppel et al. (2018, S. 324)
	<b>DMS:</b> Spritzgusswerkzeug-Überwachung. Eingeschweißt im Fertigungsprozess mit LBM	verändert nach Dani (2019, S. 5)

Abbildung 62: Rechercheergebnis zu integrierbarer Sensorik

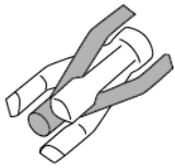
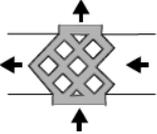
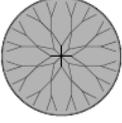
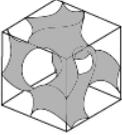
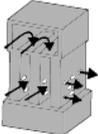
	Prinzip/Zweck	Quelle
	Zwei Gitter: Große Wärmetauschoberfläche bei durchdringenden Gittern	verändert nach Gerstler & Erno (2017, S. 626)
	Enteisung: Gitter-Sandwich an Flügelkante mit hoher Steifigkeit und Durchströmungsmöglichkeit	verändert nach Bici et al. (2018, S. 216)
	Hohles Gitter: Kreuzstrom-Wärmetauscher durch Umströmen und Durchströmen des Gitters mit unterschiedlichen Fluiden	verändert nach Maloney et al. (2012, S. 2489)
	Blattstruktur: Gleichmäßige Kühlung durch Anordnung der Kanäle in Vapor Chamber analog zum biologischen Vorbild	verändert nach Peng et al. (2015, S. 658)
	Kühlkanal: Kühlung eines Elektromotor-Stators durch Integration von Kanälen	verändert nach Sixel et al. (2020, S. 4719)
	TPMS: Zwei-Kammer-Wärmetauscher durch die Trennung zweier Kavitäten mit großer Oberfläche	verändert nach Peng et al. (2019, S. 2328)
	Kühlrippen: Verbesserte Konvektion. Hier zusätzlich durch induzierte Querströmung	verändert nach Fasano et al. (2016, S. 38)

Abbildung 63: Funktionsstrukturen zum Wärmetausch [51–63]

Dem gegenüber müssen Strukturen zur Steigerung der Festigkeit bzw. zur Anwendung von Leichtbauprinzipien nicht volumetrisch geschlossen (Abbildung 64). Sie können sich dennoch auch zum Wärmetausch eignen und ähneln den vorherigen Strukturen grundsätzlich. Allen ist gemein, dass sie sich entweder in jeder Orientierung oder durch geometrische Anpassungen additiv herstellen lassen und somit keinen fertigungsbedingten Stützstrukturen bedürfen.

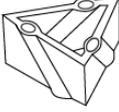
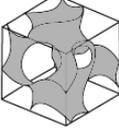
	Prinzip/Zweck	Quelle
	Honeytubes: Verbesserte Energieaufnahme durch Verformung bei mechanischer Last	verändert nach Xu et al. (2018, S. 448)
	TPMS: Versteifung in Sandwichstrukturen bei geringer Masse	Maconachie et al. (2019, S. 13), Abb. verändert nach Peng et al. (2019, S. 2328)
	Einfache Gitter: Versteifung in Sandwichstruktur bei geringer Masse	verändert nach Cao et al. (2018, S. 54)
	Rippen: Leichtbau-Versteifung durch Laserauftragschweißen	verändert nach Josten & Höfemann (2020, S. 1458)

Abbildung 64: Rechercheergebnisse für Funktionsstrukturen zur Versteifung [64–67]

Zur Steigerung der Sicherheit werden Funktionsstrukturen als Anbauteile in Druckgerätekomponten bereits eingesetzt. Einige lassen sich auch direkt durch Additive Fertigungsverfahren herstellen bzw. integrieren (Abbildung 65). In der Betrachtung der gefundenen Strukturen zur Steigerung der Behältersicherheit wird eine Sollbruchstelle mit Rissstopp als besonders geeignet bewertet und zur Untersuchung eines Richtlinienvorschlages ausgewählt. Eine solche Stelle bietet grundsätzlich den Vorteil Bauteilprüfungen gezielter durchführen zu können, indem der Rissfortschritt beobachtet wird. Außerdem kann eine Sollbruchstelle gezielt konstruktiv abgesichert werden ohne den gesamten Behälter mit den gleichen Sicherheiten beaufschlagen zu müssen. Im Projekt bietet dies die Möglichkeit der Untersuchung des mehrachsigen Spannungszustandes additiv gefertigter Komponenten. Die anisotrope Dehnung sowie der Einfluss von etwaigen Fehlstellen lassen sich zum Beispiel im Berstdruckversuch betrachten.

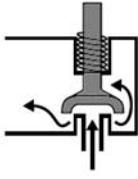
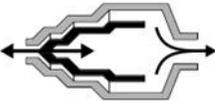
	Prinzip/Zweck	Quelle
	Berstscheibe: Schutz vor Überdruck durch kontrolliertes Versagen bei definiertem Druck	verändert nach Zhu et al. (2020, S. 3)
	Zugdreieckspitzen: Rissstopp durch günstigere Spannungsverteilung mit biologisch inspirierten Zugdreiecken	verändert nach Achenbach et al. (2011, S. 28)
	Ausgleichsventil: Schutz vor Überdruck durch reversibles, mechanisches Öffnen	verändert nach Song et al. (2014, S. 408)
	Rückschlagventil: Schutz vor Druckverlust. Additive Fertigung für Luftfahrt aus Nickel-Basislegierung	verändert nach Veto et al. (2018, S. 201)

Abbildung 65: Rechercheergebnisse für Funktionsstrukturen zum Schutz vor katastrophalem Versagen infolge von Überdruck [68–71]

#### 5.4.3 Richtlinienvorschlag

Zur Veranschaulichung wird eine Sollbruchstelle durch eine Formkerbe mit Rissstopp ausgewählt. Die Auswahl erfüllt folgende Bedingungen und erfolgte nach VDI 2225 [72]:

- Zuverlässige Herstellung mittels PBF-LB/M
- Relevanz bzw. Eignung für Druckgeräte
- Nutzungsgrad durch Additive Fertigung
- Relevanz für die Sicherheit und Einschätzung der zukünftigen Bedeutung
- Umsetzbarkeit im Projekt und Skalierbarkeit

Ähnlich zu Berstscheiben können applizierte Kerben Sollbruchstellen darstellen, die bei definiertem Druck ein kontrolliertes Versagen hervorrufen. Diese Funktionalität wird als Leck-vor-Bruch-Kriterium bezeichnet und ist für die Sicherheit von Druckgeräten vorteilhaft, um ein katastrophales Versagen zu verhindern [73]. Die Rissausbreitung kann durch zusätzliches Material, kreisförmige Kerbenden oder eine Rissumlenkung kontrolliert beendet werden [69]. Der erarbeitete Richtlinienvorschlag besteht aus drei Teilschritten die im Folgenden erläutert werden (Abbildung 66):

- Auslegung
- Konstruktion
- Nachweis

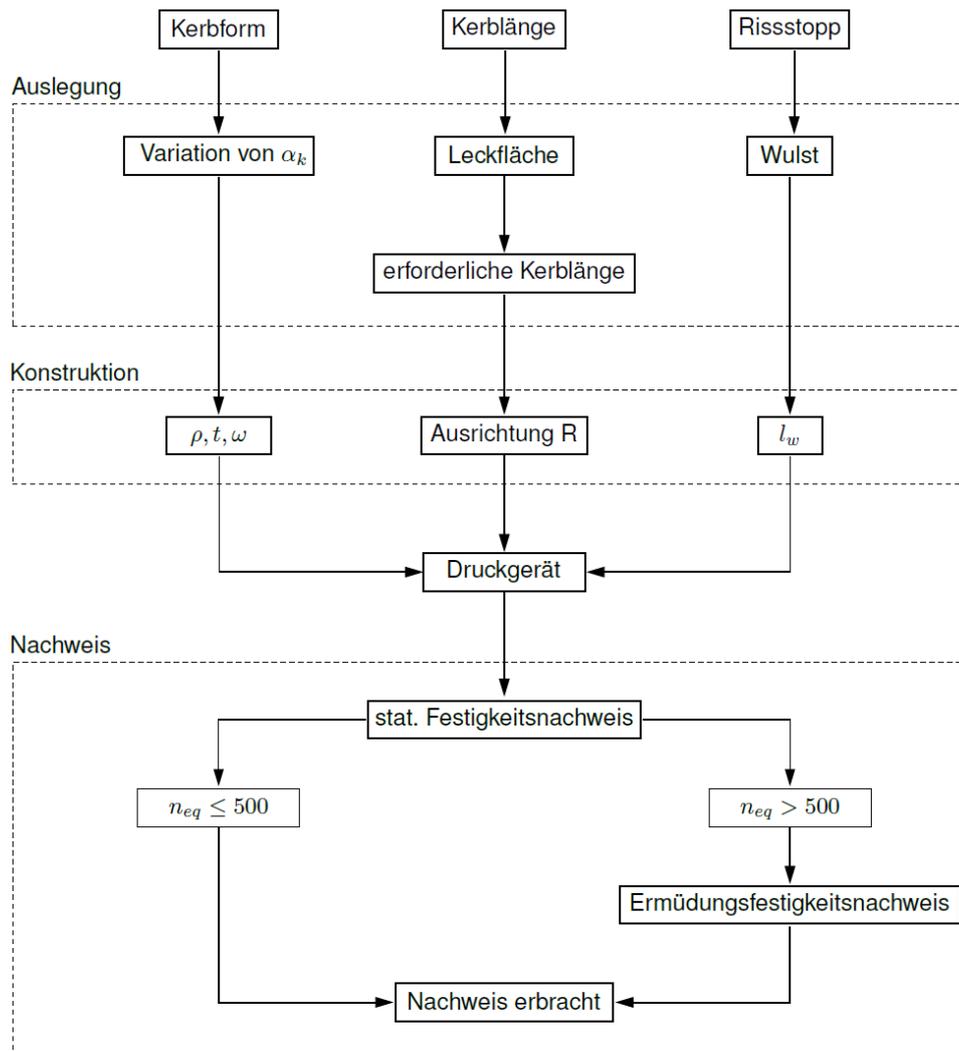


Abbildung 66: Richtlinienvorschlag zur Umsetzung einer Sollbruchstelle durch einen Oberflächenkerbe

### Auslegung

Zuerst wird die Stelle am Druckgerät identifiziert, an der ein kontrolliertes Versagen vorgesehen werden kann. Dazu soll diese Stelle dünnwandig sein und bei Versagen ein ausreichend großes Leck ermöglichen.

Zur Demonstration wird ein Druckbehältnis nach DIN EN 13445-3:2018-12:2018 konstruiert. Die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 67 dargestellt. Der maximal ertragbare Druck  $P_{\max}$  ergibt sich nach DIN EN 13445-3:2018-12:2018 (S. 30) aus der Berechnungsnennspannung  $f$ , dem Schweißnahtfaktor  $z$ , dem mittleren Durchmesser  $D_m$  und der Wandstärke  $e_a$  zu 49,95 MPa.

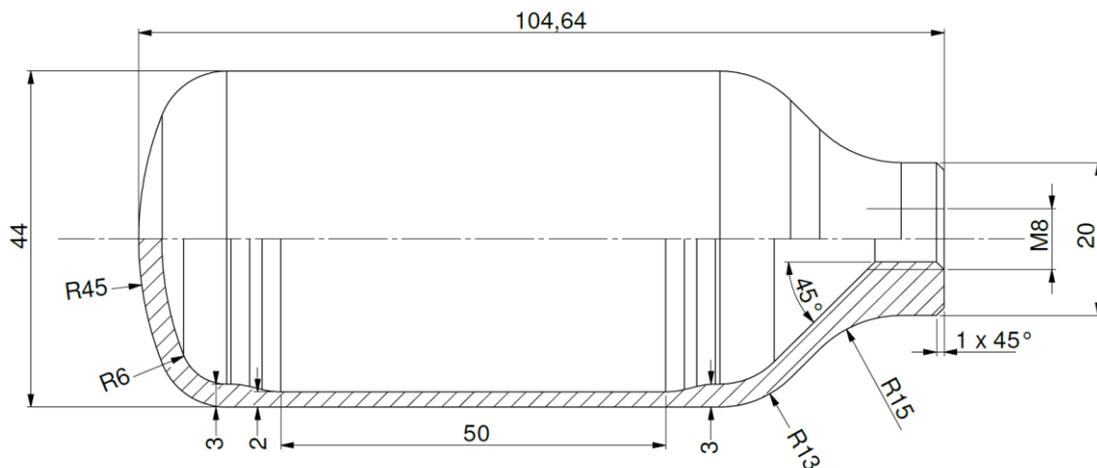


Abbildung 67: Abmessungen des Modelldruckbehälters zur Berstdruckprüfung

Als Applikationsort wird die halbe Länge der Zylindermantelfläche ausgewählt, da das ideale Modelldruckbehältnis an dieser Stelle bei Überdruck versagen würde. Abbildung 68 zeigt die äquivalente plastische Dehnung PEEQ im Konturplot des Bauteils, die mittels FEM berechnet wurde. Zugrunde liegen die Minimalkennwerte des Spiegelversuchs von Maschine 2 (Abschnitt 5.2.1). Durch die rote Färbung wird ersichtlich, dass der Wandquerschnitt im zylindrischen Teil zuerst vollständig plastifiziert und das Versagen anzeigt. Die Zylindermantelfläche eignet sich außerdem konstruktiv durch ihre Einfachheit bzw. ihren konstanten Querschnitt zur Applikation.

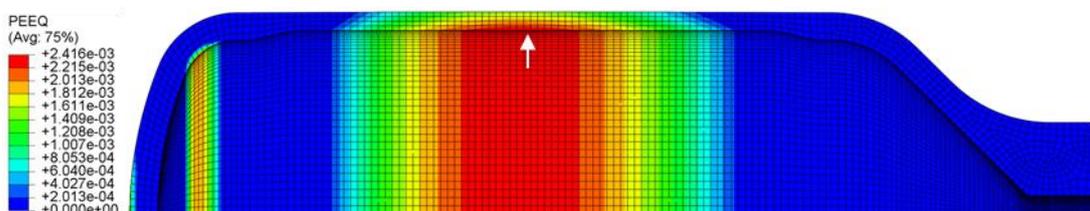


Abbildung 68: FE-Farbdarstellung der äquivalenten plastischen Vergleichsdehnung PEEQ im Halbschnitt des Modelldruckbehältnisses bei  $P_{max}$

Formkerben werden definiert durch die Kerbform im Querschnitt, die Kerblänge sowie die Rissstopp-Geometrie (Abbildung 69). Für die Additive Fertigung eignet sich hierbei ein Öffnungswinkel  $\omega$  von  $90^\circ$ , um eine Fertigung an aufrechten Wänden ohne Prozessunsicherheiten zu ermöglichen (vgl. kritischer Überhangwinkel von typischerweise  $45^\circ$ ) und wird daher festgelegt.

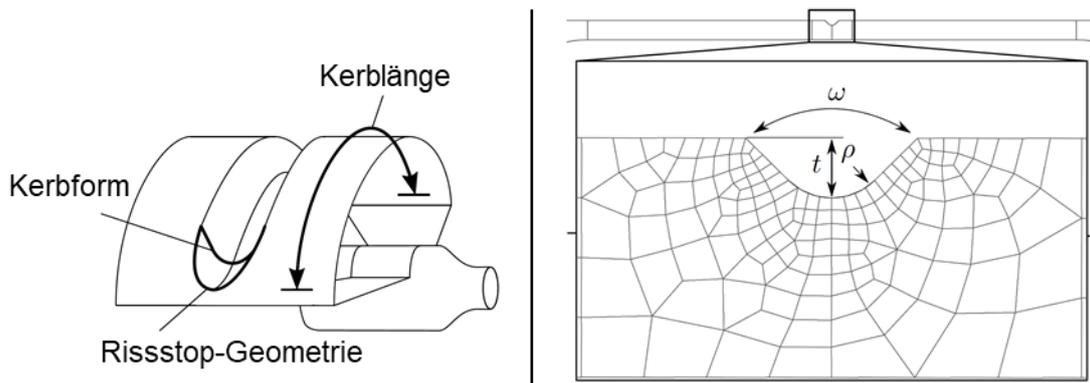


Abbildung 69: Schema eines Umfangskerbs am Modellbehälter (links) und Kerbgeometrieübersicht (rechts)

#### 5.4.3.1.1 Auflösbarkeit

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Auslegung ist die Auflösungsfähigkeit durch den Fertigungsprozess. Hierzu wird eine Testgeometrie vorgeschlagen wie in Abbildung 70 gezeigt. Mittels Normzahlreihe R5 nach DIN 323-1:1974-08 [74] wird der Kerbradius  $\varphi = R$  variiert und entsprechende Kerben und Rissstopp-Wülste an einer stehenden Wand in verschiedenen Orientierungen aufgetragen und gefertigt. Im Auflicht- oder Lasermikroskop lassen sich die Formen und damit die Auflösungsfähigkeit der Maschine für diesen Anwendungsfall vermessen. Für die verwendete Maschine EOS M290 (M2) sind die Abweichungen der gemessenen Radien in Abbildung 71 dargestellt. Die verwendeten Parameter entsprechend stets denen aus Abschnitt 5.2.1. Eine steigende Abweichung für feinere Details wird ersichtlich, wobei Wülste tendenziell größer und Kerben kleiner im Fertigungsprozess abgebildet werden. Gleichzeitig nimmt der Standardfehler der Formabweichung zu, was auf den Einfluss der Rauheit zurückgeführt werden kann. Die geringsten Abweichungen werden durch vertikal (in Aufbauichtung) verlaufende Kerben erzielt (durchgezogene Linie). Dies begründet sich ebenfalls in der Oberflächenrauheit, die insbesondere durch den Treppenstufeneffekt an Up- und Downskinflächen gesteigert wird. Der Versuch wurde für eine schräge Wand mit  $45^\circ$  Aufbauwinkel wiederholt, wobei insbesondere die Formabweichung an der Downskinseite erheblich vergrößert und deshalb von einer Applizierung hier abgeraten wird. Die Messwerte auf der Oberseite ähneln denen der stehenden Wand und weisen eine geringfügig höhere Standardabweichung auf. Kerben ab etwa  $R_{0,25}$  mm weisen mittlere Abweichungen im einstelligen Prozentbereich auf.

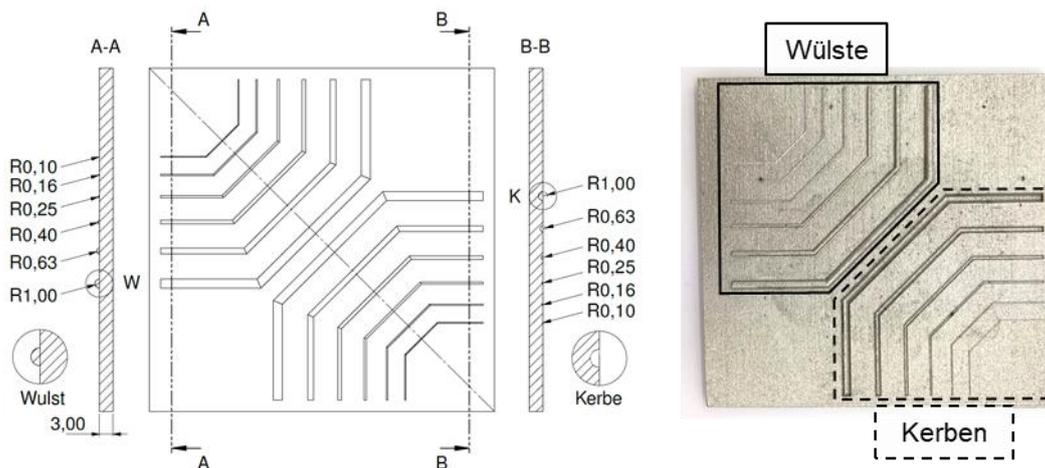


Abbildung 70: Testgeometrie zur Untersuchung der Auflösungsgenauigkeit für Kerben und Wülste in verschiedenen Ausrichtungen (Kantenlänge 75,8 mm)

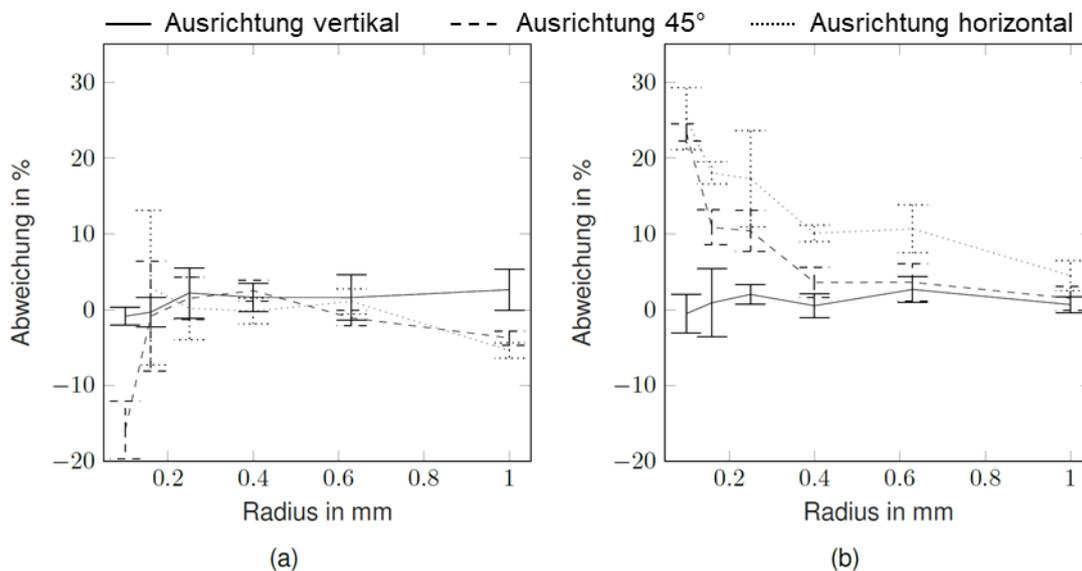


Abbildung 71: Mittelwert und Standardabweichung ( $n = 3$ ) zur Auflösungsgenauigkeit für (a) Kerben und (b) Erhebungen an einer stehend gebauten Wand (Neigung =  $0^\circ$ ) für Maschine 2

#### 5.4.3.1.2 Kerbform

Die Kerbform wurde numerisch durch eine Parameterstudie mit Abaqus Isight (Dassault-Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich) untersucht. Für den sicheren Betrieb soll die Spannungsüberhöhung (Kerbformzahl  $a_k$ ) möglichst gering sein und gleichzeitig die Form fertigungstechnisch sicher aufgelöst werden. Die Kerbe wurde wie in Abbildung 69 als Umfangskerbe bei halber Zylinderlänge am Modelldruckbehälter ausgeführt. Die resultierende Nennspannung zur Ermittlung der Kerbformzahl ergibt sich aus dem resultierenden Restquerschnitt. Insgesamt wurden 95 Wertepaare bei dem ertragbaren Druck von 50 MPa für Kerbtiefen von 0,177 mm bis 1 mm und Kerbradien von 0,16 mm bis 1 mm untersucht. Kerbformzahlen  $a_k$  zwischen 1,07 und 2,1 resultieren. Der nichtlineare Zusammenhang kann Abbildung 72 entnommen werden. Der Einfluss der Kerbtiefe  $t$  ist größer als der Einfluss des Kerbradius  $\varphi$ . Für die geringste Spannungsüberhöhung ergaben sich daraus der Kerbradius  $\varphi = 0,22$  mm und die Kerbtiefe  $t = 0,75$  mm (Tabelle 7, grün markiert).

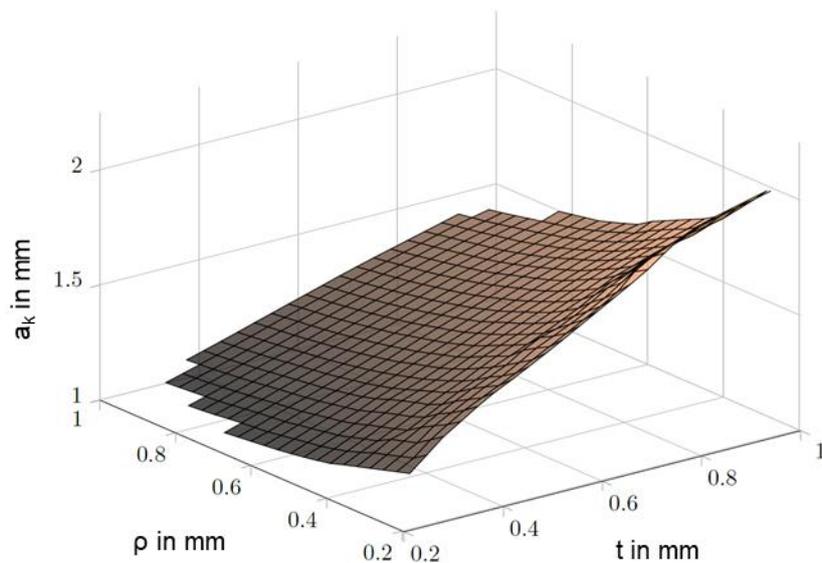


Abbildung 72: 3D-Ergebnisdarstellung der Parameterstudie für die Kerbformzahl  $a_k$  in Abhängigkeit des Kerbradius  $\varphi$  und der Kerbtiefe  $t$  mittels Interpolation "Latin Hypercube"

Tabelle 7: Ergebnisübersicht Parameterstudie Kerbform: Kerbvergleichsspannung  $\sigma_v$ , Kerbradius  $\varphi = R$  und Kerbtiefe  $t$

Nr.	t in mm	R in mm	$\sigma_v$ in MPa	Nr.	t in mm	R in mm	$\sigma_v$ in MPa
1	0,177	0,440	219	49	0,610	0,270	427
2	0,202	0,400	229	50	0,618	0,211	452
3	0,211	0,190	252	51	0,627	0,941	339
4	0,219	0,750	217	52	0,635	0,712	360
5	0,228	0,470	232	53	0,644	1,000	342
6	0,236	0,600	227	54	0,652	0,796	360
7	0,245	0,450	238	55	0,661	0,415	414
8	0,262	0,460	243	56	0,669	0,771	370
9	0,270	0,160	291	57	0,678	0,347	440
10	0,279	0,190	290	58	0,686	0,253	479
11	0,287	0,960	228	59	0,695	0,296	473
12	0,296	0,790	236	60	0,703	0,228	514
13	0,304	0,830	236	61	0,712	0,533	419
14	0,313	0,340	273	62	0,720	0,898	382
15	0,321	0,300	284	63	0,729	0,491	435
16	0,330	0,620	253	64	0,737	0,720	407
17	0,338	0,240	302	65	0,746	0,508	441
18	0,347	0,800	249	66	0,754	0,686	419
19	0,355	0,540	267	67	0,762	0,813	410
20	0,364	0,970	248	68	0,771	0,389	483
21	0,372	0,520	274	69	0,779	0,559	452
22	0,381	0,180	340	70	0,788	0,881	416
23	0,389	0,650	270	71	0,796	0,169	609
24	0,398	0,430	296	72	0,805	0,364	513
25	0,406	0,280	326	73	0,813	0,635	458
26	0,415	0,930	264	74	0,822	0,262	576
27	0,423	0,360	314	75	0,830	0,856	441

28	0,432	0,480	300	76	0,839	0,516	495
29	0,440	0,240	347	77	0,847	0,915	445
30	0,449	0,590	295	78	0,856	0,287	580
31	0,457	0,980	276	79	0,864	0,924	454
32	0,466	0,850	284	80	0,873	0,669	487
33	0,474	0,660	299	81	0,881	0,499	525
34	0,482	0,320	348	82	0,890	0,372	567
35	0,491	0,740	300	83	0,898	0,966	469
36	0,499	0,220	382	84	0,907	0,762	495
37	0,508	0,840	299	85	0,915	0,423	571
38	0,516	0,640	316	86	0,924	0,406	580
39	0,525	0,680	317	87	0,932	0,907	494
40	0,533	0,310	378	88	0,941	0,949	495
41	0,542	0,470	346	89	0,949	0,610	546
42	0,550	0,820	316	90	0,958	0,703	535
43	0,559	0,330	380	91	0,966	0,381	622
44	0,567	0,780	326	92	0,975	0,584	569
45	0,576	0,870	323	93	0,983	0,567	585
46	0,584	0,550	354	94	0,992	0,627	572
47	0,593	0,860	330	95	1,000	0,202	747
48	0,601	0,580	359				

Zur experimentellen Untersuchung der Wirksamkeit der ermittelten Kerbgeometrie werden einaxiale Zugversuche durchgeführt. Hierzu werden Flachzugproben DIN 50125 – E 2 x 20 x 46 als Grundlage verwendet, um eine hohe Probenbreite zur Kerbapplizierung zu erreichen (

Abbildung 73). Die Probendicke von 2 mm entspricht der Wandstärke des Modelldruckbehälters. Insgesamt wurden fünf Geometrien mit je zwei Wiederholungen geprüft ( $n = 3$ ). Dabei wurden Referenzproben (a) ohne Kerb, (b, c) mittig gekerbte Proben mit zwei verschiedenen Kerbtiefen, (d) außermittig gekerbte und (e) gekerbte Proben mit  $45^\circ$  rotierter Kerbrichtung untersucht (vgl. Abbildung 74). Die Rotation R erfolgt um den Normalenvektor der Fläche der Probenbreite. Der Zugversuch erfolgt mit der Universalprüfmaschine Z050 (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) mit einer 50 kN Kraftmessdose und dem Dehnungsmesser mulitXtens (ZwickRoell, Ulm, Deutschland). Die Prüfung wird weggesteuert durchgeführt bei einer Prüfgeschwindigkeit von  $v = 0,002 \text{ s}^{-1}$  nach DIN 6892-1. Die Bruchfläche verläuft für alle Proben senkrecht zur Beanspruchungsrichtung. Für gekerbte Proben ist stets eine stark ausgeprägte Zentrierung der Bruchfläche in der Kerbmitte zu beobachten. Die Rissausbreitung folgt dabei dem Kerbverlauf mit Ausnahme der  $45^\circ$  rotierten Kerbe. Dies trifft insbesondere für die Probe mit Kerbversatz um 5 mm zu und bestätigt den hinreichenden Einfluss zur Provokation des Versagensortes im Bereich der Messlänge. Die um  $45^\circ$  rotierte Kerbe führt nicht zur Änderung der Rissausbreitungsrichtung. Dies kann auf die für den Werkstoff 1.4404 typische hohe Bruchdehnung sowie der Ausrichtung der Hauptspannungskomponente zurückgeführt werden. Wie in Abbildung XY (e) deutlich [42] erkennbar verbindet der Bruch die ausgeprägte Einschnürung links und rechts. Um die Rissausbreitungsrichtung zu ändern, ist demnach eine

größere Kerbformzahl („schärfere“ Kerbe) notwendig. Für den Modelldruckbehälter folgt daraus die Annahme, dass eine Kerbe appliziert auf der Zylinderwand zur Vorbestimmung des Versagensortes geeignet ist und in der hier vorgestellten Ausprägung etwaige Defekte bzw. unregelmäßige Festigkeitseigenschaften von AM-Bauteilen übergeordnet ist.

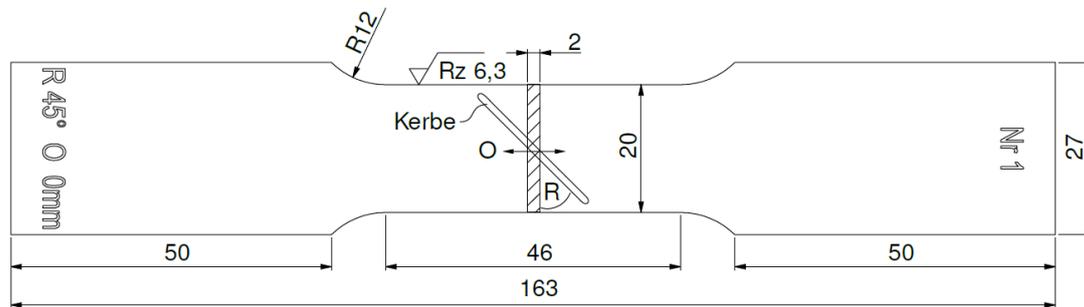


Abbildung 73: Geometrie zur Untersuchung des Verhaltens gekerbter Proben im Axialzugversuch

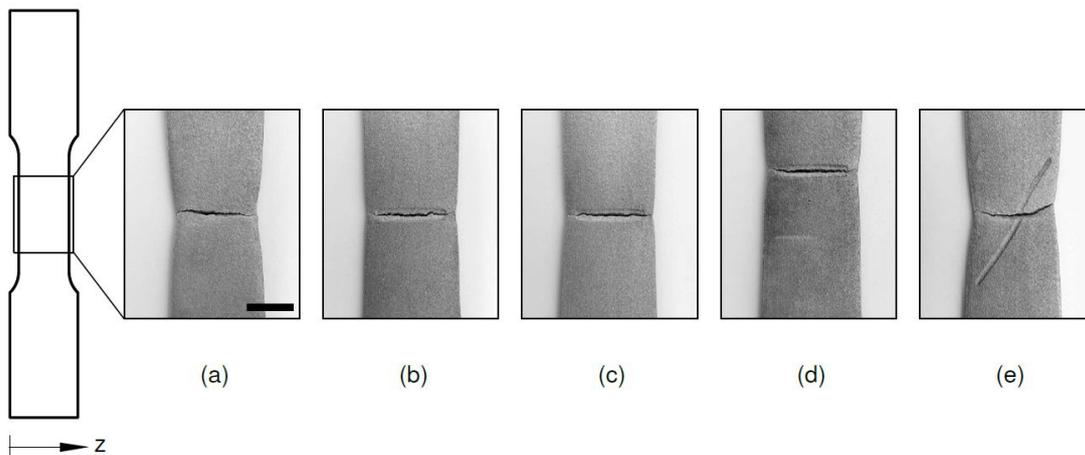


Abbildung 74: Flachzugprobenübersicht nach zerstörender Prüfung: (a) ohne Kerbe, (b) Kerbtiefe  $t$ , (c) Kerbtiefe  $1,5 t$ , (d) Kerbtiefe  $t$  mit Versatz  $O = 5 \text{ mm}$ , (e) Kerbtiefe  $t$  mit Rotation  $R = 45^\circ$

Während sich die maximale Zugfestigkeit mit Einbringung der Kerben bezogen auf den Nennquerschnitt ohne Kerbe geringfügig reduziert, folgt der Einbringung eine deutliche Abnahme der Bruchdehnung (

Abbildung 75). Dies wird ebenfalls sichtbar in Abbildung 74 anhand der geringer ausgeprägten Bruchdehnung. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt die Verschiebung der Kerbe um 5 mm außerhalb der Probenmitte keine Veränderung. Bei Rotation der Kerbe reduziert sich die Bruchdehnung und die maximale Zugfestigkeit leicht. Die geringe Veränderung der Bruchdehnung ist zurückzuführen auf den kaum vorhandenen Einfluss der rotierten Kerbe auf die Bruchausbreitung. Versagt das Bauteil entgegen der Auslegung nicht entlang der eingebrachten Kerbe, so ist in diesem Fall nicht von einer Verringerung der Bruchdehnung auszugehen, wie das Experiment zeigt. Die Verringerung der Bruchdehnung gilt hier für den Schadensfall „Bruch im Kerb“ und kann entsprechend – bspw. gegen Explosion – abgesichert werden.

Für die Auslegung der Behälterwandstärke z.B. nach DIN EN 13445 sind die Dehngrenzen  $R_{p0,2}$  und  $R_{p1,0}$  maßgeblich. Beide sind durch die Einbringung der Kerbe praktisch unbeeinflusst

wie

Abbildung 76 für  $R_{p0.2}$  zeigt. Außerdem erkennbar weicht eine einzelne Messung der ungekerbten Referenz hin zu größeren Werten ab. Hierbei ist eine fehlerhafte Einstellung des Dehnungsaufnehmers im Versuch anzunehmen, da bis etwa 480 MPa negative Dehnungen aufgezeichnet wurden.

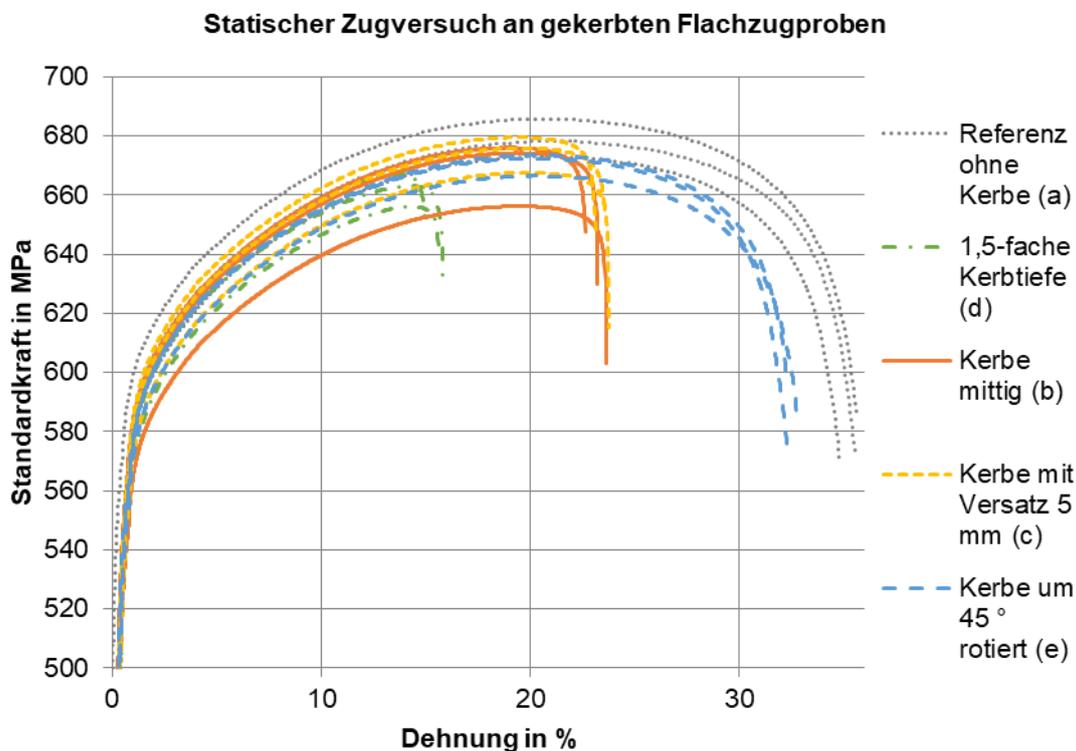


Abbildung 75: Spannungs-Dehnung-Verlauf quasi-statischer Zugversuch zur Rissprovokation mittels Oberflächenkerbe

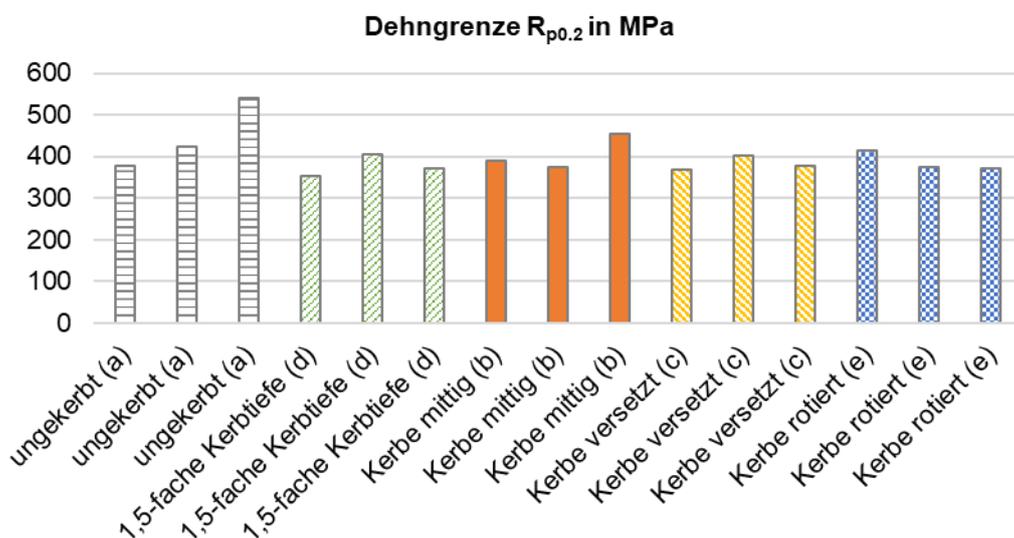


Abbildung 76: Streckgrenze  $R_{p0.2}$  quasi-statischer Zugversuch zur Rissprovokation mittels Oberflächenkerbe

#### 5.4.3.1.3 Kerblänge

Eine Aufgabe der Sollbruchstelle ist es, die Bauteilprüfung zu erleichtern. Dabei wird die Prüf-  
stelle dem schwächsten Bauteilbereich gleichgesetzt wird, weil hier ein Versagen zuerst er-  
wartet werden kann. Die zuvor beschriebene Vorgehensweise zur Einbringung einer Kerbe trägt  
dem Rechnung. Weiterhin soll zum Explosionsschutz das Kriterium „Leck-vor-Bruch“ erfüllt  
werden. Dies wird beispielsweise in den technischen Regelwerken des Kerntechnischen Aus-  
schuss (KTA) für den Bruchabschluss druckführender Komponenten vorgeschlagen  
KTA 3206:2014-11 [75]. Entscheidende Merkmale hierfür sind eine hinreichende Leckageflä-  
che (Druckausgleich) sowie der sichere Rissstopp. Die Leckagefläche wird dabei bestimmt  
von der Risslänge, welche der Kerblänge von Rissstopp zu Rissstopp gleichgesetzt wird. Der  
Applikationsort (Zylindermantelfläche) entspricht dem Schadenfall „Rohrversagen mit einem  
Längsriss“. KTA 3206:2014-11 und [76] geben entsprechende Berechnungsmöglichkeiten für  
Längs- und Umfangsriss vor. Aus der Leckagefläche und dem Beulfaktor  $\alpha$  in Abhängigkeit  
des Schalenparameters  $\lambda$  wird die kritische Risslänge  $2c$  zu 10,39 mm berechnet und die  
Kerblänge  $l$  basierend darauf auf 10,5 mm festgelegt.

#### 5.4.3.1.4 Rissstopp

Für den Rissstopp ergibt die Recherche zwei Möglichkeiten: (1) Rissumlenkung durch den  
Kerbverlauf und (2) zusätzliches Material in Form einer Wulst. [69] schlägt die Anwendung von  
sogenannten Zugdreiecken vor, um den Widerstand gegen die Rissausbreitung bei minimalem  
Materialeinsatz zu maximieren. Gleichfalls sind Versteifungen wie z.B. Rippen oder Waben  
möglich. Zur Untersuchung beider Ansätze werden Compact-Tension-Proben verwendet (Ab-  
bildung 77). Die Probendicke wird der Wandstärke des Modelldruckbehältnisses von 2 mm  
gleichgesetzt. Die vier Varianten: (a) Referenz ohne Kerbe, (b) Kerbe ohne Wulst, (c) Kerbe  
mit Wulst und (d) Kerbe mit Rissumlenkung werden jeweils mit zwei Wiederholungen ( $n = 3$ )  
geprüft. Im Versuchszeitraum wurde aus zeitlichen Gründen ein Axialzugversuch (äquivalent  
zu den vorangegangenen Untersuchungen) anstelle eines zyklisch provozierten Rissfort-  
schritts untersucht. Zur Probenaufnahme wurde eine Halterung nach ISO 12135 angefertigt.

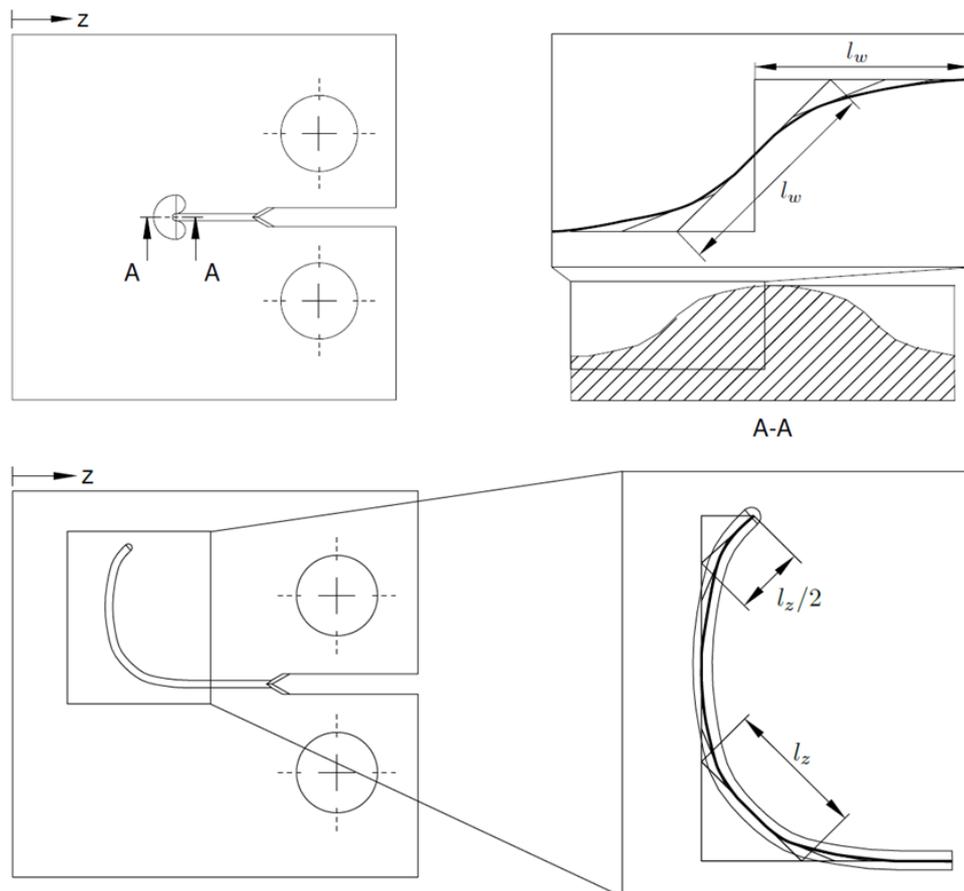


Abbildung 77: Modifizierte Compact-Tension-Proben (DIN EN ISO 12737 [77]) zur Untersuchung der Rissausbreitung im einachsigen Zugversuch

Bei den Verläufen der Standardprüfkraft über der Verschiebung ist bei allen Proben ein ähnlicher Zusammenhang erkennbar (Abbildung 77). Nach einem linearen Anstieg liegt ein nichtlinearer Übergang vor. Nach dem Erreichen der Maximalkraft fällt die Kurve stark ab. In diesem Bereich ist eine Rissausbreitung in der CT-Probe zu beobachten. Abschließend flacht der Kraft-Weg-Verlauf ab, bis zum Testende oder Durchriss. Im Detail ist zu erkennen, dass die Kraft während der Rissausbreitung in der Probe mit Wulst nahe der ungekerbten Probe liegt. Diese wird gefolgt von der Probe mit Zugdreieck-Kontur zur Rissumlenkung. Hier ist festzustellen, dass der Riss nicht bei allen Proben im Kerbengrund verläuft, was in einer vergrößerten Standardabweichung ersichtlich ist. Für den Fall der erfolgreichen Rissumlenkung kann diese bis zu einer Umlenkung von etwa  $45^\circ$  beobachtet werden. Die gekerbte Probe ohne Modifikation des Kerbendes weist die geringste benötigte Kraft während der Rissausbreitung auf.

Aufgrund der Dünnwandigkeit der Probe ist bei allen ein Ausknicken bei größeren Risslängen, beziehungsweise Verformungen der Proben erkennbar. Die Verformung führt zu einer Mixed-Mode Beanspruchung in der Rissspitze, die auch in Form einer Torsion des Restquerschnitts erkennbar ist (Abbildung 78). Dies tritt ein, nachdem das freie Probenende bei zunehmender Risslänge vor- oder zurückknickt. Das wiederum führt zu einer V-Form der Probe, in deren Knick der Riss verläuft, wie in Abbildung 78a zu erkennen. Ist der Restquerschnitt dünn, so folgt die Torsion dessen, was an den aufgebogenen Bruchkanten der Proben in Abbildung 78b - d erkennbar ist. Damit muss festgestellt werden, dass dieser Versuch mindestens für dünnwandige Proben nicht die erhoffte Erkenntnis über das Verhalten der Rissausbreitung liefert.

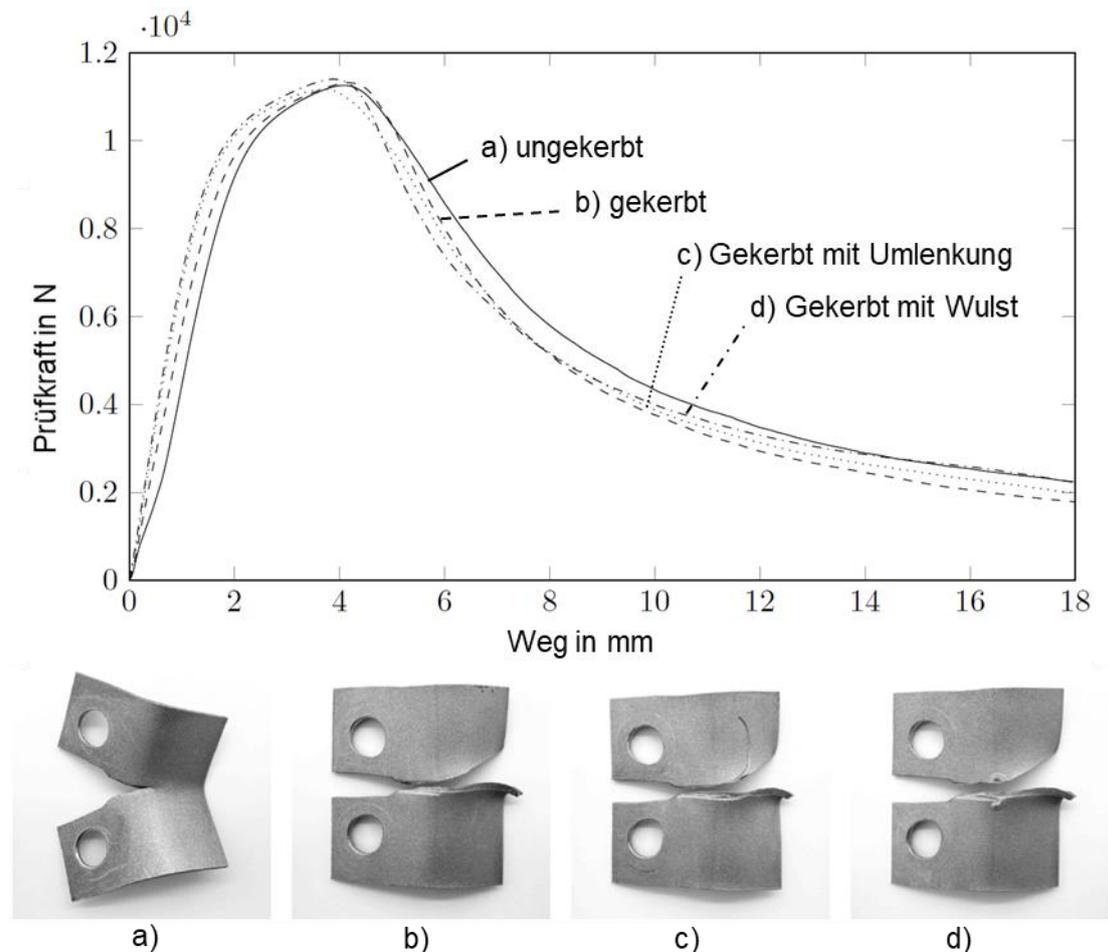


Abbildung 78: Verlauf der Standprüfungskraft über den Weg und Übersicht der Schadensbilder nach quasi-statischem Compact-Tension-Zugversuch

### Konstruktion

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen wird die Sollbruchstelle auf dem Modelldruckbehältnis stellvertretend für ein Bauteil appliziert (Abbildung 79). Der Kerbquerschnitt wird durch die Parameter Kerbradius  $\rho$ , Kerbtiefe  $t$  und Öffnungswinkel  $\omega$  definiert (Tabelle 7). Der Spannungszustand im Bauteil bestimmt die Orientierung des Kerbverlaufs. Die Kerbe wird senkrecht zur größten Hauptspannungskomponente angebracht (vgl. einachsiger Zugversuch mit gekerbten Proben). Beide Kerbenenden werden mit einer ausgewählten Rissstoppgeometrie versehen. Im weiteren Projektverlauf wird die Zugdreiecks-geformte Wulst (zusätzliches Material) als Rissstopp experimentell vorgesehen. Die Länge der Sollbruchstelle  $l_w = 10,5$  mm

bestimmt sich aus der notwendigen Leckfläche und ist entsprechend der Betriebszustände hinreichend groß zu wählen (Abschnitt 5.4.3.1.3).

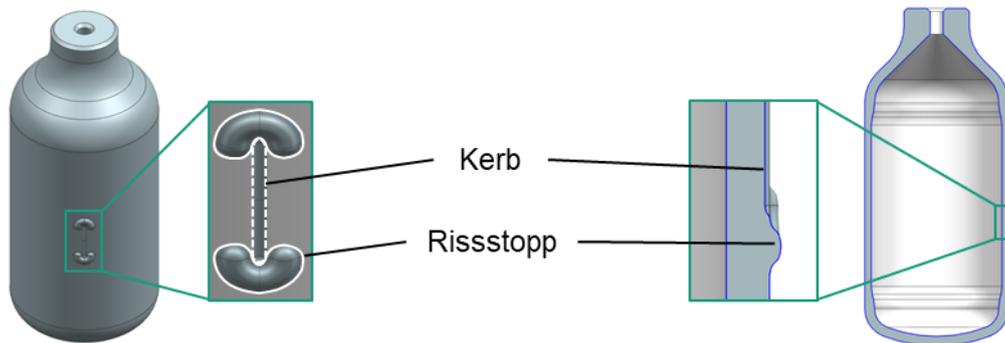


Abbildung 79: Modelldarstellung Berstdruck-Behältnis mit applizierter Sollbruchgeometrie

### Nachweis

Um eine sichere Integration dieser Struktur zu gewährleisten ist ein Nachweis für den angestrebten Betriebszustand erforderlich. Dazu ist mindestens ein statischer Festigkeitsnachweis bei ruhenden Lasten oder einer äquivalenten Lastzyklenzahl  $n_{eq}$  unter 500 notwendig, wie es die DIN EN 13445-3:2018-12 (2018, S. 19) vorsieht. Der Nachweis kann, wie dort gefordert geschehen, oder nach Rennert et al. (2012, S 64 ff.) mit örtlichen Spannungen erfolgen. Für alle anderen Lastfälle ist insbesondere aufgrund der eingebrachten Kerbe ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis erforderlich. Dieser kann beispielsweise nach Rennert et al. (2012, S. 84 ff.) durchgeführt werden. Der Nachweis wird mit örtlichen Spannungen mittels einer FE-Rechnung durchgeführt, um die Sollbruchstelle darstellen zu können. Abbildung 80 zeigt die von Mises Vergleichsspannung für den Prüfkörper im Bereich von Kerbe und Wulst.

(1) Die FE-Berechnung wird als valide betrachtet, weil die Knotenspannungen der jeweiligen Spannungen, die mittels Kesselformel berechnet werden, mit sehr kleinen Abweichungen entsprechen (bspw. Abweichung Tangentialspannung Mitte Zylinderwand: 0,3 %).

(2) Bei der aufgebrachten Last von 41,55 MPa zeigt die linear-elastische Rechnung, dass im Kerbengrund die Streckgrenze überschritten wird. Die Spannung von 811,7 MPa liegt über dem vom Material ertragbaren Wert. Dieser Effekt ist lokal begrenzt wie in Abbildung 80 zu sehen und führt nicht notwendigerweise zu einem Versagen des Bauteils.

(3) Um der lokal begrenzten plastischen Verformung Rechnung zu tragen, wird ein Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie [78] durchgeführt. Dieser Nachweis wird anhand des Knotens im Kerbengrund an der Symmetrieebene geführt. Mittels elastisch-idealplastischem Materialgesetz wird das vollständige Durchplastifizieren des Querschnitts bei einem Innendruck 50 Nmm<sup>-2</sup> berechnet. Die Streckgrenze  $R_{p0,2(min)}$  ist bei einem Innendruck ab 26,5 MPa im Kerbengrund überschritten. Für den Betriebsinnendruck von 41,55 MPa ergibt sich ein Auslastungsgrad von 96,25 % im statischen Fall bei gewähltem Sicherheitsfaktor nach [78] für Umgebungstemperatur und die Annahme einer geringen Schadensfolge.

(4) Mit Auswertungen im Nachweispunkt und einem Nachbarpunkt im Inneren mit einem Abstand von 0,2 mm wird der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach [78] erbracht. Für die Zyklenzahl  $10^5$  ergibt sich ein zyklischer Auslastungsgrad von 92,25 %. Sowohl der statische als auch

der wechselnde Lastfall liegen nahe, aber unterhalb des ertragbaren Maximums, womit die Festigkeit für 41,5 MPa Innendruck nachgewiesen ist. Nach dem gleichen Vorgehen wird der Nachweis für das gekerbte Modelldruckbehälter ohne Wulst erbracht.

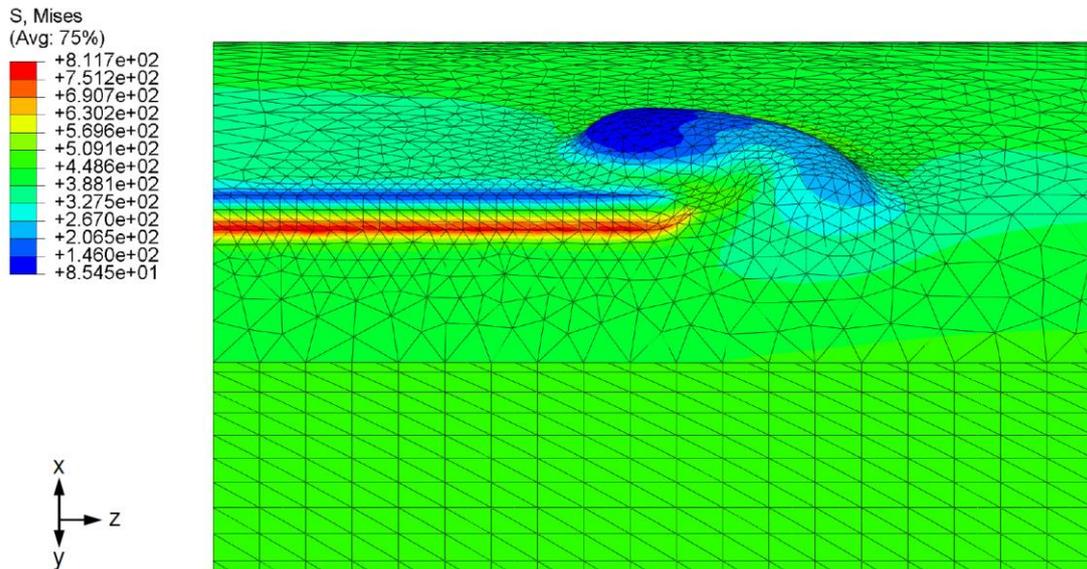


Abbildung 80: Farbdarstellung der von Mises Vergleichsspannung am Druckbehälter mit Kerbe und Wulst bei Nachweisdruck

## 5.5 Arbeitspaket 6: Auslegung und Herstellung von Demonstratoren

### 5.5.1 Berstdruckprüfung

In AP5 wurde im Axialzugversuch gezeigt, dass sich der Versagensort durch Formkerben an Flachzugproben vorbestimmen lässt. Ein Modelldruckbehältnis wurde mit integrierter Sollbruchstelle ausgelegt, Proben gefertigt und Berstdruckprüfungen durchgeführt. Unmittelbar nach der Fertigung und vor dem Trennen der Proben von der Bauplattform wurden diese zur Dokumentation ihrer Position und Lage im Baufeld mit Schlagzahlen an der Stirnseite markiert. Die drei Varianten ungekerbt, mit Kerbe sowie mit Kerbe und Wulst wurden jeweils mit drei Wiederholungen zerstörend geprüft ( $n = 4$ ; Beschriftung A - L). Hierfür kam eine bis 100 MPa zugelassene Handpumpe Typ HP32/8 (URACA GmbH & Co. KG, Bad Urach, Deutschland) zum Einsatz. Das Druckbehältnis wurde durch eine M8-Schraubenverbindung, Gewindedichtband und eine O-Ringdichtung angeschlossen. Eine Unterlegscheibe schützt die O-Ringdichtung vor Beschädigung durch die raue AM-Oberfläche (Abbildung 81). Prüfmedium war Wasser, um Explosionsgefahr auszuschließen und den Prüfaufwand möglichst gering zu halten (Sicherheitsvorkehrungen).

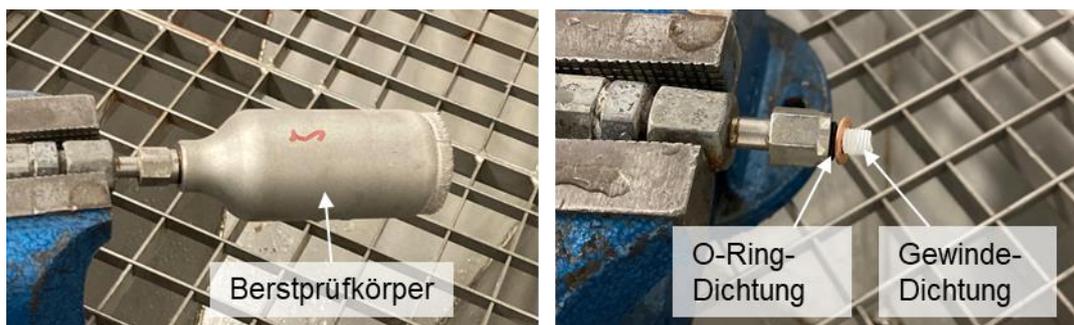


Abbildung 81: Aufbau Anschluss Modelldruckbehältnis zur Berstdruckprüfung

Im Zugversuch an gekerbten Flachzugproben wurde beobachtet, dass sich die maximale Zugfestigkeit mit und ohne Kerbe kaum unterscheidet. Die Bruchdehnung dagegen reduziert sich deutlich mit steigender Kerbformzahl (AP 5). Ganz ähnlich versagen die unterschiedlichen Behältnisse im Berstdruckversuch nahezu beim gleichen Prüfdruck im Bereich von 67 bis 70 MPa. Dies kann auf die Kerbfestigung bei duktilen Materialien zurückgeführt werden. Die sich einstellende plastische Verformung sinkt dagegen mit applizierter Sollbruchstelle messbar. Abbildung 82 zeigt die drei Varianten nach der Prüfung. Wie erwartet stellt sich ein Längsrisse infolge der Tangentialspannung (größte Hauptspannungskomponente) am Zylindermantel bei allen Proben ein. Dieses Verhalten entspricht der Theorie für isotrope metallische Werkstoffe. Das heißt, ein konventionell gefertigtes Pendant würde sich vergleichbar verhalten. Ebenfalls gemäß der Erwartung, verläuft der Bruch mittig im Kerbengrund aller gekerbten Proben. Der Versagensort der ungekerbten Proben ist zufällig am Umfang verteilt (Abbildung 83). Es ist kein Zusammenhang zu Schutzgasströmungs- oder Beschichtungsrichtung des Fertigungsprozesses erkennbar. Es lässt sich Schlussfolgern, dass Kerbengeometrien existieren, die sowohl eine sichere Auslegung (Festigkeitsnachweis) als auch eine hinreichende Schwächung

des Bauteils zulassen, um den Ort des Versagens bei statischem Überdruck konstruktiv festzulegen. In allen Versuchen war eine Schwächung der Wandstärke um circa 10 % hinreichend groß für die Provokation und somit hinreichend für den Ausgleich möglicherweise vorhandener Unregelmäßigkeiten im additiv hergestellten 1.4404. Daneben zeigen die Proben mit Wulst als Rissstopp eine größere Verformung im Vergleich zu Proben nur mit Kerbe. Es wird angenommen, dass der Wulst eine Stützwirkung auf den Bereich mit Kerbe ausübt, wodurch insgesamt mehr Dehnung möglich ist bevor das Behältnis bei steigendem Druck versagt. Gleichzeitig ist die Stützwirkung der Wulst hinreichend klein, sodass der Versagensort nicht verändert wird. Dem Ziel des Rissstopps kann der Wulst dagegen keine Rechnung tragen. Dies war anhand der Vorversuche zur Rissumlenkung erwartet worden. Die Bruchlänge wird nicht messbar verkürzt. Gemäß der Erwartung für den austenitischen Edelstahl 1.4404 zeigen alle Bruchflächen einen Verformungsbruch an.

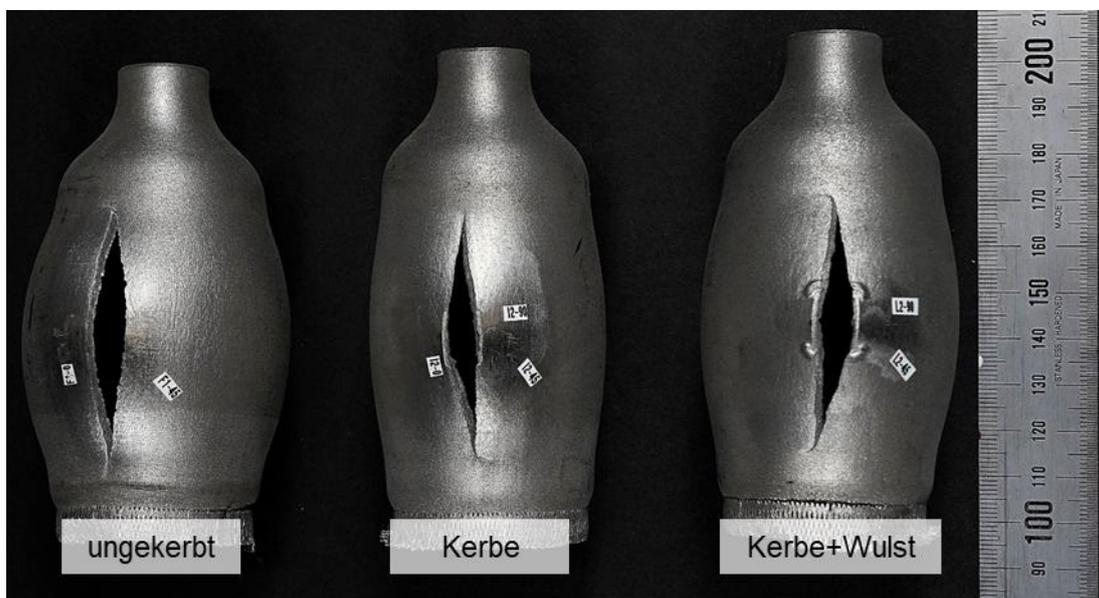


Abbildung 82: Fotografie der Proben mit Bruchstelle nach zerstörender Berstdruckprüfung mit Wasser

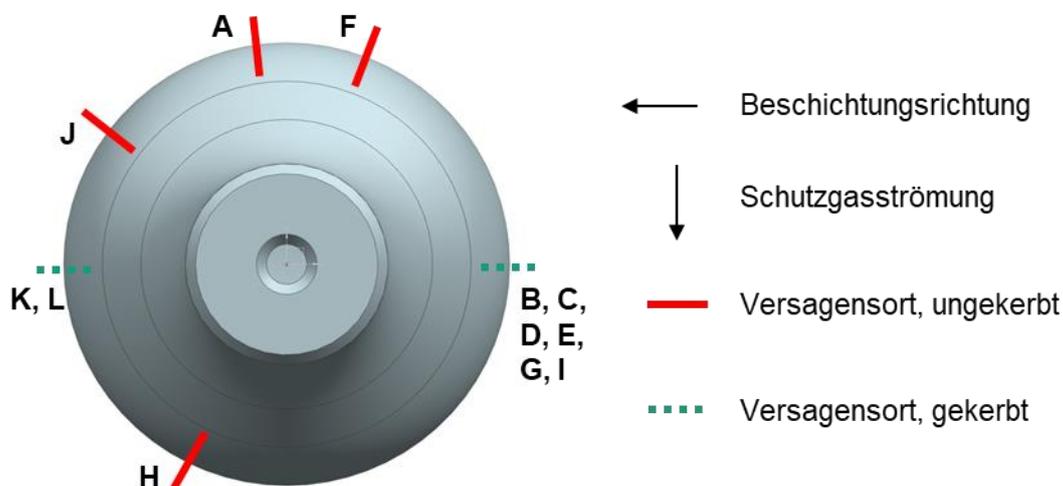


Abbildung 83: Schema Draufsicht Berstdruck-Prüfling mit eingezeichnetem Versagensort aller Proben (A-L) relativ zur Lage im Baufeld der AM-Maschine (M2)

Bei der Durchführung der Berstversuche wurden begleitend Dehnungsmessungen durchgeführt. Dehnmessstreifen (DMS) des Typs Rosette (k-Faktor:  $2,06 \pm 1\%$ ; Widerstand:  $120 \pm 0,5 \Omega$ ; Querempfindlichkeit:  $0,3 \%$ ) wurden in einer Viertelbrückenschaltung mit dem Messverstärker QuantumX MX840B (Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt, Deutschland) verwendet. Abbildung 84 zeigt die Messstellen an der Kerbe (I2, Probe I) und auf der gegenüberliegenden Rückseite (I1, Probe I), wobei  $0^\circ$  der Dehnung axial (parallel zum Kerb) und  $90^\circ$  tangential entspricht. Abbildung 85 zeigt die resultierende Bauteilfließkurve (Innendruck über Dehnung). Auffällig ist insbesondere die angezeigte Anisotropie des Elastizitätsmoduls. Im linearen Hook'schen Bereich unterhalb  $0,2 \%$  Dehnung ist die tangentielle Dehnung stets mehr als doppelt so groß wie die Axiale. Da die Tangentialspannung am Innendruck-beaufschlagten Zylinder dem Doppelten der Axialspannung entspricht, sollte sich bei isotropen Werkstoffverhalten gleichfalls die doppelte Dehnung einstellen. Der Unterschied wird auf die Anisotropie des Werkstoffs zurückgeführt. Das Verhalten zeigt sich insbesondere auch an der rückseitigen Messstelle der gekerbten Proben wie auch an der Messstelle der nicht gekerbten Proben (idealer Hohlzylinder) und legt ein größeres Elastizitätsmodul senkrecht zur Aufbaurichtung (liegend) im Vergleich zur Aufbaurichtung (stehend) nahe.

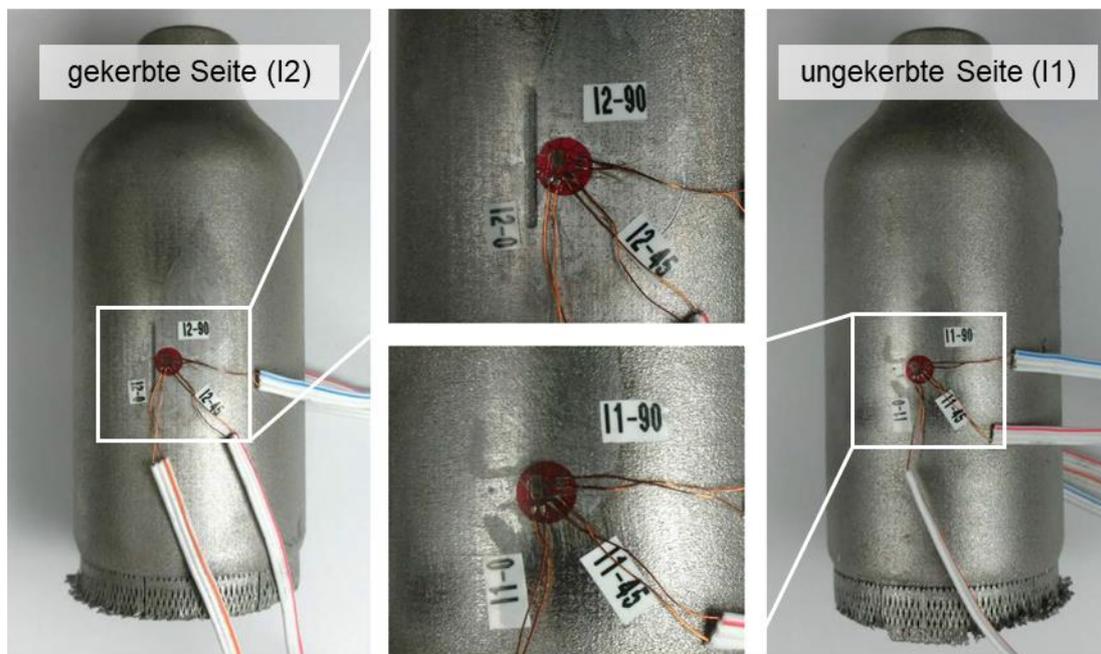


Abbildung 84: Übersichtsfotografie der Dehnungsmessstellen am Druckbehälter (Probe I)

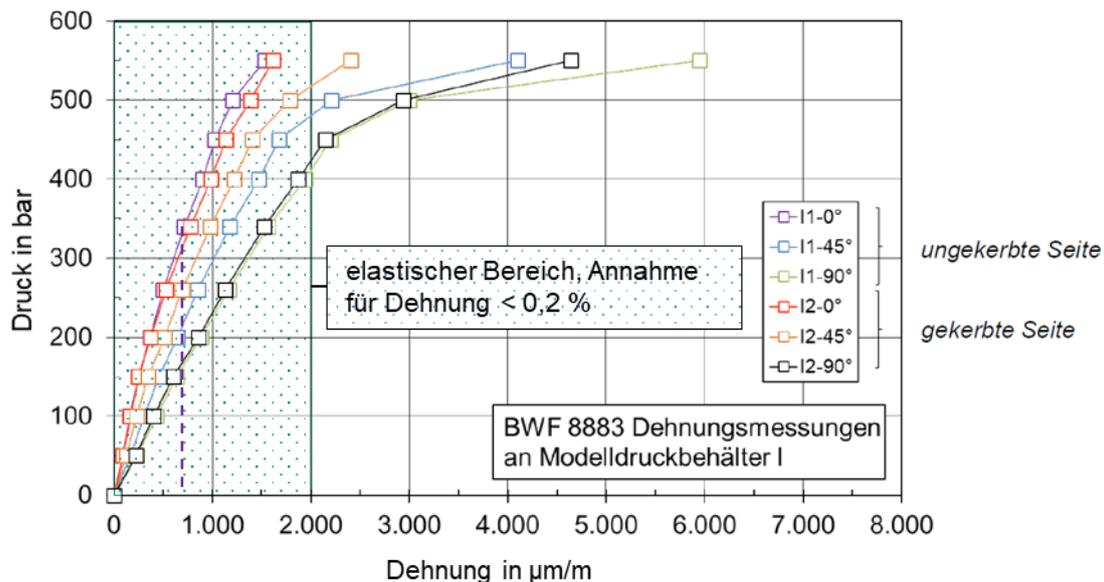


Abbildung 85: Bauteilfließkurve anhand des Prüfdrucks und der gemessenen Dehnung (Probe I)

Folglich kann eine Sollbruchstelle gegen Überbelastung ohne Nachbearbeitungsaufwand unter Erfüllung der Festigkeitsnachweise auf einem additiv hergestellten Druckbehälter appliziert werden. Inhalt zukünftiger Vorhaben könnte die Untersuchung der Provokation eines zum Versagen führenden Anrisses unter zyklischer Belastung an der außenliegenden Bauteiloberfläche sein. Hierdurch ließe sich die Funktionalität für zyklische Belastungen überprüfen und Betriebskontrollen an der festgelegten Bauteilstelle durch eine einzelne zerstörungsfreie Eindringprüfung nach Norm ermöglichen. Zur weiteren Untersuchung der Anisotropie insbesondere im Fließverhalten additiver Erzeugnisse wird vorgeschlagen die Versuche am Modelldruckbehälter auszuweiten und dabei die volle Dehnung bis zum Bruch aufzuzeichnen. Dazu werden entweder andere DMS (obere Grenze Messbereich) oder eine angepasste Probengeometrie notwendig.

### 5.5.2 Demonstrator Wärmetauscher

Während der pbA-Sitzung und im bilateralen Gespräch mit der Firma Linde wird als Demonstrator ein zwei Phasen Wärmetauscher mit statischem Druck zwischen 2 und 6 MPa im Temperaturbereich von  $-196$  bis  $40\text{ °C}$  festgelegt. Nachweise für besondere Belastungen werden nicht geführt. Der Demonstrator soll insbesondere den Umgang mit Geometrien aus der Norm DIN EN 13445-3 mit anisotropen Werkstoffeigenschaften als auch die Umsetzung komplexer Strukturen veranschaulichen. Die maximale Bauteilgröße wird durch das verfügbare Fertigungssystem EOS M290 bestimmt. Tabelle 8 stellt die Anforderungen zusammen.

Tabelle 8: Anforderungsliste an den Projektdemonstrator

	Nr.	Anforderung	Spezifikation	Detail
<b>Geometrie</b>	1.1	Maximale Höhe	200	mm
	1.2	Durchmesser / Länge	200	mm
	1.3	Minimale Wandstärke	1	mm
	1.4	Maximaler Überhangwinkel	45	°
	1.5	Bauteilzahl	1	-
	1.6	Strömungsanschluss, Di	10	mm
	1.7	Aufstellung	Sockel	-
	1.8	Außengeometrie	DIN EN 13445-3	-
	1.9	Innengeometrie	frei	-
<b>Funktion</b>	2.1	Wärmeaustausch	maximal	-
	2.2	Phasentrennung	ja	-
	2.3	Strömungswiderstand	minimal	-
	2.4	Innendruck 1	60	bar
	2.5	Innendruck 2	20	bar
	2.6	Temperatur minimal	-196	°C
	2.7	Temperatur minimal	40	°C
	2.8	Lasthäufigkeit	< 500	-
<b>System</b>	3.1	Werkstoff	1.4404	-
	3.2	Fertigungsmethode	PBF-LB/M	-
	3.3	Parametersatz	IGCV 1.0	-
	3.4	Arbeitsanweisung	IGCV 2020.1	-
	3.5	Bauplattformmaterial	C45	-

Druckbehälter folgen üblicherweise einer runden Form, um eine homogene Spannungsverteilung infolge des Innendrucks und ein günstiges Verhältnis aus Materialeinsatz und Behältervolumen zu erreichen. Eine ideale Form wäre eine Kugel, welche allerdings hohe Herausforderungen bzw. Kosten in der konventionellen Fertigung bedeutet. Gleiches gilt für die Additive Fertigung, da ein großer Bereich der Hohlkugeloberseite einen Überhangwinkel größer des maximal möglichen Winkels aufweist und angepasst werden müsste, wenn davon ausgegangen wird, dass Stützstrukturen innerhalb des Behälters nicht zulässig sind (Abbildung 86).

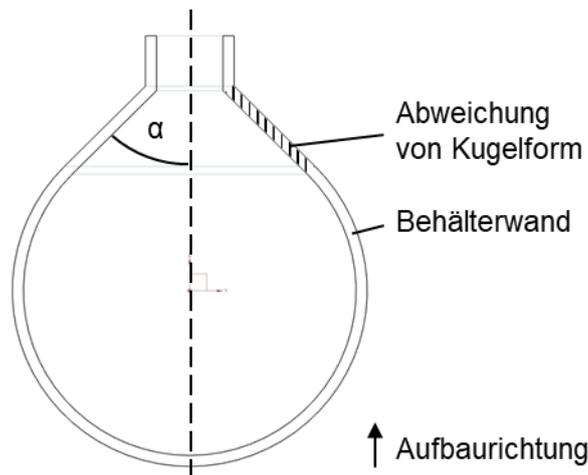


Abbildung 86: Beispielbehältnis für Kugelform und Einhaltung der AM Überhangwinkelrestriktion im Inneren (Neigungswinkel  $\alpha$ )

Daher und weil sich an der Behältergeometrie das Vorgehen „Design-by-Formula mittels geometriemerkmalsspezifischer Kennwerte“ (AP 5) zur Berücksichtigung anisotroper Werkstoffeigenschaften veranschaulichen lässt, wird auf konventionelle Geometrien aus der EN 13445-3 zurückgegriffen. Die Einhaltung der AM-Überhangwinkelrestriktion von  $45^\circ$  reduziert die verfügbaren Geometrien für eine Fertigung ohne konstruktive Änderungen oder zusätzliches Stützmaterial deutlich. Aus einer Bewertung dieser Strukturen resultiert eine stehende Zylinderbauweise. Der Deckel wird als Kegelschale mit Mittellinienversatz und  $45^\circ$  Neigung ausgeführt, wodurch vier Medienanschlüsse umsetzbar sind. Die Unterseite wird als Halbkugelboden ausgeführt und mit einem Flansch zum sicheren Stand und der Montage kombiniert. Die resultierende Behältergeometrie ist in Abbildung 87 dargestellt. Für die Auslegung und Konstruktion resultieren die folgenden Teilaufgaben:

- Berechnung der Behälterwandstärke
- Auswahl und Auslegung der Innenstruktur für den Wärmetausch
- Prüfmöglichkeiten

#### Berechnung der Behälterwandstärke

Der Normentwurf DIN/TS 17026 schlägt für AM vier Auslegungsklassen vor. Das jeweilige Gerät wird darin vor der Auslegung eingruppiert. Die Klassen definieren den Qualitätsfaktor  $F_{DC}$ , welcher zur Ermittlung der Berechnungsnennspannung  $f_{Rr}$  mit dem Bezugswert  $R_r$  multipliziert wird. Je kleiner der Sicherheitsbeiwert ist, desto geringer ist die Berechnungsnennspannung und desto höher die Sicherheit. Die Behälterwandstärke steigt mit sinkender Berechnungsnennspannung. Weiter werden für jede Klasse Anforderungen an die Bauteilprüfung definiert, deren Aufwand mit sinkendem Qualitätsfaktor (höhere Sicherheit) sinkt [35]. Im aktuellen Entwurf der DIN/TS 17026:2020-10 [35] ist ein Qualitätsfaktor von 1 als „nicht zulässig“ ausgeschlossen. Das bedeutet, die Wandstärken additiv hergestellter Bauteile werden tendenziell größere Werte besitzen müssen als baugleiche, konventionell gefertigte Bauteile. Dem Entgegenwirken kann ein höherer Bezugswert für additiv gefertigtes Material durch z.B. eine höhere Streckgrenze oder Zugfestigkeit. Für die Berechnung wird der Demonstrator in

die Klasse DC 2 eingeteilt und damit  $F_{DC} = 0,85$  festgelegt. Für alle Klassen sind zusätzlich zerstörende Prüfungen notwendig sowie die Sichtprüfung aller Bauteile. Zusätzlich wird mit DC 2 eine 100 % Prüfung durch a) die Kombination aus Röntgen- oder Ultraschall und Magnetpulver- oder Eindringprüfung oder aber b) Computertomografie festgelegt. Die zerstörenden Prüflinge sind beschrieben als je 1 Zugprüfung bei Raum- und Einsatztemperatur (DIN EN ISO 6892 [42]) sowie 3 Kerbschlagarbeitsproben (DIN EN ISO 148-1 [79]) für die Einsatztemperatur mit den geringsten Werten. Diese sind im schwächsten Bauraumbereich anzuordnen und in der schwächsten Raumrichtung (Anisotropie) zu prüfen. Zusätzlich wird ein Prüfling für einen Test gegen interkristalline Korrosion (DIN EN ISO 3651-2 [80]) und zum Nachweis der chemischen Zusammensetzung (CEN/TR 10261) gefordert. Der Schweißnahtfaktor wird mit 1 gleichgesetzt, weil es sich um ein eigenständiges urformendes Fertigungsverfahren (DIN 8580:2020-01 [6]) handelt, welches die Werkstoffeigenschaften erzeugt die durch die Werkstoffspezifikation bzw. das Abnahmeprüfzeugnis festgelegt sind und keine typische Fügegeometrie (Fügezone) entsteht, die durch den Schweißnahtfaktor berücksichtigt wird.



Abbildung 87: Fotografie der Wärmetauscher-Außengeometrie im Halbschnitt mit ausgegrauter Innenstruktur

Für die Ermittlung der Behälterwandstärke sind nun mehrere Vorgehensweisen wie in Abschnitt 5.4.1 dargestellt möglich. Einerseits können Klassen von Geometrien, bei denen sich AM Werkstoffeigenschaften unterscheiden, identifiziert und mit zusätzlichen Sicherheiten beaufschlagt werden. Dadurch wird es möglich, gängige Vorgehensweisen zu übernehmen und anschließend das Bauteil verfahrensabhängig zu entwickeln / zu korrigieren. Mögliche Klassen

sind z.B. Wandstärken, Neigungswinkel, Orientierungen der größten Hauptspannungskomponente relativ zur Aufbaurichtung und Klassen für erhöhte Eigenspannungen oder Verzugswahrscheinlichkeiten.

Andererseits können bestehende Auslegungsvorgehensweisen abgeändert werden. Dies wird am Wärmetauscher umgesetzt, in dem die einzelnen Wege für die Wandstärkenberechnung angepasst werden. Dazu wird im Beispiel der Bezugswert der Berechnungsgrundlage winkelabhängig ausgewählt. Typische Bezugswerte sind die Dehngrenzen  $R_{p0,2}$  und  $R_{p1,0}$  oder die Zugfestigkeit  $R_m$ . Vorgeschlagen wird diese Vorgehensweise, weil infolge der Innendruckbelastung eine Zugspannung in der Behälterwand wirkt. Die Hauptspannungskomponenten sind folgend um den Aufbauwinkel zur Aufbaurichtung geneigt. Am Beispiel der Krempe an der Bauteiloberseite berechnet sich so die Wandstärke  $e$  mit der vom Neigungswinkel  $N$  abhängigen Berechnungsnennspannung  $f(N)$ . Die Gleichungen folgen DIN EN 13445-3 Abschnitt 6.5 für austenitische Stähle und Gleichung (7.6-2) für Kegelschalen mit zusätzlich (rot markiert) winkelabhängigen Festigkeitswerten. Damit ist die Aufbaurichtung (Neigung  $N$ ) der Behälterwand berücksichtigt.

$$e_{Kegel} = \frac{P \cdot D_i}{(2f(N) \cdot z - P) \cdot \cos(\alpha)}$$

$$f(N) = \max \left[ \frac{R_{p1,0;T;N}}{1,5}; \min \left( \frac{R_{p1,0;T;N}}{1,2}; \frac{R_{m;T;N}}{3} \right) \right] \text{ mit } T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Weiter muss die gültige Raumrichtung bzw. Ausrichtung ( $a$ ) ausgewählt werden (Abbildung 6). Wie in AP 5 beschrieben, wird dafür entweder die schwächere Raumrichtung angenommen (meist stehend) oder es wird ein Vergleich der Hauptspannungskomponenten mit der Ausrichtung angestellt (Abbildung 59). Hier ist die mit Abstand größte Hauptspannungskomponente tangential ausgerichtet, weshalb vorgeschlagen wird, die Festigkeitswerte der horizontalen ausgerichteten Zugproben aus dem WOrM-Modell zu verwenden. Gleiches gilt für die aufrechte Zylinderwand. Die tangentielle Hauptspannungskomponente entspricht hier dem doppelten der axialen Spannung (Kesselformel). Für die Zylinder- sowie die Kegelwand ist der Neigungswinkel sowie die Hauptspannungsausrichtung konstant mit der Bauteilhöhe und kann direkt durch einsetzen der Wertepaare berechnet werden. Gewölbte Bauteilbereiche mit veränderlichen Aufbauwinkeln (z.B. Kugelboden) werden in Segmente unterteilt oder wie durchgeführt mathematisch beschrieben. Dazu wurden die entsprechenden Formeln aus Kapitel 8.7 der DIN EN 13445-3 in MATLAB® R2021a (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA) übertragen. Ein Skript wurde erstellt, welches die Werkstoffkennwerte aus AP 2 für alle dazwischen befindlichen Winkel interpoliert und derart für jeden Punkt der Kugelschale eine Wandstärke berechnet. Anschließend wird die erzeugte Geometrie in die CAD Umgebung Siemens NX (Siemens Digital Industries Software Inc., Plano, Texas, USA) exportiert und für die Konstruktion verwendet. In Abbildung 88 ist die im Winkel zur Aufbaurichtung variierende Wandstärke blau dargestellt.

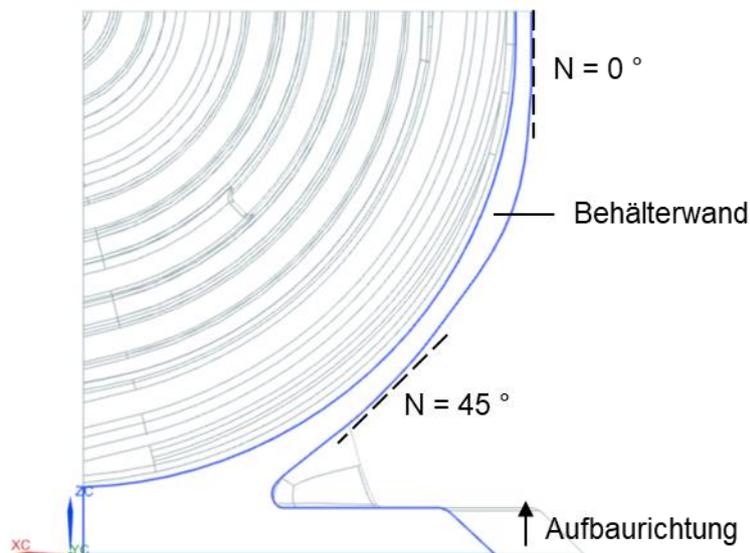


Abbildung 88: CAD-Darstellung der in Aufbaurichtung variierenden Wandstärke am Behälterkugelboden infolge ( $N /$ ) neigungsabhängiger Auslegungskenngrößen

### Auswahl und Auslegung der Innenstruktur für den Wärmetauscher

Nachdem die Außengeometrie mit den angepassten normativen Berechnungsvorschriften dimensioniert ist, wird die Maximierung des Wärmetauschs gelöst. Zur Lösungssuche wird die Bionik Datenbank asknature.com (Biomimicry Institute, Missoula, Montana, USA) verwendet sowie eine Recherche wissenschaftlicher Veröffentlichungen durchgeführt. 20 bionische Vorbilder konnten identifiziert werden, von denen die Venenstruktur am Hals der Hummel sowie die Anordnung der Arterien und Venen bei der Zunge des Grauwals als am vielversprechendsten erachtet werden. Das Prinzip bei der Hummel basiert auf Verwirbelungen im Strömungsverlauf infolge von Krümmungen der Kanalgeometrie. Der Grauwal besitzt eine Arterie mit großem Durchmesser die im Gegenstromprinzip von vielen kleinen Venen umgeben ist. [81] vergleichen verschiedene Kanalquerschnitte anhand der resultierenden Übertragerflächen und dem Druckabfall mittels Strömungssimulationen. Dabei ergibt sich für die sogenannte Sierpinski-Kurve das beste Verhältnis aus hohem Wärmeübertrag zu geringem Druckverlust und ähnelt dabei der Anordnung beim Grauwal, indem mehrere größere zentrale Kanäle umgeben sind von daran angepassten Volumina. Abbildung 89 zeigt die Umsetzung dieser Prinzipien in der Innenstruktur. Abbildung 90 zeigt die Anbindung der Ein- und Auslässe an die jeweiligen Kanalquerschnitte. In mehreren Schritten wurden diese durch tangential angebundene Freiformflächen verbunden, um die Kontrolle über die verbindende Kanalform zu erhöhen. Dazu wurden jeweils Skizzen aus zwei anzubindenden Wandquerschnitten abgeleitet und durch zur skizzenebene senkrechte Führungskurven verbunden. Diese Konstruktionsmethode zur Verbindung unterschiedlicher Kanalquerschnitte miteinander ist je nach Komplexität des Bauteils und der Kanalform sehr zeitaufwendig und nicht oder nur schwer parametrisierbar. Das heißt Änderungen der Wandstärke, der Kanalanzahl oder des Kanalquerschnittes führen zu Modellierungsfehlern die manuell behoben werden müssen. Während der Projektlaufzeit konnte keine Software identifiziert werden, die eine Parametrisierung ermöglicht hätte. Bei der Umsetzung ist insbesondere die Kontrolle der Wandstärke essentiell, da es zu ungewollten Verjüngungen zwischen den Innen- und Außenseiten kommen kann. Kontrolliert wird die

Wandstärke durch Messungen im CAD an verschiedenen Stellen (circa 30). Einige CAD-Tools bieten auch die Möglichkeit der Berechnung der Wandstärke für alle Bereiche im Bauteil, wodurch eine schnelle und vollständige Überprüfung möglich wird. Der gefertigte Wärmetauscher ist in Abbildung 91 dargestellt.

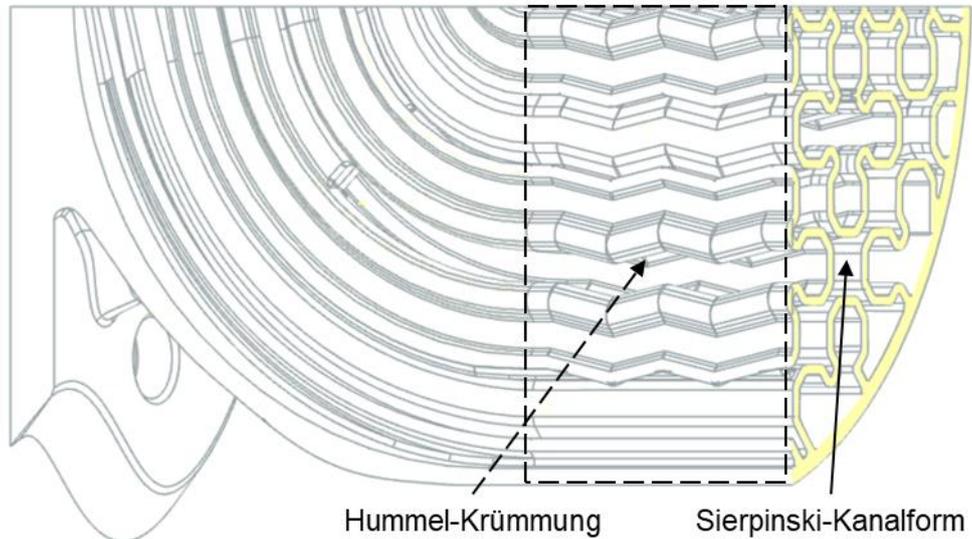


Abbildung 89: CAD-Darstellung der Kanalgeometrien im Schnitt

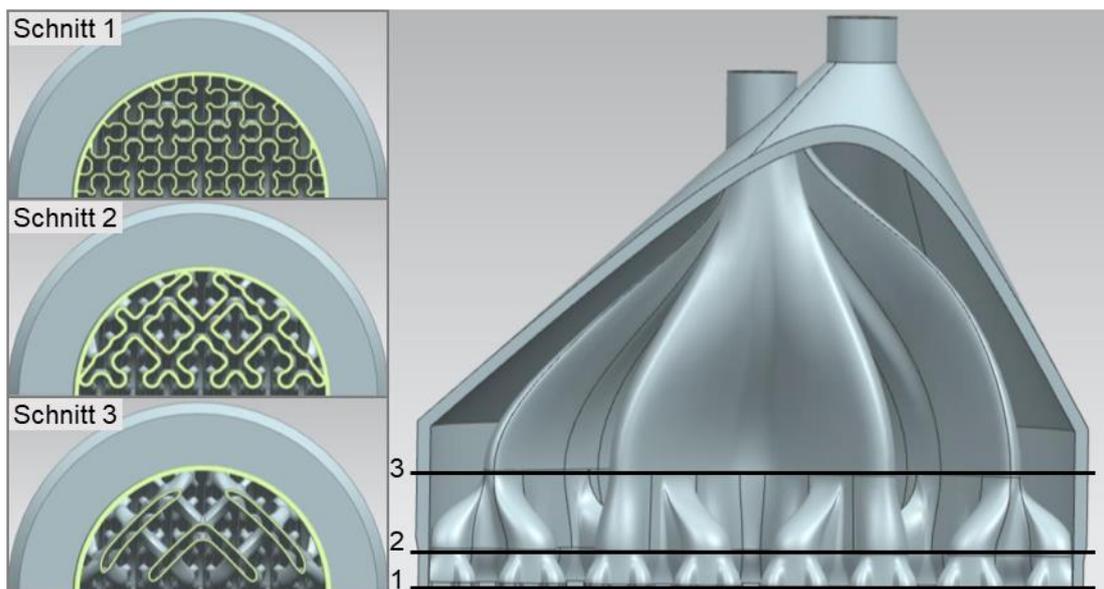


Abbildung 90: CAD-Darstellung der schrittweisen Verbindung komplexer Kanalquerschnitte



Abbildung 91: Fotografie Wärmetauscher-Demonstrator: Seitenansicht (links), Draufsicht (mitte), Halbschnitt (rechts)

### 5.5.3 Qualifizierungsmethodik

Die Qualifizierung eines im Laserstrahlschmelzen hergestellten Druckbehältnisses birgt andere Herausforderungen als bei der klassischen Fertigung. Ein wesentlicher Unterschied ist die Tatsache, dass der Fertiger durch das vollständige Umschmelzen des pulverförmigen Ausgangswerkstoffs zum Werkstoffhersteller wird und die Einhaltung der Werkstoffeigenschaften gewährleisten muss. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass die Geometrie sowie die Raumrichtung diese Eigenschaften beeinflussen, weshalb das Erzeugnis inhomogene Eigenschaften aufweisen kann. Diese sind stark von der Belichtungsstrategie (Hatching, Streckenenergie) der Maschine abhängig und können zudem durch statistische Prozessunregelmäßigkeiten beeinflusst sein. Es folgt, dass die der Bauteilbelastung entsprechenden Eigenschaften für alle auftretenden Geometriefeatures im Fertigungssystem bekannt bzw. nachgewiesen sein müssen. Umgekehrt bedeutet es, dass nur Geometrien deren Eigenschaften für das Fertigungssystem bekannt sind auch ohne spezifische Prüfung gefertigt werden können, um sicher zu sein, dass die zugrunde gelegten Bezugswerte erfüllt werden.

Im Folgenden werden recherchierte zerstörungsfreie Prüfmöglichkeiten tabellarisch aufgelistet die sich grundsätzlich für additiv gefertigte Bauteile eignen. Anschließend wird auf Maßnahmen eingegangen anhand derer eine Qualifizierung der Additiven Fertigung zur Herstellung verfahrenstechnische Druckgeräte möglich wird.

Die gängigen zerstörungsfreien Prüfungen gibt die Norm DIN EN ISO 17635 [82] wieder. Dabei ist insbesondere die Durchstrahlungsprüfung hervorzuheben, da nur sie die Möglichkeit bietet Fehlstellen an allen Bereichen innerhalb von komplexen Bauteilen aufzudecken. Dabei wird die Größe auffindbarer Fehlstellen limitiert von der Bauteilgröße, der kumulierten Wandstärke sowie der verfügbaren Durchstrahlungsleistung des Prüfgerätes. Es sind nur dichte basierte Fehler wie Risse oder Poren detektierbar. Abweichungen bspw. in der chemischen Zusammensetzung oder im Gefüge lassen sich nicht direkt und zerstörungsfrei detektieren. Oberflä-

chenfehler sowie Pulvernester in Kanälen lassen sich durch Sichtprüfungen mit Videoendoskopen realisieren, sofern dies die Messgerätgröße und –auflösung zulassen. Die anderen Prüfmöglichkeiten eignen sich dagegen für die Kontrolle der Behälteraußenhülle bzw. Bauteilaußenseiten. Alle dargestellten sowie zerstörenden Prüfverfahren können für Referenzmessungen genutzt werden, welche für die additive Fertigung eine gesteigerte Bedeutung zukommt. Dabei wird nicht ein Bauteil direkt geprüft, sondern ein baugleiches oder ein Referenzkörper aus demselben, einem gleichen oder einem anderen Los. Die indirekte Prüfung macht eine Betrachtung bzw. einen Nachweis der Übertragbarkeit der Referenz auf das eigentlich zu prüfende Werkstück notwendig.

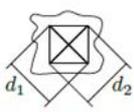
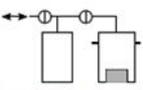
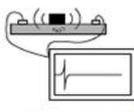
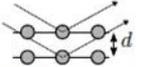
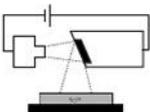
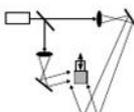
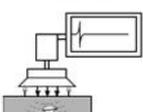
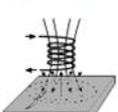
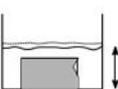
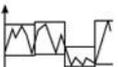
DIN EN ISO 17635:2017-04 (2017)		zusätzlich aus Ilschner & Singer (2016)		weitere für PBF-LB/M	
Prinzip	Quelle	Prinzip	Quelle	Prinzip	Quelle
 Eindringprüfung	verändert nach Ilschner & Singer (2016, S. 424)	 Härteprüfung	verändert nach DIN EN ISO 6507-1:2018-07 (2018, S. 8)	 Gaspyknometer	verändert nach Tamari & Aguilar-Chávez (2005, S. 2)
 Magnetpulver	verändert nach Ilschner & Singer (2016, S. 425)	 Schallemission	verändert nach Grosse (1996, S. 5)	 XRD	verändert nach Spieß et al. (2019, S. 90)
 Durchstrahlung	verändert nach Ilschner & Singer (2016, S. 428)	 Holographie	verändert nach Ilschner & Singer (2016, S. 437)	 Prüfkörper	verändert nach Taylor et al. (2021, S. 10)
 Ultraschall	verändert nach Ilschner & Singer (2016, S. 433)			 Statistisch	verändert nach Spierings et al. (2011, S. 382)
 Wirbelstrom	verändert nach Xie et al. (2020, S. 2)			 Verdrängung	verändert nach Spierings et al. (2011, S. 381)
 Sichtprüfung	verändert nach DIN EN ISO 17637:2017-04 (2017, S. 5)			 Rauheit	verändert nach Fritz (2015, S. 346)

Abbildung 92: Rechercheergebnis zerstörungsfreier Prüfmethoden mit Eignung für die Additive Fertigung [83–92]

Während Wege zur Qualifizierung eines Additiven Fertigungssystem industriell noch selten beschriftet und normativ noch unvollständig beschrieben sind, zeigt Abbildung 93 die Teilschritte einer möglichen Vorgehensweise, welche im Folgenden beschrieben werden.

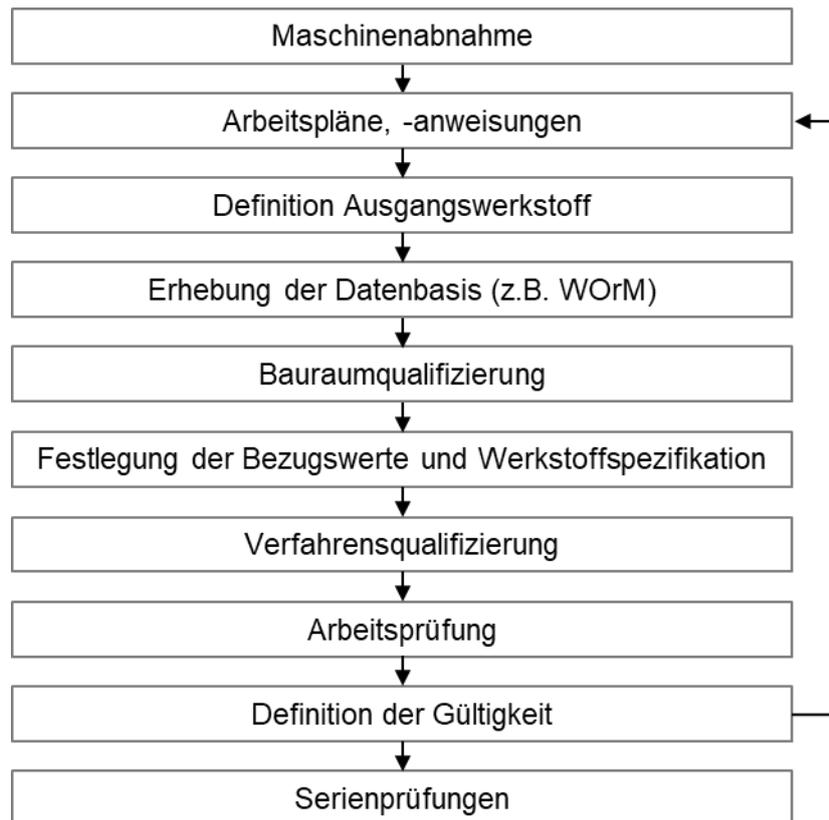


Abbildung 93: Mögliches Ablaufschema der Qualifizierung eines AM-Systems

### Maschinenabnahme, Arbeitsanweisungen, Ausgangswerkstoff

Die Technische Spezifikation DIN/TS 17026 verweist in Anhang A für Pulverbettverfahren auf die zurückgezogene DIN 35224 „Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau – Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlmaschinen zur additiven Fertigung“ sowie das Nachfolgedokument DIN EN ISO/ASTM 52941 „Additive Fertigung - Systemleistung und Betriebssicherheit - Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlanlagen für metallische Werkstoffe in Luft- und Raumfahrtanwendungen“ [93]. Explizit genannt werden durch die DIN/TS 17026 folgende Nachweise:

- Laserleistungsstabilität nach DIN EN ISO 11554 [94]
- Laserstrahlgeometrie z. B. nach DIN EN ISO 11146 [95]
- geometrische Genauigkeit z. B. nach DIN EN ISO 22827-2 [96]
- Eignung der Maschine für das zu verarbeitende Material (Aufziehversuche, Arbeitsproben)

Zusätzlich ist allen Bestimmungen des Maschinenherstellers und der eigenen Organisation für die Maschinenabnahme Rechnung zu tragen. Diese Messungen werden teilweise bei der Bauraumqualifizierung wiederholt. Eine Kombination der Prüfpläne erscheint sinnvoll.

Die Autoren sind der Auffassung, dass mindestens mit Beginn von Untersuchungen mit Pulverwerkstoff sämtliche Arbeitsanweisungen im Umgang mit dem System festzulegen und zu befolgen sind. Damit soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse bei der Erhebung der Datenbasis

auf die spätere Serienfertigung gewährleistet werden. Dies beinhaltet auch den Ablauf der Datenvorbereitung zum Beispiel nach DIN EN ISO/ASTM 52911 [97] und die Baustrategie. Das gleiche gilt für Anforderungen an den Pulverwerkstoff und bedeutet, dass mit der Durchführung von Aufziehversuchen gleichzeitig der verwendete Werkstoff charakterisiert und kontrolliert sein sollte. Tatsächliche Aufbauversuche mit Pulverwerkstoff werden in den folgenden Teilschritten aufgeführt.

Als Anforderungen an den Ausgangswerkstoff werden durch die DIN/TS 17026 mindestens die chemische Zusammensetzung sowie die Partikelgrößenverteilung bestimmt. Zusätzlich ist die Untersuchung der Pulvermorphologie sowie der Pulverdichte empfohlen, weil einerseits die Partikelform die Aufziehfähigkeit beeinflusst und andererseits Porosität innerhalb von Partikeln oft nicht vollständig durch den Prozess aufgehoben wird. Abbildung 8 zeigt eine typische Aufnahme von Pulverwerkstoff 1.4404 mittels Rasterelektronenmikroskopie. Hier sind wenige Agglomerate, eine glatte Partikeloberfläche sowie eine sphärische Form erkennbar. Weiter wird eine Kontrolle der Pulverfeuchte empfohlen. Je nach Werkstoffanforderung ist geschultes Personal in der Lage durch eine Sichtkontrolle Pulverfeuchte zu erkennen, die die Fließfähigkeit beeinträchtigt. Außerdem können EDX-Aufnahmen oder Messungen mit einer Feuchte-sonde Verwendung finden. In jedem Fall wird die Lagerung und der Transport in luftdicht verschlossenen Behältern unter möglichst konstanten Temperaturbedingungen sowie die Verwendung von Trocknungsmittel-Beuteln empfohlen. Hier ist bei der Handhabung auf eine regelmäßige Erneuerung zu achten, wenn die Behälter geöffnet werden.

Für die Wiederverwendung des Pulverwerkstoffs eines Bauzyklus muss eine entsprechende Wiederaufbereitungsstrategie festgelegt und die Gültigkeit der Datenbasis sowie Verfahrensprüfung nachgewiesen sein. Mindestens ist empfohlen grobe Schweißrückstände z.B. durch Sieben auszusortieren. Für typische Partikelgrößenverteilungen bis  $D_{90} = 63 \mu\text{m}$  eignen sich bspw. Siebe mit einer Maschenweite von 63 bis  $72 \mu\text{m}$ . Außerdem sollte gebrauchtem Pulver ein Mindestanteil Neupulver zugeführt werden (bspw. 20 %). Hierbei ist insbesondere auf die Expertise des Pulverwerkstoffherstellers zu achten.

Wird der Pulverwerkstoff, welcher zur Erhebung der Datenbasis und der Verfahrensprüfung verwendet wird, umfassend charakterisiert, so kann der Gültigkeitsbereich klar beschrieben und die Wareneingangskontrolle im Serienbetrieb erleichtert werden.

### Erhebung der Datenbasis

Die Erhebung der Datenbasis ist anhand der festgelegten Arbeitsanweisungen, dem definierten Ausgangswerkstoff und durch geschultes Personal an der abgenommenen Maschine durchzuführen, um eine Übertragbarkeit auf die Serienfertigung zu gewährleisten.

Durch die Datenbasis werden mechanisch-technologische Kennwerte und geometrische Abbildungsgenauigkeiten erhoben. Dabei werden mindestens die Eigenschaften der schwächsten Raumrichtung gefunden. Proben mit unterschiedlichen Ausrichtungen, Formen und Abmessungen erlauben die Untersuchung von geometrischen Einflüssen und Besonderheiten der Maschine. DIN EN ISO/ASTM 52902 [98] liefert beispielhaft Proben zur geometrischen

Leistungsbewertung. Mit diesen sind unter anderen Wandstärken, Bohrungen, Stifte und Radien überprüfbar. Zu beachten ist, dass bei einer taktilen Vermessung die Oberflächenrauheit eingeschlossen wird. Das bedeutet, die Messung einer Wandstärke entspricht dem Abstand von Erhebung zu Erhebung. Die tatsächlich tragende Wandstärke entspricht dagegen der kleinsten Dicke (Senke zu Senke). Aus den Untersuchungen mittels Lichtmikroskopie zur effektiven minimalen Wandstärke (s. 5.3.2 Mechanische Kennwerte aus Zugversuchen) wird deutlich, dass die geometrische Genauigkeit zusätzlich für verschiedene Neigungen und (kleine) Wandstärken kontrolliert werden sollte. Dabei ist insbesondere für Druckbehälterwände die Ausprägung der effektiv tragenden Wandstärke infolge von Oberflächenrauheit und Porosität relevant. Mit dem als „WOrM“ bezeichneten Vorgehen lassen sich notwendige Korrekturen für die Wandstärke für Winkel- und Wandstärkeklassen anhand von Lichtmikroskopie bestimmen.

Für die mechanisch-technologischen Kennwerte schreibt die DIN/TS 17026 eine Mindestanzahl von Prüflingen vor (Zugversuch, Kerbschlagarbeit). Diese müssen außerdem mindestens aus fünf Bauzyklen stammen, wodurch die Kontinuität der Bauteilqualität geprüft wird. Die Autoren schlagen außerdem die Angleichung der Bauraumausnutzung (Auslastungsgrad) der Bauzyklen an die erwartete Serienfertigung vor. Damit soll sichergestellt werden, dass sich die Temperaturhaushalte infolge der Schichtzeiten möglichst ähnlich sind.

Analog der Auslegungsklassen DC 1 - 4 (ein hoher Sicherheitsaufschlag verringert den Prüfaufwand) empfehlen die Autoren einen Einfluss des Umfangs der Datenbasis bzw. der Verfahrensprüfung auf die notwendigen Prüfaufwände und Sicherheitszuschläge. Wenn bspw. eine große (Probenanzahl) und vielfältige (Probendimensionen, Neigungswinkel, Anordnungen, Ausrichtungen, Bauraumauslastungen) Datenbasis existiert, dann könnten Sicherheitszuschläge und Prüfaufwände gesenkt werden unter der Voraussetzung, dass die Übertragbarkeit auf die Serienfertigung gegeben ist.

### Verfahrensprüfung

Die Verfahrensprüfung ist anhand der festgelegten Arbeitsanweisungen, dem definierten Ausgangswerkstoff und durch geschultes Personal durchzuführen, um eine Übertragbarkeit auf die Serienfertigung zu gewährleisten.

Nach DIN/TS 17026 beinhaltet die Verfahrensprüfung die Bauraum- und Verfahrensqualifizierung. Für die Bauraumqualifizierung wird das Baufeld schachbrettartig mit maximaler Kantenlänge von 150 mm eingeteilt und je Feld werden mindestens zwei Rundzugproben sowie drei Kerbschlagarbeitsproben (1 Satz) in der schwächsten Raumrichtung orientiert hergestellt und geprüft. Die Ermittlung der schwächsten Raumrichtung ist theoretisch mit der Erhebung der Datenbasis mit mindestens je zwei Prüflingen pro Orientierung bereits erfolgt. Aus Sicht der Projektbearbeitenden handelt es sich bei der beschriebenen Bauraumqualifizierung streng genommen um eine Untersuchung im Baufeld. Die Aufbauhöhe wird nicht berücksichtigt. Dennoch können hier Abweichungen infolge der Bauzeit (z.B. durch Verunreinigungen am optischen System oder Positioniergenauigkeiten am Plattformantrieb) oder des Abstands der Bearbeitungsebene zur Plattformheizung (Unterschiede bei der Vorwärmtemperatur) auftreten. Auch wenn im Projekt für den Werkstoff 1.4404 mit einer Vorwärmtemperatur von 80 °C

keine Unterschiede festgestellt werden konnten, sind insbesondere bei höheren Vorwärmtemperaturen diese nicht auszuschließen. Es wird daher empfohlen in Relation zu den zu fertigenden Serienbauteilen entsprechende Prüflinge mind. in der schwächsten Orientierung mit einem Versatz in Aufbaurichtung (Sockel) zu erzeugen und zu prüfen (Abbildung 94).

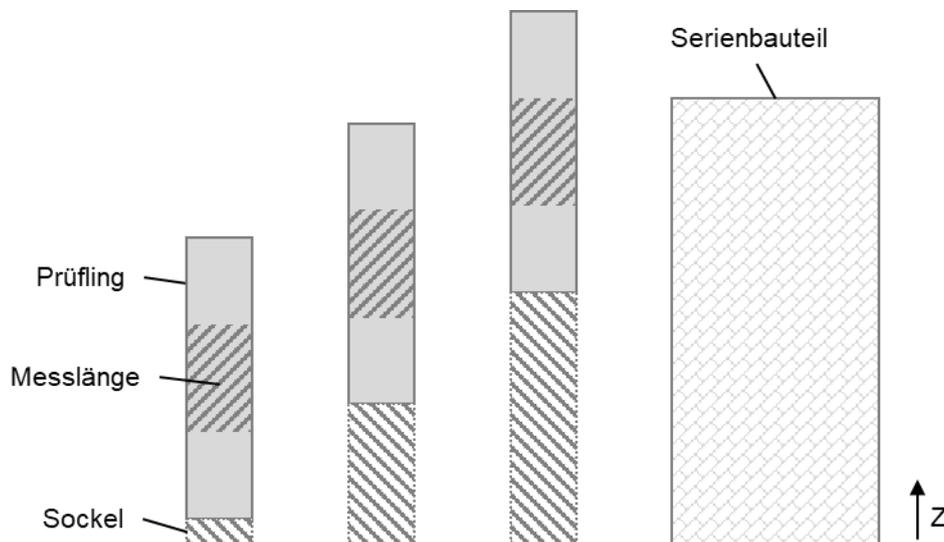


Abbildung 94: Schema Probenanordnung zur Baraumqualifizierung in Aufbaurichtung (Z)

Weiter verweist DIN/TS 17026 auf die ISO ASTM 52941, welche Methoden für die Untersuchung der Maschinengenauigkeit aufzeigt. Diese Messungen sind typischerweise bei der Maschinenabnahme notwendig und können baufeldbezogen (je Feld) für die Baraumqualifizierung wiederholt werden. Neben der Messung der Laserleistung und des Strahldurchmessers erachten die Projektbearbeitenden die Vermessung der Genauigkeit der Trajektorie sowie der Schweißgeschwindigkeit für sehr sinnvoll. Hierfür werden Bahnen im gesamten Baufeld ohne Pulverwerkstoff abgefahren, wodurch Markierungen resultieren die vermessen und mit dem Sollzustand verglichen werden. Aktuelle Maschen nutzen das sogenannte Skywriting, wodurch in steilen Umkehrpunkten kurze Pausenzeiten in der Laseremission resultieren. Wird die Laserinteraktion mit dem Werkstoff akustisch erfasst oder das TTL-Signal am Laser vermessen, so kann aus der zeitlichen und geometrischen Länge auf die tatsächliche Schweißgeschwindigkeit geschlossen werden. Abbildung 95 zeigt eine solche Vermessung mittels Körperschall gemessen am Bauplattformträger. Pegel im positiven Wertebereich zeigen den aktiven Schweißprozess an.

Weiter lassen sich Blindschweißnähte im Baufeld untersuchen um deren Stabilität und Geometrie zu überprüfen. Mit den häufig verwendeten F-Theta Optiken sollte die Schweißnahtgeometrie überall im Baufeld ähnlich ausgeprägt sein. Abbildung 96 zeigt Querschliffe an solchen Einzelspurversuchen an verschiedenen Stellen im Baufeld. Abschnitt 5.5.4 beschreibt unter anderem auch die Erzeugung artgleicher Einzelspuren im Fertigungsprozess.

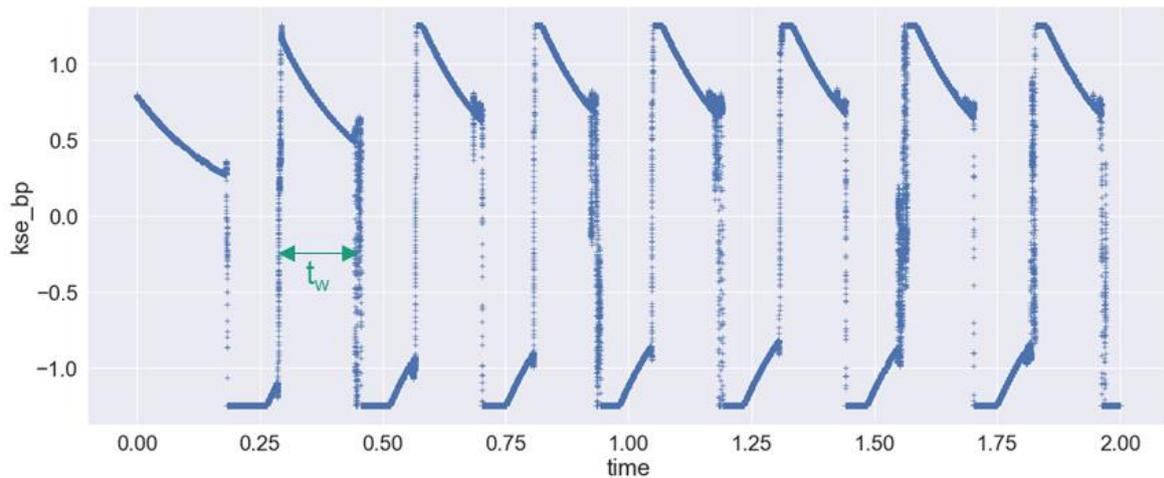


Abbildung 95: Zeitmessung einzelner Schweißbahnen  $t_w$  durch Körperschallsensorik gekoppelt mit der Bauplattform. Abtastfrequenz 50 kHz. Sensortyp M357B11 (PCB Piezotronics Inc., Depew, NY, USA)

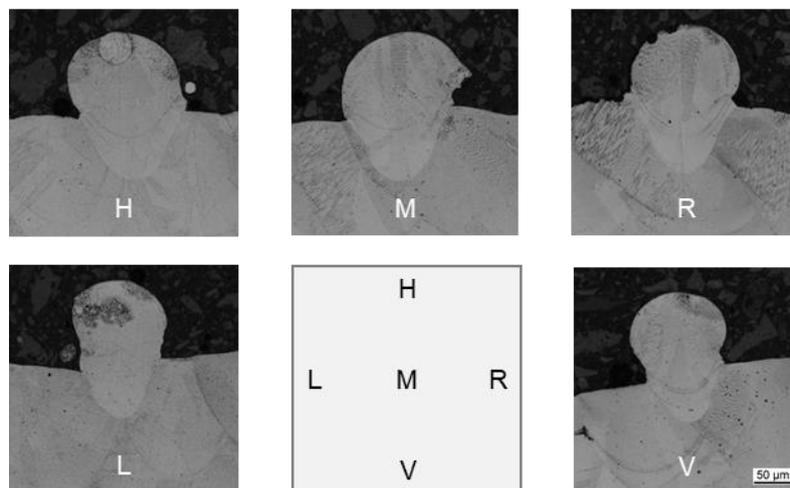


Abbildung 96: Querschliffe im AFM von Einzelspurversuchen an verschiedenen Positionen im Baufeld (Übersicht mittlere, untere Abbildung)

Die Verfahrensqualifizierung ist nach DIN/TS 17026 nicht vollständig beschrieben. Ihr Ziel ist, zusätzlich zur Prüfung von Normproben, die Überprüfung der Prozessfähigkeit von Geometrien, wie sie in Serienbauteilen vorkommen. Hierfür sind wieder alle verfügbaren zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen einsetzbar. Die Prozessfähigkeit aller auftretenden Geometrien ist insbesondere relevant für die Serienfertigung. Da komplexe Geometrien sensibel auf Prozessungenauigkeiten reagieren können, wird empfohlen ausgewählte Prüfungen während der Serie zu wiederholen. Unbekannte Geometrien sollten nicht beliebig einem qualifizierten Serienlos hinzugefügt werden. Unregelmäßigkeiten bei der Fertigung dieser können andere Bauteile beeinflussen. Abbildung 97 zeigt ausgewählte Musterbereiche des Wärmetauscher-Demonstrators. Dabei sind Geometrien mit besonderen Krümmungen, Überhängen, Verbindungen (Inselwachstum) und Regelstrukturen ausgewählt und in verschiedenen Ausrichtungen zur Beschichtungsrichtung gefertigt worden. Durch Sichtprüfung mit dem bloßen

Auge sowie Vermessung von Wandstärken, Radien und Oberflächenrauigkeiten im Lasermikroskop werden die Strukturen als fehlerfrei herstellbar geprüft. Zur Auswahl kritischer Strukturen sind neben dem Expertenwissen auch Softwaretools zur Aufbausimulation geeignet. Geometrische Kriterien zur Auswahl können sein:

- Häufige Regelstrukturen
- Wandstärkensprünge
- Sehr kleine Wände
- Komplizierte Freiformen und Krümmungen
- Inselwachstum und Kreuzungen von Wänden
- Große Neigungswinkel insb. entgegen der Beschichtungsrichtung
- Freie kritische Überhänge
- Starke Vergrößerung der belichteten Fläche in Aufbaurichtung

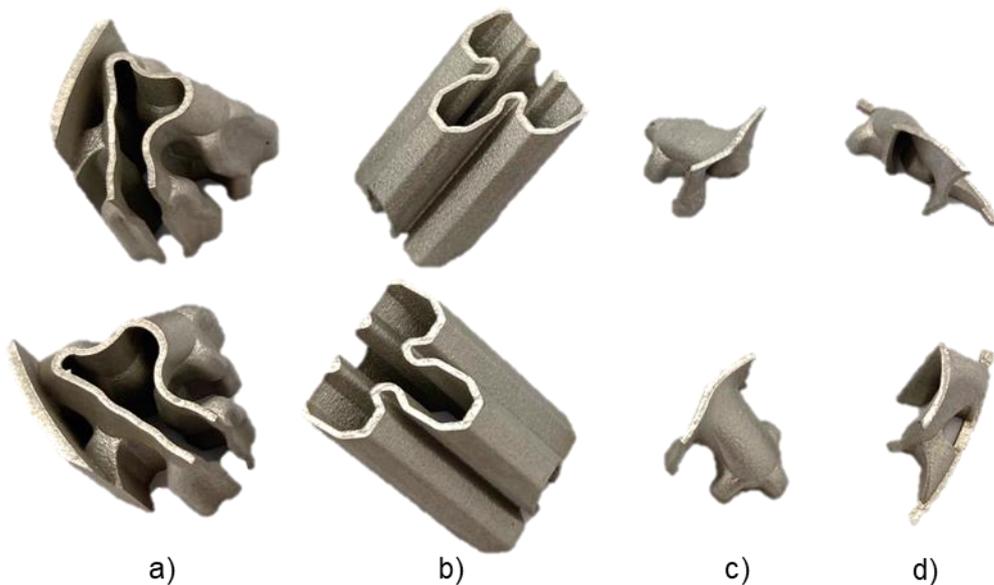


Abbildung 97: Fotografie gefertigter Bauteilausschnitte (a – d) zur Überprüfung der Herstellbarkeit. Doppelte Ausführung um 180 ° verdreht im Baufeld zur Kontrolle des Einflusses der Beschichter- und Schutzgasströmungsrichtung

Neben der Musterfertigung ausgewählter Bauteilbereiche kann es sinnvoll sein Bauteilbereiche in Lecktestprüfkörper zu überführen, um die Umsetzbarkeit abzusichern. Dabei sollten insbesondere filigrane oder überhängende Strukturen geprüft werden. Zur Umsetzung ist eine anschlussfähige geschlossene Geometrie nötig. Abbildung 98 zeigt eine solche Extraktion für die im Demonstrator verwendete Sierpinski-Struktur. Dabei befinden sich die Anschlussflächen in Aufbaurichtung an der Unterseite. Diese sollten bei der Datenvorbereitung offen durch Supportstrukturen an die Bauplattform angebunden werden, um das prozessnachgelagerte Entpulvern zu ermöglichen. Der Körper beinhaltet genau eine vollständige Sierpinski-Zelle. Diese wird durch gekrümmte Extrusionen mit einer kreisförmigen Geometrie verbunden. Bei

der Umsetzung wurde darauf geachtet, dass Neigungen zwischen 0 und 45 ° abgedeckt werden um eine hohe Gültigkeit der Prüfung zu gewährleisten.

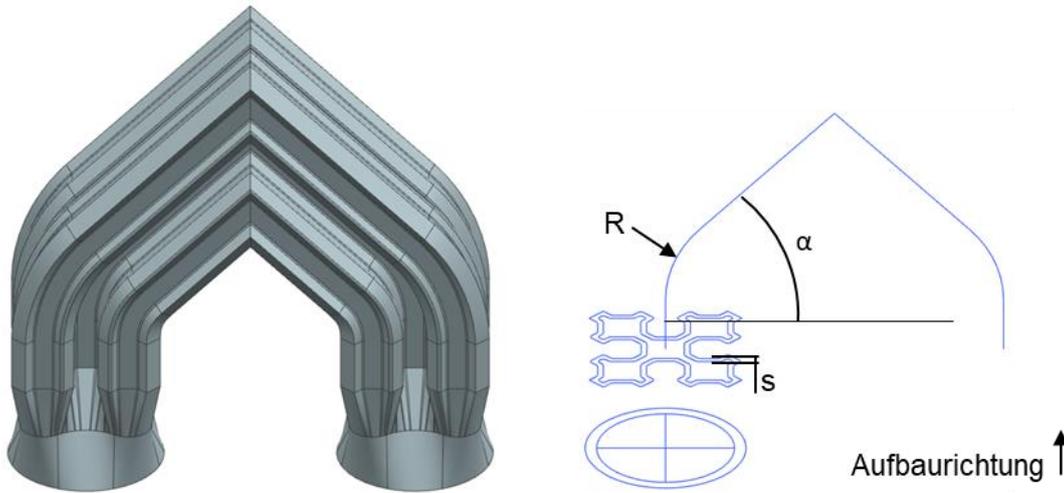


Abbildung 98: Beispielgeometrie zur Erstellung eines Leckageprüflings für eine komplexe Struktur (Sierpinski-Querschnitt zur Erhöhung der Oberfläche beim Wärmetausch)

An den vorgestellten Geometrien lassen sich weitere Prüfungen durchführen, um die sichere Realisierbarkeit abzusichern. Insbesondere können durch eine Eindringprüfung Delaminationen oder Oberflächenrisse erkannt werden. Insbesondere dünnwandige Bereiche die aufgrund von Erfahrungswissen oder Prozessaufbausimulationsergebnissen hohe Eigenspannungen erwarten lassen, sollten geprüft werden. Weiter können zerstörende Dichteschliffe oder Gaspyknometermessungen Auskunft über die tatsächliche Dichte von Strukturen liefern.

Abbildung 99 stellt fünf Bauzyklen vor mit denen eine Kombination aus Verfahrensqualifizierung und Erhebung einer sehr umfangreichen Datenbasis umgesetzt werden kann. Dabei werden **Flachzugproben** aufgrund der Ähnlichkeit zu Behälterwänden in verschiedenen Neigungen, Anordnungen, Wandstärken und Ausrichtungen gefertigt. Die Probendicken sollen sich an den Bauteilwandstärken orientieren und wie gebaut (as-built) geprüft werden. Vor der Prüfung kann die Rauigkeit sowie die tatsächliche Wandstärke ermittelt werden. Die in Kapitel 5.2.1. vorgestellten Probenverbände (Stacks) erlauben eine prozesssichere Fertigung der einzelnen Proben, eine einfache Probenextraktion und beinhalten je Stack dreimal drei Zugproben für drei Wandstärken und 18 Schliffproben in drei verschiedenen Aufbauhöhen (vgl. 5.2.1). Insgesamt beinhalten die fünf Fertigungszyklen 234 Flachzugproben. Die hohe Anzahl erlaubt die Extraktion einzelner Proben für weitere Versuche (z.B. Warmzugversuch, LCF-Versuch). Die **Schliffproben** lassen sich alternativ auch für Korrosionstests oder chemische Analysen verwenden. Insgesamt sind 78 **Kerbschlagarbeitsproben** mit einer Probengeometrie in zwei Ausrichtungen und drei Neigungswinkeln enthalten. Zu Baubeginn wird mittels Bearbeitungslaser und ohne Pulverwerkstoff eine **Trajektoriekontrolle** auf die Bauplattform gezeichnet, die nach dem Trennen der Proben vermessen werden kann. Der **Treppenstufenprüfkörper** folgt der Geometrie aus E DIN EN ISO/ASTM 52902:2022-01 Bild 4 und ermöglicht die Kontrolle der Genauigkeit in Aufbaurichtung insb. für Flächen und Kanten die sich zwischen dem Vielfachen der Sollschtstärke befinden. Mehrere gestapelte **Pulverbehälter** ermöglichen die

Kontrolle der Schüttdichte, Spratzerbildung und Pulvercharakterisierung. Außerdem wird ermöglicht den Pulverwerkstoffzustand innerhalb des Prozesses einzufrieren bzw. zu archivieren. Stellvertretend für **Referenzmuster** sowie in Vorbereitung auf eine indirekte Kontrolle der Serienfertigung durch Begleitproben ist der in Abschnitt 5.5.4 beschriebene Prüfkörper integriert. Dem gleich befindet sich ein **Lecktestprüfkörper** (vgl. Abbildung 98) zur visuellen (DIN EN 13018 [99]) sowie Dichtheits-Prüfung (DIN EN ISO 3651-2) in jedem Los. Durch die Anordnung der Proben in jedem der vier Quadranten sowie deren variierenden Positionierungen wird eine Vielzahl von Einflussfaktoren in die Erhebung der Datenbasis einbezogen und eine starke Absicherung der Prozessstatistik möglich. Die Rotation der Proben um die eigene Z-Achse ermöglicht Einflüsse durch die Schutzgasströmungs- und Beschichtungsrichtung einzubeziehen. Weiter entspricht die hohe Bauraumauslastung sehr wahrscheinlich dem Serienzustand, da durch hohe Baufeldausnutzungen tendenziell höhere Wirtschaftlichkeit erreichbar ist (Bauteilstückkosten). Ein Bauzyklus wird mit reduzierter Auslastung gefertigt und beinhaltet lediglich ein Mindestmaß an Proben. Hierdurch wird ein möglicher Einfluss infolge der kürzeren Zykluszeit kontrolliert. Eine hinreichend umfangreiche Datenbasis kann zur Festlegung der Bezugswerte verwendet und zur Berücksichtigung inhomogener Werkstoffzustände genutzt werden (vgl. Abschnitt 5.4.1.)

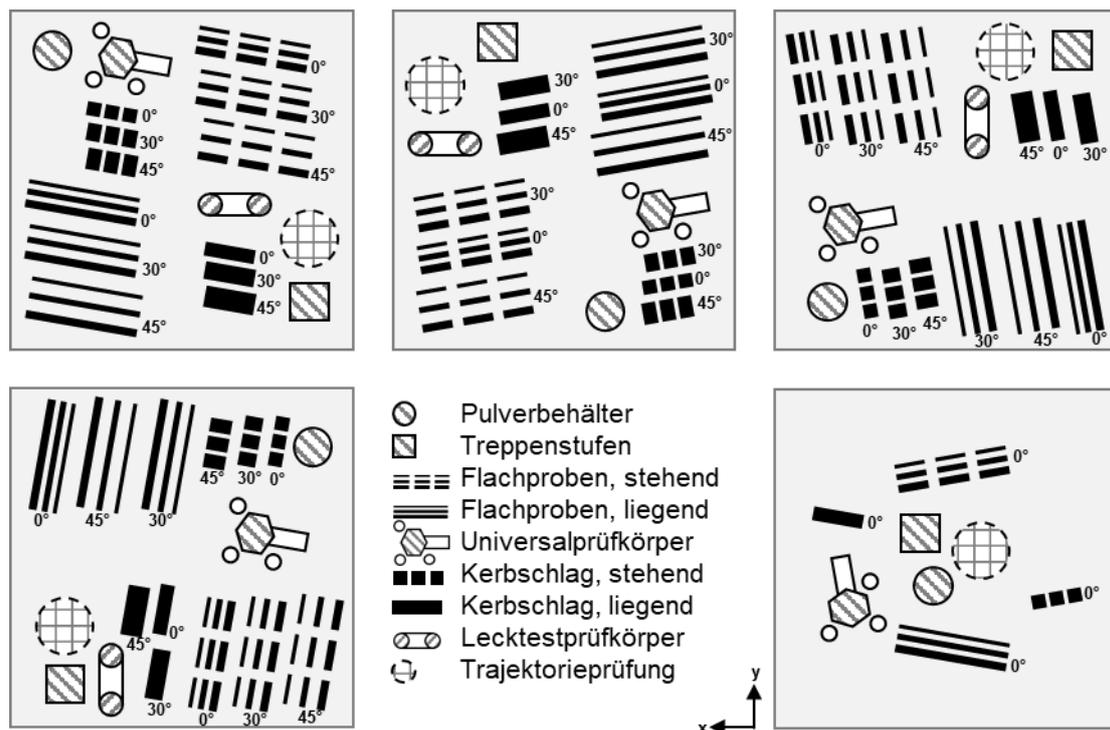


Abbildung 99: Schematische Draufsicht: 250 x 250 mm Bauplatzform zur Probenfertigung in fünf Bauzyklen zur Erhebung einer umfangreichen Datenbasis mit kombinierter Verfahrensqualifizierung

### Arbeitsprüfung und Definition der Gültigkeit

Durch die Arbeitsprüfung wird sichergestellt, dass die Fertigungsbedingungen in der Serienproduktion die gleichen Ergebnisse wiederholen wie die Verfahrensqualifizierung und die Erhebung der Datenbasis. Dazu können z.B. einzelne vorgestellte Bauzyklen der Verfahrensprüfung wiederholt werden. Die Gültigkeit resultiert direkt aus den anfangs definierten Arbeitsanweisungen, der Charakterisierung des Ausgangsmaterials und der Gesamtdefinition

des Fertigungssystems. Die Gültigkeit beschränkt sich dabei auf das entsprechend geschulte Personal, die qualifizierte Maschine, die qualifizierten Fertigungsparameter, Baudatenvorbereitung usw. (vgl. ISO/ASTM 52900).

### Serienprüfung

Der Demonstrator wurde eingeteilt in die Auslegungsklasse DC 2 nach DIN/TS 17026 Anhang A. Das bedeutet eine 100 % zerstörende Prüfung an Begleitproben. Diese sind je eine Zugprobe bei Raum- und Einsatztemperatur in der schwächsten (hier stehend) Raumrichtung und im schwächsten Bauraumbereich. Analog drei Kerbschlagarbeitsproben und je ein Prüfkörper zum Test gegen interkristalline Korrosion und zum Nachweis der chemischen Zusammensetzung. Die Proben sind jedem Los (Bauzyklus) beizufügen. Im Zuge von QuAFD wird zusätzlich empfohlen Mustergeometrien die im Bauteilinneren liegen für eine Sichtprüfung jedem Fertigungszyklus hinzuzufügen. Dazu wurde hier der Halbschnitt des Bauteils parallel aufgebaut (Abbildung 91). Außerdem wurde der beschriebene Prüfkörper aufgebaut und vollständig geprüft (Abschnitt 5.5.4). Nach einer festgelegten Routine zur Pulverentfernung wurde das Bauteil durch Drahterodieren von der Bauplattform getrennt. Dabei waren alle Öffnungen verschlossen, sodass keine Flüssigkeit des Erodierbades in das Bauteilinnere eindringen konnte. Anschließend wurde eine Sichtkontrolle durchgeführt. Direkte zerstörungsfreie Prüfungen die am Demonstrator in Frage kommen sind:

- Sichtprüfung außen (z.B. 3D-Bauteilgeometrievermessung) und innen mittels Videoendoskopie
- Bauteildichtemessung via Volumen (Gaspyknometer) und Gewicht
- Durchstrahlungsprüfung
- Chemische Zusammensetzung (Funkenspektroskopie am Flansch)
- Helium-Lecktest beider Kammern
- Pneumatische Druckprüfung
- Eindringprüfung Behälteraußenwand
- Magnetpulverprüfung Behälteraußenwand
- Rauheitsmessung Behälteraußenwand
- Rauheitsmessung an Zylindermantelfläche

Weiter wird eine Auswertung der Arbeits- und Maschinenprotokolle dringend empfohlen. Bei Unregelmäßigkeiten ist der Prüfaufwand entsprechend zu steigern. Nach der Entpulverung wurde das Bauteilgewicht mit einer Feinwaage vermessen und die Kanäle in einem Spülkabinen-Versuchsstand nach VDA 19 gespült, wobei insgesamt 0,01364 g resultierten. Dazu wurde siebenmal gespült und jeweils mit einem neuen Filter verbleibenden Rückstände gemessen. Im Vergleich mit ideal-sphärischen Partikeln mit dem Durchmesser von 40 µm würde die gemessene Masse 52000 Pulverpartikeln entsprechen (Abbildung 100). Abbildung 101 zeigt drei Aufnahmen des Bauteilinneren mit dem Videoendoskop IV9420RT IPLEX RT mit dem Direktobjektiv AT120D/FF-IV94 IPLEX RT RX (Olympus Deutschland GmbH, Hamburg, Deutschland). Für die zugänglichen Bereiche sind keine Pulvernester erkennbar. Die makroskopischen Bauteiloberflächen sind optisch fehlerfrei gebaut.

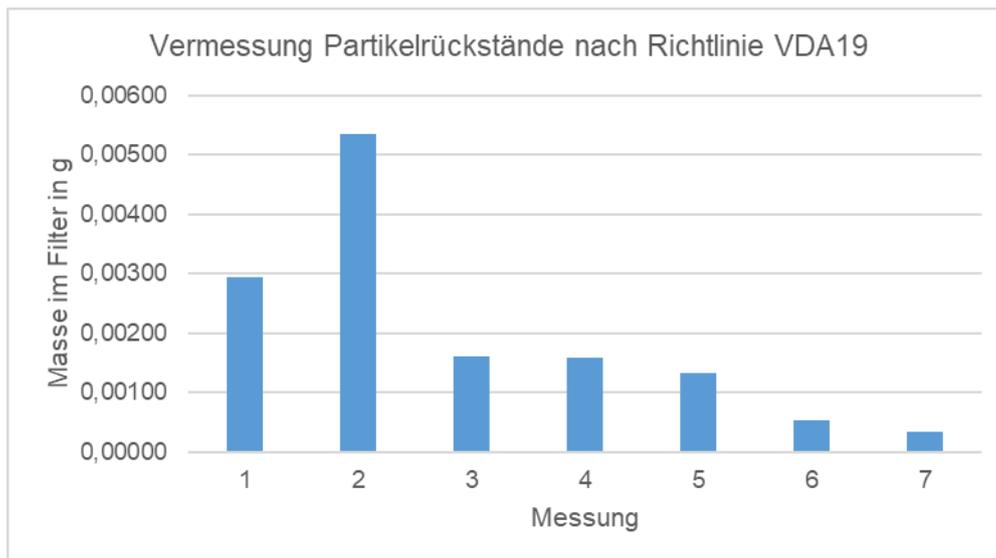


Abbildung 100: Durchspülende Kontrolle von Pulverrückständen im Wärmetauscher nach VDA19



Abbildung 101: Videoendoskopie zur Sichtkontrolle der Kanalstrukturen im Bauteilinneren

Anhand der Erkenntnisse des Forschungsprojektes wird vorgeschlagen, die Entscheidungsgrundlage und/oder die verfügbaren Auslegungsklassen nach DIN/TS 17026 zu ergänzen um folgende Aspekte:

- Umfang der Datenbasis,
- Detaillierungsgrad der Produktionsüberwachung durch Systeme und Prüfberichte,
- in Abhängigkeit der Sichtprüfung aller Bauteile und Begleitproben eines Bauzyklus.

Wenn beispielsweise eine sehr umfangreiche Datenbasis erhoben wurde (vgl. Abbildung 99), dann sind statistische Einflüsse mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit erfasst. Zusätzlich sind geometrische Effekte für das Fertigungssystem einbezogen. Ist hier eine Übertragbarkeit auf folgende Bauversuche gerechtfertigt, so werden die erzeugten Berechnungsgrundlagen auch in der Produktion mit hoher Sicherheit erreicht. Gleichfalls sollte berücksichtigt werden wie umfangreich die Produktion kontrolliert wird. In der Prozesskette der additiven Fertigung sind etliche Sichtprüfungen z.B. bei der Handhabung von Pulverwerkstoff, der Bauteilentnahme nach Bauzyklusende sowie der Kontrolle von Begleitproben möglich.

#### 5.5.4 Baujobbegleitende Prüfkörper

In der industriellen Produktion sind vollständige Bauteilprüfungen selten wirtschaftlich. Gefertigte Teile unterliegen festen Prozessschritten und müssen oft „in-time“ oder „in-sequence“ für kurze Durchlaufzeiten und geringe Stückkosten zum nächsten Arbeitsgang geführt werden. Rückschlüsse auf die Qualität des Fertigungsprozesses werden daher bei AM sinnvoll an Begleitproben geprüft, welche dem Bauzyklus hinzugefügt werden. Aussagen über Verschiebungen von Fertigungsparametern (Drift) für die jeweiligen Fertigungssysteme sind so parallel zur Serie möglich. Für AM wird empfohlen, geometrische Aspekte sowie die Oberflächenbeschaffenheit durch Sichtprüfungen zu kontrollieren. Hierfür eignen sich insbesondere Geometrien, welche früh auf Veränderungen reagieren. Weiterhin werden mechanisch-technologische und chemische Eigenschaften durch Proben für zerstörende Prüfungen an Begleitproben vorgeschlagen, um die eigentlichen Bauteile einer Serie möglichst vollständig zu erhalten. Aufgrund der limitierten Bauräume bei AM ist es außerdem nicht unwahrscheinlich, dass sich lediglich ein Bauteil im Los befindet. Ohne Begleitproben ist keine zerstörende Prüfung innerhalb dieses Loses möglich. Um möglichst viele Prüfungen mit geringem Volumen und Platzbedarf zur Verfügung zu stellen, wurde ein Testbauteil bestehend aus vier STL-Dateien entwickelt. Ein Vorteil liegt hierbei darin, dass es sich um ein zusammenhängendes Bauteil handelt, welches mit geringem Aufwand aus der Fertigungsprozesskette entnommen werden kann. Abbildung 102 stellt die Abmessungen dar und Abbildung 103 gibt einen Überblick über die einzelnen Prüfbereiche. Insbesondere bei den Details und der räumlichen Anordnung der Bestandteile handelt es sich um eine Empfehlung, die auf individuelle Anforderungen angepasst werden kann und soll. Um mögliche Einflüsse auf die Qualität der übrigen Bauteile im Bauzyklus zu vermeiden, sollte das Artefakt in Beschichtungs- und in Strömungsrichtung hinter diesen im Baufeld angeordnet werden.

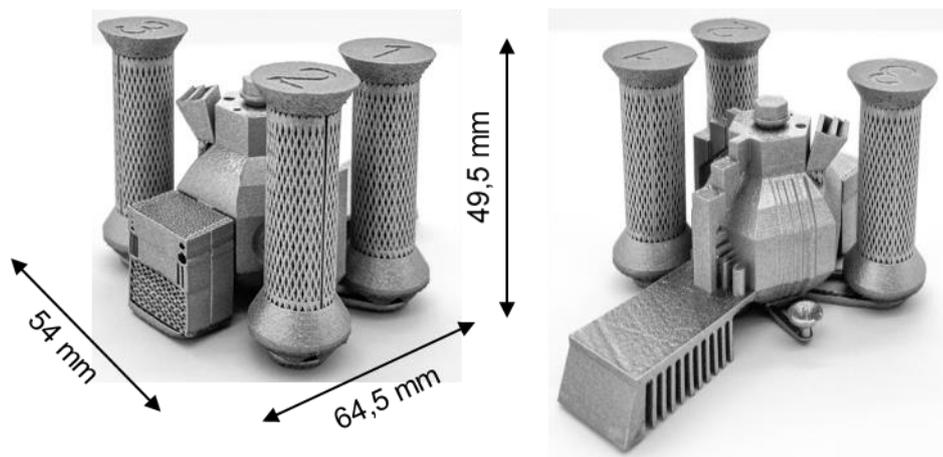


Abbildung 102: Fotografie und Abmessungen fertigungsbegleitender Prüfkörper

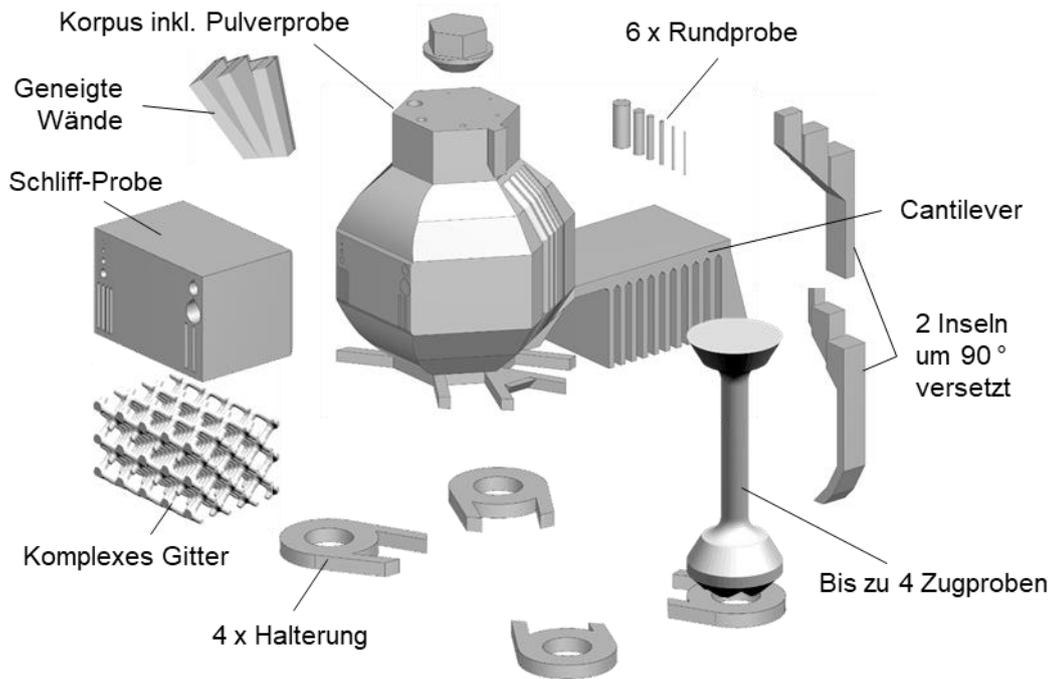


Abbildung 103: Prüfbereiche und Details fertigungsbegleitender Prüfkörper

Das Bauteil beinhaltet bis zu vier stehende **Zugproben** DIN 50125 – D 4 x 20. Die Form wird zur Minimierung der Bauhöhe ausgewählt. Stehende Zugproben stellen in der Regel die schwächste Raumrichtung beim Laserstrahlschmelzen dar (AP 3) und reagieren sensitiver als liegende Proben auf Bindefehler, welche häufig eine kritische Folge von Prozessabweichungen sind. Der Beginn der Einspannlänge wird durch Supportstrukturen gestützt. Diese sollten denen der Serienbauteile entsprechen, sodass eine stellvertretende Sichtprüfung durchgeführt werden kann. Die Zugproben sind durch unterbrochene Linien angebunden und können von Hand gelöst werden. Die Halterungen können an dünnen Stegen mit einer Zange gelöst und z.B. für die Bestimmung der **chemischen Zusammensetzung** verwendet werden. Der zentrale Korpus ist hohl und zunächst verschlossen. Er beinhaltet eine **Pulverprobe** von circa 4,5 g, welche archiviert oder weiter untersucht werden kann. Geöffnet wird die Probe durch Abschneiden des kreisrunden Linienkontakts. Dafür sind am Korpus und am Deckel jeweils Außensechskant-Formen angebracht. Aus der eingeschlossenen Pulvermasse lässt sich auf die Schüttdichte im Prozess schließen. Weiter sind typische Analysen wie die Untersuchung der Morphologie, Partikelgrößenverteilung oder der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials möglich. Im Inneren des Korpus befindet sich außerdem eine beliebig tauschbare **Bildgüteprüfgeometrie**. Diese wird außerhalb wiederholt, sodass die Bildgüte bei einer durchstrahlenden Prüfung verglichen werden kann. Die Geometrie besteht aus einer geneigten kreisförmig verlaufenden Wand, einer Aussparung sowie einem Zylinder und Radien. Dadurch wird die Wandstärke für jede Perspektive sowie die Lage des Körpers im Bild eindeutig definiert und ermöglicht die Bewertung der Abbildungsgenauigkeit der durchstrahlenden Prüfung. Aufgrund der Fertigungstoleranzen wird empfohlen Bildgüteprüfkörper die im Bauteilinneren additiv hergestellt werden sollen, nicht zu nahe an den Fertigungsgrenzen zu dimensionieren um eine hinreichende Wiederholgenauigkeit zu erreichen (Abbildung 104).

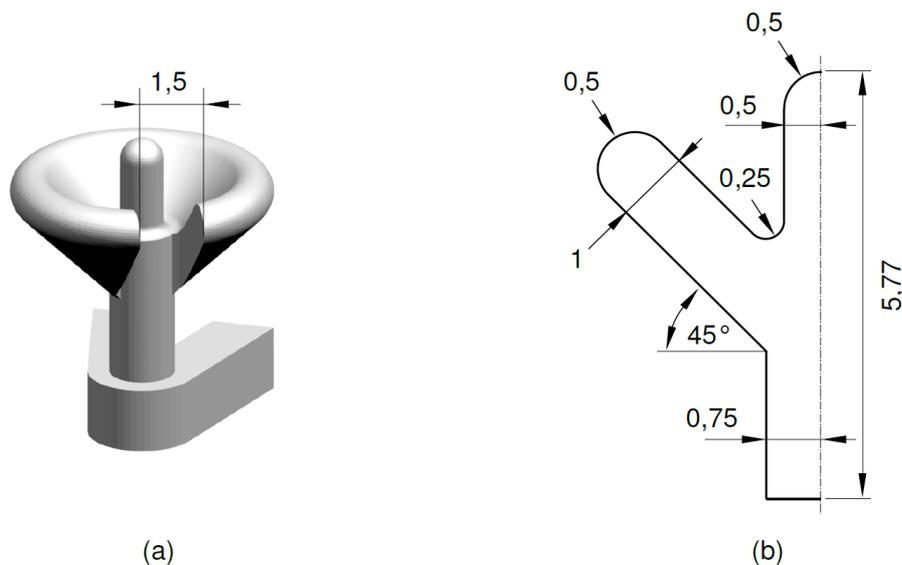


Abbildung 104: Vorschlag für einen AM-Bildgüteprüfkörper zur Wandstärkenkontrolle

Der hohle Korpus dient weiterhin als **Berstprobe** und ermöglicht das Prüfen mehrachsiger Spannungszustände. Die Öffnung an der Oberseite ist mit dem Durchmesser von 4 mm und einem Aufmaß von 0,2 mm für eine M5 Kernlochbohrung vorbereitet. Eine Seitenfläche ist als Berstscheibe mit Kerbe ausgeführt und ermöglicht den Test der Funktionsintegration „Sollbruchstelle“. Je nach Notwendigkeit lässt sich die Berstscheibe beliebig austauschen (z.B. mit einer kritischen Nennbauteilwandstärke). An der Außenseite des Korpus sind geometrische **Auflösungstests** in Anlehnung an die Normenreihe ISO 52900 und Richtlinie VDI 3405 angebracht. Beinhaltet sind Kerben und Wülste in verschiedenen Raumrichtungen sowie Bohrungen und Zylinder stehend in Aufbaurichtung. Ändert sich beispielsweise die Partikelgrößenverteilung oder der Fokussdurchmesser, so treten hier Änderungen in der Detailgenauigkeit auf. Die **Oberflächenrauheit** für Bauteilunterseiten und -oberseiten lässt sich für verschiedene Winkel an hinreichend großen Flächen am Korpus ohne angebrachten Merkmalen untersuchen. Beim Laserstrahlschmelzen können sogenannte Inseln Prozessfehler hervorrufen. Unter Inseln werden Bauteilbereiche von z.B. Streben verstanden, die während des Fertigungsprozesses innerhalb mehrerer Schichten nicht mit dem restlichen Bauteil verbunden sind. Daher sind 90 ° rotiert zueinander zwei solche Inseln vorgesehen, die im oberen Bauteilbereich mit dem Korpus „zusammenwachsen“. Sie bilden Bauraumausrichtungen in und quer zur Beschichtungsrichtung ab und sind mit veränderlicher Wandstärke ausgeprägt. Weiter sind für druckführende Komponenten insbesondere Wandungen relevant. Drei in unterschiedlichen Aufbauwinkeln geneigte Wände sind am oberen Teil des Korpus angebracht. Die Wandstärken werden bspw. einer kritischen Nennbauteilwandstärke gleichgesetzt (hier 1 mm). Durch Trennschleifen entstehen zwei Proben die jeweils mit D30 mm eingebettet und im metallografischen Schliff untersucht werden können (Abbildung 105 links). Angelehnt an die Probenform in AP2 und 3 sind drei Winkel realisiert zur Untersuchung der tatsächlichen **Wandstärke** und des **Werkstoffzustands** (Porosität, Gefüge). Gleichfalls mit D30 kann die sogenannte Schliffprobe eingebettet und durch Mikroskopie ausgewertet werden (Abbildung 105 rechts). Diese beinhaltet eine austauschbare Gitterstruktur, Vollmaterial sowie dünne Wände und Bohrungen in verschiedenen Größen. Auf der rechten Seite sind deutlich die Fertigungsgrenzen hinsichtlich

geometrischer Auflösbarkeit und an Querschnittsveränderungen in Aufbaurichtung Verformung durch Eigenspannungen erkennbar. Zusätzlich befindet sich ein Körper (separate STL Datei) auf der Oberseite, der es ermöglicht mit einem geänderten Hatch-Abstand im Fertigungsparameter (hier 0,5 mm) Einzelspuren (auch Blindnähte) zu provozieren. Der Vergleich dieser Nähte miteinander erlaubt eine Bewertung der Prozessstabilität (Balling, Humping) und die Vermessung der Schweißnahtgeometrie im Prozess (z.B. Einschweißtiefe). Hierbei ist insbesondere der Einfluss der effektiven Schichtstärke anzumerken, die sich im Fertigungsprozess nach circa 20 – 30 Schichten einstellt und typischerweise einem Mehrfachen der eingestellten Schichtstärke (Slicing) entspricht [100]. Zur Bewertung von **Eigenspannungen** befindet sich einseitig am Korpus ein durch Wände abgestützter Biegebalken (Cantilever). Beim Trennen des gesamten Prüfkörpers parallel von der Bauplattform werden Eigenspannungen frei und der Balken verbiegt sich in Aufbaurichtung. Die Erhebung kann mit einfachen Mitteln (Messschieber) erfasst und mit anderen Maschinen, Parametersätzen oder Bauzyklen verglichen werden. Die Messungen an drei gleich im Baufeld ausgerichteten Proben aus drei Fertigungszyklen ergab eine mittlere Verschiebung an der Cantilever-Spitze von  $0,623 \pm 0,033$  mm. Der Unterschied der auftretenden Eigenspannungen war hier sehr gering, womit die Vergleichbarkeit der Bauzyklen unterstützt wird. Im Folgenden werden weitere wichtigste geometrische Messungen tabellarisch aufgelistet (Tabelle 9). Diese sind wie in AP 4 formuliert stark abhängig vom Fertigungssystem (Werkstoff, Maschine, Parametersatz) und besitzen keine Allgemeingültigkeit. Auffällig ist jedoch, dass sämtliche Maße tendenziell ein Untermaß besitzen, was insbesondere im Hinblick auf Behälterwandstärken kritisch zu überprüfen und ggf. mit Korrektur auszulegen ist.

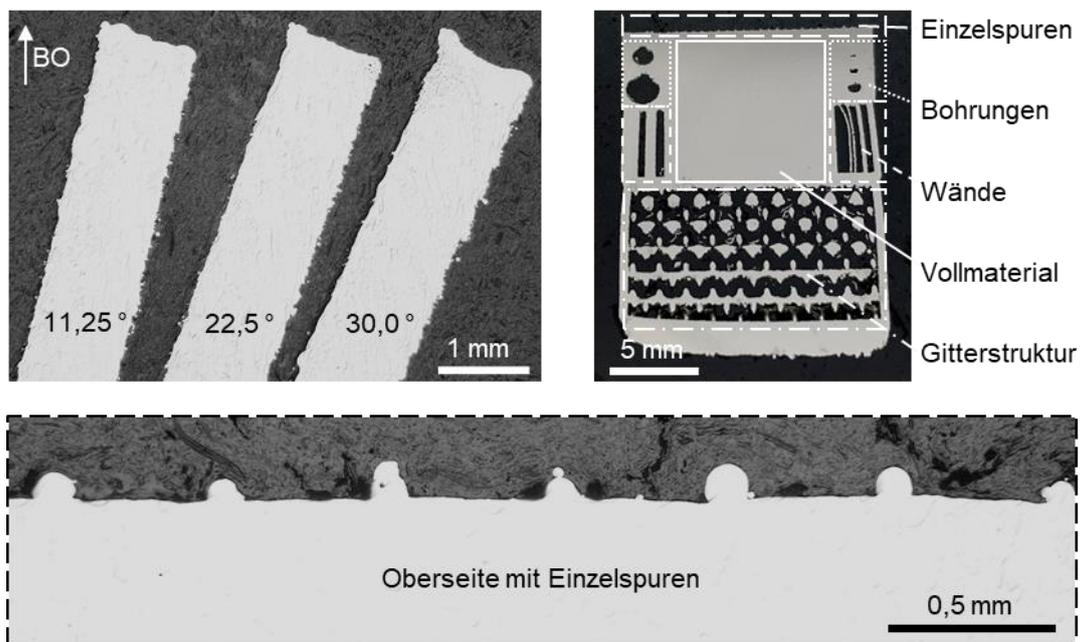


Abbildung 105: Mikroskopie im Querschliff: Wandungen (oben links), Schliiffprüfling (oben rechts) und Detailaufnahme der Einzelspuren am Schliiffprüfling (unten)

Tabelle 9: Messergebnisse zur Beurteilung der Geometrie am Prüfkörper

		Soll mm	Ist mm	Stabw mm	Abweichung %
Insel 1	Breite	4,000	3,957	0,009	-1,1
		3,000	2,940	0,022	-2,0
		2,000	1,987	0,048	-0,7
	Höhe	4,000	3,947	0,049	-1,3
Insel 2	Breite	4,000	3,903	0,012	-2,4
		3,000	2,930	0,008	-2,3
		2,000	2,000	0,008	0,0
	Höhe	4,000	3,990	0,037	-0,3
Wandstärke	11,25°	1,000	0,959	0,000	-4,1
	22,5°	1,000	0,987	0,010	-1,3
	30°	1,000	1,006	0,000	0,6
Zylinder in Aufbau- richtung	Durch- messer	2,000	1,953	0,012	-2,4
		1,260	1,203	0,012	-4,5
		0,800	0,773	0,017	-3,4
		0,500	0,49	0,008	-2,0
		0,320	0,317	0,005	-0,9
		0,200	0,173	0,005	-13,5
Bohrung in Aufbau-richt- ung	Durch- messer	2,000	1,950	0,022	-2,5
		1,260	1,220	0,008	-3,2
		0,800	0,780	0,013	-2,5
		0,500	0,490	0,004	-2,0
		0,320	0,309	0,005	-3,4
		0,200	0,202	0,007	1,0
Bohrung quer zu Aufbau- richtung	Durch- messer	0,200	nicht messbar (verschmolzen)		
		0,320	0,360	0,005	12,5
		0,500	0,533	0,006	6,6
		0,800	0,789	0,023	-1,4
		1,260	1,219	0,021	-3,3
		2,000	1,911	0,021	-4,5
Wand in Auf- bau-richtung	Durch- messer	0,100	0,100	0,007	0,0
		0,160	0,111	0,006	-30,6
		0,250	0,235	0,008	-6,0
		0,400	0,363	0,007	-9,3
		0,630	0,607	0,004	-3,7
		1,000	0,949	0,002	-5,1

## 5.6 Forschungsausblick

Auf Basis der in QuAFD erzielten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse wurde ein wesentlicher Beitrag zur Definition des benötigten Versuchsraums für die initiale Datenbank geleistet, wodurch die Prüfaufwände durch formelbasierte Interpolation von Zwischenwerten wesentlich reduziert werden können. Dabei wird neben der Richtungsabhängigkeit ebenfalls die Geometrieabhängigkeit der Materialeigenschaften ermittelt, welche in der aktuellen DIN/TS 17026 nicht berücksichtigt wird. Der entwickelte Ansatz einer optimierten Qualifizierungsmethodik bietet das Potenzial einer signifikanten Zeit- und Kosteneinsparung, was insbesondere kmU zugutekommt. Gleichzeitig zeigt sich im Rahmen von QuAFD, dass für eine erfolgreiche Werkstoffqualifizierung für z.B. eine Serienfertigung noch wesentliche wissenschaftlich-technische Erkenntnisse fehlen. Diese werden weder von den aktuellen Normen und Richtlinien, noch vom aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik abgedeckt. Forschungsbedarf im Rahmen der Werkstoffqualifizierungsmethodik besteht bei Strategien, um repräsentative Werkstoffkennwerte für PBF-LB/M gefertigte Materialien zu ermitteln und diese sicher und mit wenig Aufwand auf nachfolgende Fertigungszyklen anwenden zu können.

Eine weiterhin große Herausforderung der Qualifizierung verfahrenstechnischer Druckgeräte stellt darüber hinaus der Umgang mit Prozessanomalien dar.

*Stochastische Prozessfehler wie Beschichtungs-Fehler, Maschinenfehler oder Fehler in der Prozesskette können bisher durch kein Qualifizierungsvorgehen abgebildet werden und machen bisher eine Bauteileinzelqualifizierung für sicherheitskritische Bauteile notwendig.*

Der hohe Prüfaufwand für sicherheitskritische Bauteile ist auch durch die DIN/TS 17026 nicht reduziert worden. Demnach müssen in Abhängigkeit von „Design Classes“ zerstörungsfreie Prüfungen an den für das Design maßgeblichen Bereichen durchgeführt werden. Die für das Design maßgeblichen Bereiche sind dabei individuell vom Anwender für das jeweilige Bauteil zu definieren. Hierbei können die Erkenntnisse aus dem Prozess-Monitoring zu Hilfe genommen werden [35].

*Es gibt weder eine klare Definition noch eine konkrete Anweisung zur Bestimmung für das Design maßgeblicher Bereiche. Dies erschwert die Definition und Auslegung der richtigen Prüfstellen für den Anwender oder macht dies sogar unmöglich. In Zusammenhang mit der fehlenden Anweisung zum Umgang mit Prozess-Monitoring Daten ist beim Anwender mit deutlichen Mehraufwänden zu rechnen, um ein konkretes Prüfkonzept zu entwickeln.*

Neben der Definition kritischer Bauteilbereiche zur zerstörungsfreien Prüfung können Prozess-Monitoring-Daten auch zur Abschätzung der Übertragbarkeit ermittelter Materialkennwerten verwendet werden.

*Eine gleichbleibende Bauteilqualität von einem Fertigungszyklus zum nächsten ist generell nicht sichergestellt. Es kann nicht postuliert werden, dass in einer vorgelagerten Werkstoffqualifizierung ermittelte Auslegungskenngrößen auch in nachgelagerten Fertigungszyklen anwendbar sind. Dies ist auf Grundlage von wissenschaftlich-technischen Studien nachzuweisen.*

Dabei werden vor allem für die Entwicklung komplexer und sicherheitskritischer Bauteile wie verfahrenstechnische Druckgeräte verlässliche Auslegungskenngrößen benötigt.

In QuAFD konnte für mechanisch nachbearbeitete Prüfkörper sowohl für die quasi-statischen mechanischen Kennwerte des „Kernwerkstoffs“ (Oberflächeneffekte wie beispielsweise Rauheit, Randschichtporosität oder oberflächennahe Belichtungsstrategien wurden nicht berücksichtigt) als auch im **Low-Cycle-Fatigue (LCF)** Bereich eine Abhängigkeit der Eigenschaften von der Orientierung im Bauraum gezeigt werden. Erfolgt keine Nachbearbeitung beziehungsweise werden dabei unterschiedliche Oberflächenqualitäten erzeugt, ist eine Übertragung der Kennwerte von Proben auf das Bauteil nicht möglich. Rauheit und Randschichtporosität, Geometrie sowie Maßabweichungen der Wandstärke am Bauteil führen mitunter zu starken Überschätzungen der Bauteileigenschaften, welche zum vorzeitigen Ausfall des Bauteils führen können, aber nicht durch bisherige Standard-Prüfkörpergeometrien erfasst werden.

Die heute genormten Standard-Prüfkörpergeometrien für konventionell hergestellte Werkstoffe, z.B. Zugprobenformen gemäß DIN 50125, berücksichtigen nicht die Besonderheiten von AM. Vor allem eine Ermittlung von bauteilnahen, mechanischen Kennwerten für Hohlkörper aus Wandstrukturen, wie sie bei verfahrenstechnischen Druckgeräten häufig vorliegen, kann unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der zyklischen mechanischen Kennwerte von der Oberflächenrauheit mit derzeitigen Standard-Prüfkörpergeometrien nicht realisiert werden. Weiterhin stellt der mit der Fertigung von Standard-Prüfkörpergeometrien mittels PBF-LB/M verknüpfte Zeit- und Kostenaufwand insbesondere für kmU ein wirtschaftliches Problem dar und bietet nur einen geringen Mehrwert, da sich die damit erzielten Kennwerte aufgrund der durch Rauheit, Porosität, Geometrie und Maßabweichungen resultierenden Effekte bestenfalls bedingt zu einer Qualifizierung eignen. Standardisierte Prüfkörpergeometrien für das PBF-LB/M, welche veränderliche Werkstoffzustände berücksichtigen, wie z.B. as-built Hohlproben, existieren jedoch nicht.

*Für fertigungsnahe Auslegungskenngrößen hochkomplexer und sicherheitskritischer Bauteile ergibt sich daher die Forderung nach geeigneten Prüfkörpergeometrien und Beschaffenheiten, welche anisotrope und inhomogene Werkstoffzustände berücksichtigen.*

Im Projekt QuAFD konnte gezeigt werden, dass mittels Wandstärkenzuschlägen in Abhängigkeit von Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie den veränderlichen Materialeigenschaften des Bauteils im Auslegungsprozess erfolgreich Rechnung getragen werden kann. Die Strategie wurde anhand quasi-statischer, einachsiger Zugversuche entwickelt und validiert. Für mehraxial beanspruchte Bauteile mit komplexen und damit sehr großen Oberflächen, wie das

oftmals bei verfahrenstechnischen Druckgeräten der Fall ist, besteht allerdings noch Forschungsbedarf für entsprechende Auslegungsrichtlinien.

*Inhomogenitäten im Werkstoffzustand und in den resultierenden Materialeigenschaften können verfahrensbedingt nicht vermieden werden und beeinträchtigen die Bauteileigenschaften und damit die Bauteilsicherheit. Diese werden derzeit nur durch unwirtschaftliche, höhere Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Konstruktive Maßnahmen, wie Geometrie-Materialeigenschaftsklassen (z.B. Wandstärkeklassen), können neben einer Erhöhung der Bauteilsicherheit auch eine effizientere Materialausnutzung bewirken, existieren jedoch noch nicht.*

Eine Vielzahl konstruktiv relevanter Funktionen wie z.B. Ventile, Sollbruchstellen oder Versteifungen lassen sich in Bauteile unmittelbar mittels additiver Fertigung integrieren. Regelwerke, beziehungsweise Konstruktionsrichtlinien zur Auslegung funktionaler Merkmale sind für den AM-Bereich derzeit jedoch nicht verfügbar [vgl. 3]. Funktionsintegrationen beschränken sich heute auf Strukturen zur Verbesserung der Strömungseigenschaften wie z.B. Wärmeübertrag, Düsen oder Mischer [81]. Gerade bei sicherheitssteigernden Funktionsintegrationen, welche sowohl die Sicherheit des Bauteils im Betrieb steigern als auch den Aufwand für die Qualifizierung vor der Inbetriebnahme deutlich senken, wird das konstruktive Potenzial der AM aufgrund der fehlenden Regelwerke und Richtlinien nicht ausgenutzt.

*Die geringe Ausnutzung des konstruktiven Potenzials der AM liegt vor allem am hohen Entwicklungsaufwand und fehlenden Standards in diesem Bereich und stellt insbesondere für kmU ein Hemmnis dar.*

## 6 Zusammenfassung und Vergleich mit der Zielsetzung

### 6.1 Zusammenfassung

Die Zielsetzung von QuAFD ist die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Geometrie, Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften. Im Fokus des Projekts liegt daher die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften mit dem Ziel, kennwertbasiert Rückschlüsse auf auslegungsrelevante Kenngrößen zu ziehen. Als Werkstoff wird nach Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss (pbA) im Rahmen des Projektes ausschließlich der austenitische Stahl 316L untersucht.

Dazu wurde in einem Spiegelversuch zuerst die Übertragbarkeit von mechanischen Eigenschaften auf verschiedene Fertigungsstandorte bei gleichem Prozesssetup mittels quasi-statischen Zugversuchen untersucht. Der Vergleich zeigt signifikante Unterschiede in den erzielten mechanischen Kennwerten zwischen den Fertigungsstandorten und damit keine Übertragbarkeit der mechanischen Eigenschaften. Die mechanischen Kennwerte beider Fertigungsstandorte zeigen eine starke Anisotropie der mechanischen Eigenschaften. Ein Vergleich zu konventionellem Blechmaterial zeigt deutlich höhere Dehngrenzen, vergleichbare Zugfestigkeit und deutlich geringere Bruchdehnung in horizontaler Richtung.

Die lichtmikroskopische Gefügeanalyse zeigt eine typische PBF-LB/M Mikrostruktur für den austenitischen Stahl 316L mit ausgeprägten Schmelzbadgrenzen und in Baurichtung langgezogenen Körnern, die Schmelzbad-übergreifend vorliegen. XRD-Messungen an den gefertigten Proben zeigen keine Hinweise auf fertigungsbedingte Martensitbildung.

Eigen Spannungsmessungen zeigen hohe Zugeigen spannungen unter der Oberfläche in Baurichtung und Abhängigkeiten zur Neigung, Ausrichtung und Wandstärke. Eine Wärmebehandlung zu Reduktion von Eigen spannungen wurde exemplarisch durchgeführt und der Nutzen einer Wärmebehandlung bewertet. Die durchgeführte Wärmebehandlung zeigt keine signifikante Reduktion der Eigen spannungen, jedoch konnte eine Verringerung der mechanischen Kennwerte im quasi-statischen Zugversuch beobachtet werden. Auf eine weiterführende Untersuchung der Wärmebehandlung wurde dementsprechend nach Absprache mit dem pbA verzichtet.

Ein Vergleich verschiedener Probengeometrien zeigt verschieden stark ausgeprägte Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften zu den Wandungsmerkmalen Neigung, Ausrichtung und Wandstärke sowie der Porosität zur Neigung und Wandstärke. Als Abhängigkeiten werden dabei im Schlussbericht Haupteffekte nach DoE bezeichnet. Die Streuung der Messwerte umfasst dementsprechend alle betrachteten Parameter und fällt daher vergleichsweise groß aus.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde im Folgenden das WOrM-Modell zur Erfassung und Vorhersage des Werkstoffzustands in Abhängigkeit der Wandungsmerkmale eingeführt, welches Rückschlüsse von Wandungsmerkmalen (Neigung, Wandstärke und Ausrichtung) auf Werkstoffzustand (Porosität, Rauheit und Kornstruktur) sowie auf Werkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung, Härte) ermöglichen soll. Das WOrM-Modell umfasst hierbei ein Untersuchungskonzept zur strukturierten Betrachtung der Korrelationen zwischen Geometrie und Werkstoffzustands und Werkstoffeigenschaften. Es stellt keine quantifizierte formelbasierte Vorhersage der Werkstoffkennwerte im Rahmen einer konstruktiven Auslegung eines verfahrenstechnischen Druckgeräts dar.

Versuche zur Untersuchung des Werkstoffzustands mittels Lichtmikroskopie in den anschließenden WOrM-Versuchsreihen zeigten Abhängigkeit der Porosität vom Prozesssystem und höhere Porosität und Rauheit bei steigender Neigung vor allem im Down-Skin-Bereich der Proben. Die Porosität lässt eine sinkende Tendenz bei steigender Wandstärke vermuten. Die Wandstärke scheint keinen Einfluss auf die Rauheit zu haben.

Mechanisch bearbeitete Rundzugproben zeigen den isolierten Effekt der Neigung auf die mechanischen Kennwerte. Zugfestigkeit und Dehngrenze nehmen zu, während die Bruchdehnung abnimmt. Überlagert hierzu zeigen mechanisch bearbeitete Flachzugproben aus 8 mm-Blöcken den isolierten Effekt ausschließlich basierend auf der Geometrie. Es zeigen sich nur sehr geringe Abhängigkeiten der mechanischen Eigenschaften von der Wandstärke. Die mechanischen Kennwerte fallen jedoch tendenziell etwas niedriger aus als bei den mechanisch bearbeiteten Rundzugproben, zeigen aber die gleichen Abhängigkeiten zur Neigung.

As-built Flachzugproben weisen überlagerte Effekt aus Neigung (Anisotropie), Geometrie, Prozessthermik und Oberflächeneffekte auf. Der größte Einfluss auf die mechanischen Kennwerte unter Annahme der Soll-Wandstärke hat jedoch die Abbildungsgenauigkeit. Der Effekt der Prozessthermik konnte mittels Härtemessungen nach Vickers in Abhängigkeit der Wandstärke untersucht werden. Tendenzen sinkender Härte bei höheren Wandstärken sind zu erkennen, liegen jedoch im Bereich der Standardabweichung. Unterschiedliche Tendenzen bezüglich des Neigungswinkels weisen eine Abhängigkeit zur Untersuchungsrichtung auf. In Probenlängsrichtung zeigt sich analog zur Zugfestigkeit in quasi-statischen Zugversuchen eine höhere Vickershärte bei höheren Neigungen.

Die Effekte der Prozessthermik konnten fortführend mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) auf Veränderungen des Werkstoffzustands zurückgeführt werden. Tendenziell konnten größere Korngrößen bei größeren Wandstärken beobachtet werden, welche die geringeren Härtewerte erklären könnten. Die Kornverstreckung in Probenquerrichtung ist deutlich höher als in Probenlängsrichtung. Eindeutige quantitative Rückschlüsse zwischen Kornstruktur und Anisotropie der mechanischen Eigenschaften konnten jedoch nicht gezogen werden. Ein aussagekräftiger Kennwert aus der EBSD zur eindeutigen Beschreibung des Werkstoffzustands auf Basis der Kornstruktur kann im Rahmen des Projektes nicht empfohlen werden und bleibt weiterhin Gegenstand zukünftiger Forschungen.

Die Recherche nach integrierbaren Funktionen liefert sechs verschiedene Sensorarten, deren Integration realisierbar erscheint. Diese können messende (Dehnung, Temperatur, Wirbelstrom), regelnde (Aktuator) oder identifizierende (mittels elektromagnetischer Wellen RFID) Aufgaben übernehmen. Bauteilprüfungen und -identifikation können für den Betrieb erleichtert und die Sicherheit gesteigert werden. Weiter wird eine Vielzahl von Regelstrukturen zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit wie auch zum Wärmetausch vorgestellt. Dabei lässt sich Gewicht insbesondere durch Versteifungsrippen an Behälterwänden einsparen sowie Wärmeübertrag durch Oberflächenvergrößerung steigern. Auch druckgerätetypische Anbauteile wie Berstscheiben oder Ventile können in integraler Bauweise additiv gefertigt werden und somit Montageaufwände reduzieren oder die konstruktive Freiheit bei der Wahl des Applikationsortes erhöhen.

Es werden drei Methoden vorgestellt, die eine Berücksichtigung der AM-typischen anisotropen Werkstoffeigenschaften ermöglichen, wobei noch unvollständige Methoden bei verfügbaren Softwarelösungen für die konstruktive Auslegung festgestellt wurden.

Am Beispiel einer Sollbruchstelle durch eine Kerbe wurde gezeigt, dass Geometrien existieren, die den Ort des Versagens sicher vorherbestimmen und gleichzeitig notwendige Festigkeitsnachweise erbringen können. Eine individuelle rechnerische und experimentelle Betrachtung ist notwendig. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass der Stopp und die Änderung der Ausbreitungsrichtung des Versagens (Rissfortschritt) bei Überbelastung nur in Grenzen funktioniert und weiterer Betrachtung bedarf.

Der erarbeitete Modelldruckbehälter zur Untersuchung der Wirkung der Sollbruchstelle infolge eines Oberflächenkerbs gefertigt. Berstversuche weisen die sichere Provokation des Versagensortes nach. Der maximal erreichbare Prüfdruck wird dabei nicht reduziert, während dagegen die Bauteilverformung bis zum Bruch messbar reduziert wird.

Ein Wärmetauscher wird zur Demonstration der Auslegungsvorgehensweise „Design-by-Formula“ unter Berücksichtigung inhomogener Werkstoffeigenschaften erarbeitet, gefertigt und geprüft. Die Recherche hinsichtlich zerstörungsfreier Prüfmethode liefert 15 Ergebnisse.

In Übereinstimmung mit der Technischen Spezifikation DIN/TS 17026 wird beispielhaft eine Vorgehensweise zur Qualifizierung eines Fertigungssystems mit Fokus auf den Einflüssen hinsichtlich der inhomogenen Werkstoffeigenschaften beim Laserstrahlschmelzen beschrieben. In Ergänzung wird vorgeschlagen Sicherheitszuschläge bzw. Prüfaufwände infolge der Auslegungsklassen abhängig vom Umfang der Datengrundlage bzw. des Qualifizierungsvorgehens für ein System zu gestalten.

Ein Universalprüfkörper für additiv hergestellte Druckgeräte wurde erarbeitet und wird vorgestellt. Dieser beinhaltet geometrische Merkmale und Proben zur Erfassung mechanischer Kennwerte, Abbildungsgenauigkeiten, der allgemeinen Prozessstabilität, der Charakterisierung des Pulverwerkstoffs sowie die Möglichkeit einer Bauteilprüfung.

Fazit des Projektes ist, dass die wesentlichen Ziele des Projektes erreicht werden konnten. Anhand der Untersuchungen kann eine Bewertung des Werkstoffzustands und der Werkstoff-

feigenschaften in Abhängigkeit von Wandungsmerkmalen, wie sie für Druckgeräte vorkommen, durchgeführt werden. Mit Hilfe des Design of Experiments (DoE) konnten zudem wesentliche Effekte auf Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften ermittelt werden. Des Weiteren erlaubt die im Projekt beschriebene Vorgehensweise eine schlanke Qualifizierung eines Fertigungssystems und ermöglicht eine initiale Erhebung einer Datenbasis für die Werkstoff- und Prozessqualifizierung mit geringem Aufwand. Jedoch muss bedacht werden, dass trotz des großen Versuchsumfangs keine vollständige und quantitative Beschreibung des Modells realisiert werden konnte. Mögliche Einflussgrößen wie Eigenspannungen wurden in Abstimmung mit dem pbA nicht weiter untersucht und Kreuzkorrelationen sowie Überlagerungen der verschiedenen Einflussparameter können teilweise nicht uneindeutig zugeordnet werden, sodass an dieser Stelle immer eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt. In diesem Projekt festgestellte Abhängigkeiten können dementsprechend nur relativ zueinander bewertet werden.

## 6.2 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Eine tabellarische Gegenüberstellung der einzelnen im Antrag genannten Teilziele des Projekts und der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse enthält **Tabelle 10**.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ziele und der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse

Zielstellung	Ergebnisse
Einordnung des Projektes, Anforderungs- und Systemanalyse, Konkretisierung der Projektausrichtung	Aufarbeitung aller für das System vorhandener Einflussgrößen und Abgleich mit dem Stand der Forschung. Projektausrichtung in Abstimmung mit dem pbA mit Fokus auf Untersuchung inhomogener Werkstoffzustände und Werkstoffeigenschaften des Werkstoffs 316L (1.4404) in Abhängigkeit von Geometriemerkmalen anhand von quasi-statischen Zugversuchen.
Entwicklung einer Untersuchungsmethodik zur Analyse inhomogener AM-Werkstoffzustände und resultierender Materialeigenschaften für verfahrenstechnische Druckgeräte. Erhebung einer systemübergreifenden Datengrundlage.	Systematische Analyse des Werkstoffzustands und der Werkstoffeigenschaften in Form eines DoE mit 3 Wandungsmerkmalen als Parameter (Neigung, Ausrichtung und Wandstärke). Gegenüberstellung der Ergebnisse von Flach- und Rundzugproben sowie Schlißproben. Vergleich zweier baugleicher Fertigungssysteme unter Verwendung identischer Randbedingungen (Ausgangswerkstoff, Parameter, Fertigungsvorbereitung und -durchführung).
Untersuchung von Korrelationen und geometrischen Einflüssen, Rückschluss auf Bauteileigenschaften	Systematische Analyse des Werkstoffzustands und der Werkstoffeigenschaften in Form eines DoE mit 3 Wandungsmerkmalen als Parameter (Neigung, Ausrichtung und Wandstärke). Gegenüberstellung der Ergebnisse von Flach- und Rundzugproben sowie Schlißproben. Vergleich zweier baugleicher Fertigungssysteme unter Verwendung identischer Randbedingungen (Ausgangswerkstoff, Parameter, Fertigungsvorbereitung und -durchführung).
Beschreibung der Leistungsfähigkeit additiv hergestellter verfahrenstechnischer Druckgeräte. Übertrag geometrischer Ein-	Recherche und Darstellung integrierbarer Funktionen zur Steigerung der Betriebssicherheit von AM-Druckgeräten. Weiterentwicklung DGR-konformer Auslegungsvorgehensweisen zur Berücksichtigung inhomogener Werkstoffzustände durch

flüsse auf Gestaltungskenngößen und Erarbeitung sicherer Auslegungsvorgehensweisen.	geometriemerkmalebezogene Kenngrößen. Einführung der Abhängigkeit der Wandstärke von der Orientierung und Neigung von Behälterwänden.
Ableitung von Handlungsempfehlungen, Bauteilprüfungen und Herstellung von Demonstratoren.	Richtlinienentwurf für die ausgewählte Funktionsintegration „Sollbruch durch Oberflächenkerbe“ und experimenteller Nachweis der Funktionsfähigkeit durch Bauteilberstversuche. Entwicklung eines Wärmetauschers unter Ausnutzung leistungssteigernder Konstruktionsmöglichkeiten und aufbaurichtungsabhängiger Behälterwandstärken. Erarbeitung von Prüfmöglichkeiten direkt und zerstörungsfrei sowie mithilfe von Begleitproben. Ableitung und Validierung eines individualisierbaren Begleitprüfkörpers mit maximierten Untersuchungsmöglichkeiten und minimiertem Bauraum.

## 7 Schlussbetrachtung

### 7.1 Verwendung der Zuwendung

In Tabelle 2 ist eine schematische Darstellung des im Rahmen des Projektverlaufs angepassten Projektzeitplans für den Bewilligungszeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2021 dargestellt. Auf die erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

In Tabelle 11 sind die definierten Arbeitspakete (AP) für das bearbeitete Forschungsprojekt und die sich während der Laufzeit ergebenden Personenmonate (PM) für die beteiligten wissenschaftlich beschäftigte Personal (HPA A1) und das technische Personal (HPA C) sowie für wissenschaftliche Hilfskräfte (HiWi) aufgeführt.

Tabelle 11: Verwendung der Zuwendungen nach Arbeitspaketen

AP	Titel	TU Darmstadt PTW			Fraunhofer IGCV		TU Darmstadt MPA		
		HPA A1	HPA C	HiWi	HPA A1	HiWi	HPA A1	HPA C	HiWi
1	Anforderungen	5,4			4,5		5,7		
2	Versuchsplanung und Probenherstellung	11,6	12,0	3,4	8,5	4,3	2,2		
3	Werkstoffzustand und Materialeigenschaften				0,0		9,4	20,0	5,2
4	Korrelationen	5,6		1,0	4,0		5,6		1,0
5	Prüfmethoden und Auslegung	2,9		0,5	2,9	1,0	1,4		
6	Demonstratoren und Qualifizierung	2,1		0,5	3,0	1,0	1,5		
7	Projektmanagement	1,4			1,1		1,2		
<b>Summe</b>		29,0	12,0	5,4	24,0	6,3	27,0	20,0	6,2



## 7.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle im Antrag des Projektes aufgeführten Arbeitspakete wurden bearbeitet, wobei es im Projekt aufgrund eines erweiterten Stands der Technik sowie aktueller Entwicklungen in normgebenden Gremien zu einer Verschiebung der Schwerpunkte kam. Die in AP 1 durchgeführte Anforderungs- und Systemanalyse sowie Absprache mit dem pbA führte zur konkretisierten Projektausrichtung und damit einhergehend zu angepassten Arbeitspaketen, die erfolgreich abgearbeitet werden konnten. Abweichend zum Antrag ergab sich dadurch die begründete Verlängerung des AP 1 um acht Monate.

Als zentrales Ergebnis von AP 2 bis AP 4 wird das **W**andungs- und **O**rientierungsabhängige **M**aterial-Modell (WOrM-Modell) angesehen. Dieses repräsentiert die Korrelation des Werkstoffzustands und der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit der Wandungsmerkmale, welche sich aus Branchenanforderungen ergeben, mit dem Ziel einen möglichst schlanken und systematischen Qualifizierungsprozess abzuleiten. Darüber hinaus bildet das WOrM-Modell die Grundlage zur systematischen Erfassung der systemspezifischen Materialeigenschaften zur kennwertbasierten Berechnung und Auslegung von Druckgeräten. Die Ergebnisse zeigen die Korrelation von Werkstoffzuständen zur Wandungsstärke und der Ausrichtung einer Behälterwand zur Bauplatzform für Fertigungsinfrastrukturen der Forschungseinrichtungen und Anlagen aus dem pbA. Die Wirkzusammenhänge wurden systematisch dargestellt und dem Projektkontext zugeordnet. Zudem wurde ein systematischer Ansatz eines erweiterbaren Qualifizierungsvorgehens des PBF-LB/M Verfahrens für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte entwickelt. Dieser dient der Identifikation des minimalen Qualifizierungsumfangs nach der vollständigen Untersuchung aller Werkstoffzustände und Materialeigenschaften. Des Weiteren sind Messverfahren, Probengeometrien sowie Auswertalgorithmen definiert worden, die als Empfehlung im Schlussbericht dokumentiert sind. Anwender sind mit den erzielten Ergebnissen in der Lage den Qualifizierungsaufwand abzuschätzen und zu minimieren.

Abweichend zum Antrag wurde in Abstimmung mit dem pbA ausschließlich der austenitische Stahl 316L untersucht. Auf die Designanpassung der definierten Demonstratoren wurde verzichtet und für AP 5 und AP 6 wurden neue Demonstratorbauteile für Funktionsprüfungen und Auslegungsvorgehen definiert. AP 5 wurde durch Methoden zur Berechnung von druckführenden Komponenten substituiert. Drei Konzepte werden vorgeschlagen. Weiterhin wurden für Druckgeräte relevante Funktionsstrukturen sowie verfügbare Prüfmethode für additiv hergestellte Druckgeräte identifiziert. Nach einer Bewertung wurde die Provokation einer Sollbruchstelle mittels eines Oberflächenkerbs detailliert untersucht und ein Richtlinienvorschlag zur Umsetzung erarbeitet. AP 6 beschäftigte sich mit der Funktionsprüfung und Umsetzung von. Das erarbeitete Vorgehen für eine Sollbruchstelle wird an einem Modelldruckbehältnis umgesetzt und durch Berstdruckprüfungen mit Erfolg nachgewiesen. Für die exemplarische Durchführung des erarbeiteten Auslegungsvorgehens wurde ein Wärmetauscher in AP 5 konstruiert und gefertigt. Abschließend wurde ein Prüfkörper entwickelt, der eine hohe Anzahl fertigungsbegleitender Prüfungen ohne Verlust der Serienbauteile des Bauzyklus (Los) ermöglicht. Die Ergebnisse sind als Handlungsempfehlungen (AP 6 aus Antrag) anzusehen. Alle durchgeführten Arbeiten und der damit verbundene Personaleinsatz waren zur Erreichung der Ergebnisse notwendig und wichtig.

### **7.3 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens**

Fehlende Standards und Normen für den Bereich der additiven Fertigungsverfahren von Druckgeräten stellen heute in diesem Anwendungsbereich ein Hemmnis für die Akzeptanz und den Einsatz additiver Fertigungsverfahren dar. Bei Druckgeräten handelt es sich oft um komplex aufgebaute und fügeintensive Bauteile, z. B. Wärmetauscher oder Druckmessgeräte (Bourdon-Systeme), die mittels konventioneller Fertigungsverfahren nur in großen Stückzahlen wirtschaftlich herstellbar sind. In kleinen Stückzahlen oder gar als Einzelanfertigungen hergestellte Ersatzteile oder für bestimmte Anwendungen individualisierte Designmerkmale sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden und gerade für kmU oft nicht wirtschaftlich.

Additive Fertigungsverfahren, wie z. B. das PBF-LB/M bieten für Fertigung komplexer Bauteile und Systeme mit einem hohen Grad individueller Designmerkmale hohe wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Dies betrifft sowohl die Serienfertigung komplexer Bauteile als auch die Anfertigung individualisierter Einzelteile. Im Vergleich zur konventionellen Fertigung ergeben sich insbesondere für Druckgeräte hohe wirtschaftliche Potenziale durch den Wegfall des kosten- und zeitintensiven Formen- und Vorrichtungsbaus, durch den hohen Flexibilisierungsgrad sowie durch die wirtschaftliche Fertigung geringer Stückzahlen. Der Verzicht bauteilspezifischer Werkzeuge und Formen ermöglicht zusätzlich eine deutliche Verringerung der Lagerkosten bei gleichzeitig hoher Flexibilität und kurzer Reaktionszeit für die Neuanfertigung von Austauschteilen im Reparatur- oder Wartungsfall. Die erforderlichen digitalen Bauteilinformationen könnten bei einer entsprechend qualifizierten Prozesskette zur prozesssicheren Reproduktion der Druckgeräte bzw. auch zu einer Reparatur selbiger zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der Anlagenlebensdauer verwendet werden. Häufig werden an Druckgeräte die Anforderungen gestellt, dass eine Leckage vor dem eigentlichen Versagen bzw. Bruch/Bersten des Druckgerätes erfolgen muss oder eine zerstörungsfreie Prüfung während des Bauteilbetriebes ermöglicht wird. Hieraus können sich funktionsgerechte, individualisierte Designlösungen in mehreren Varianten ergeben, die variable Einbausituationen berücksichtigen.

PBF-LB/M als additives Fertigungsverfahren stellt heute in vielen Branchen eine Schlüsseltechnologie dar und gewinnt zunehmend an Einsatztiefe. Bei Druckgeräten handelt es sich oft um sicherheitskritische Bauteile, sodass die fehlenden Prüfmethode bzw. Bewertungsrichtlinien zur Sicherstellung der Bauteilanforderungen gemäß Druckgeräterichtlinie eine Markteintrittsbarriere für die Anwendung des PBF-LB/M darstellen, und daher PBF-LB/M im Druckgerätebereich heute praktisch nicht angewendet wird.

Die deutschen Hersteller von Druckgeräten nehmen speziell in Europa, aber auch weltweit eine Führungsposition ein. Mit der Erschließung des PBF-LB/M als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie leistet das Forschungsprojekt einen signifikanten Beitrag zur Behauptung bzw. zur Stärkung des Standortes Deutschland. Bei den zahlreichen deutschen Herstellern und Anwendern von Druckgeräten sowie den damit verknüpften Unternehmen handelt es sich häufig um klein- und mittelständische Unternehmen (kmU).

Die angestrebten Projektergebnisse haben somit einen ausgeprägten volkswirtschaftlichen Nutzen, da die an der gesamten Fertigungskette von Druckgeräten beteiligten Industriezweige sowie deren Anwender davon profitieren, die oft aus dem Bereich der kmU stammen. Das Forschungsprojekt kommt damit insbesondere dem Mittelstand zu Gute, der diese enorme und komplexe technische Aufgabe nur durch die Unterstützung der industriellen Gemeinschaftsforschung meistern kann.

Die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie bringt für die an der Fertigungskette von Druckgeräten beteiligten Industriezweige sowie deren Anwender folgenden Nutzen:

- Fundierte Kenntnisse zu den Abhängigkeiten der Werkstoffzustände und Werkstoffeigenschaften in Wandstrukturen die mittels PBF-LB/M hergestellt werden
- Optimierung und Substitution der oft montage- und fügeintensiven Fertigungsprozesse komplexer Druckgeräte, z. B. bei Wärmetauschern oder bei Manometern. Insbesondere hier bietet der Einsatz des PBF-LB/M zahlreiche Innovationspotenziale, etwa durch Nutzung der mittels PBF-LB/M realisierbaren hohen Aspektverhältnisse zur Erzeugung von dünnen, mediendichten Wandgeometrien, die in ihrer Topologie hinsichtlich der Wärmeübertragung optimiert sind.
- Die Reduktion von Fügeprozessen (z. B. Schweißnähten einschließlich Vorbereitung/Nachbereitung und Prüfung, Verbindungselemente oder Dichtungen)
  - erlaubt eine kompaktere und kostengünstige Fertigung.
  - bewirkt eine Erhöhung der Sicherheit durch die Minimierung von Fehlerquellen und trägt somit zur Steigerung der Zuverlässigkeit additiv gefertigter Druckgeräte bei.
  - reduziert den Umfang der Prüfungen einzelner Komponenten, wodurch sich der Prüf- und Dokumentationsaufwand verringern und die Fertigungsdauer reduzieren lässt.
  - birgt signifikante wirtschaftliche Vorteile.
- Die Möglichkeit, in einem Bauprozess parallel mehrere Bauteile zu generieren, bietet weitere Einsparungspotenziale bei der Fertigung und Erprobung mehrerer Varianten oder der Fertigung von Musterteilen und Kleinserien.
- Sicherstellung der Bauteilsicherheit bei PBF-LB/M durch richtlinienkonforme Prüfmethoden und Handhabungsempfehlungen.
- Vertrauensgewinn und Erhöhung der Akzeptanz für die additive Fertigung von Druckgeräten mittels PBF-LB/M-Verfahren, um insbesondere für kmU das Anwendungsrisiko zu reduzieren.
- Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von kmU durch Reduzierung der aufwändigen Fertigungsprozessqualifizierung konventionell hergestellter Druckgeräte.

Damit sind Nutzen und Bedeutung des Projekts insbesondere für kmU sehr hoch. Der potenzielle Nutzerkreis des Forschungsvorhabens betrifft insbesondere den Wirtschaftszweig (gemäß IGF-Leitfaden) 28 (Maschinenbau), aber auch den Bereich der chemischen Industrie, speziell die Wirtschaftszweige 20 (Herstellung von chemischen Erzeugnissen), 21 (Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen) und 22 (Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren) sowie den Wirtschaftszweig 63 (Informationstechnologie) bezüglich der Datenverarbeitung und Vernetzung zur Herstellung individualisierter Produkte mittels PBF-LB/M.

Das hohe Innovationspotential des Einsatzes additiver Fertigungsverfahren, sowie das aus dem Projekt abgeleitete hohe spezifische Expertenwissen im Bereich der Konstruktion und Auslegung erlaubt den Druckgeräteherstellern und den damit verknüpften Industriezweigen eine Stärkung ihrer Marktposition, insbesondere gegenüber der international zunehmenden Konkurrenz. Die notwendige Qualifizierung der Mitarbeiter, die einerseits für die Umsetzung der Prozessspezifika und andererseits für die Digitalisierung dieser Prozesskette verantwortlich sein sollen, trägt ebenfalls zur Sicherung der Arbeitsplätze in diesem Industriezweig bei. Die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und Handhabungsempfehlungen zum Einsatz der Additiven Fertigung von Druckgeräten sollen von Herstellern von Druckgeräten, Herstellern von PBF-LB/M-Anlagen sowie Dienstleistern aus dem Bereich des Additive Manufacturing (AM) genutzt werden, um die Marktpotenziale der Verfahrenstechnik nutzen zu können.

Nach der erfolgreichen Etablierung der PBF-LB/M-Technologie für die additive Fertigung von Druckgeräten ermöglichen die verfahrensbedingten Gestaltungspotenziale mittelfristig eine Integration von zusätzlichen Bauteilfunktionen in Druckgeräten, z.B. die Detektion von Leckagen durch in Doppelwandungen integrierte Prüfmedien, die Realisierung eines internen kathodischen Korrosionsschutzes oder die Integration elektronischer Komponenten wie RFID-Transponder zur Bauteilmarkierung. Durch den Einsatz des Laserstrahlschmelzens entstehen somit neue innovative Konzepte für Druckgeräte.

Die in dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für Standardisierungs- und Normungsprozesse für einen prozesssicheren Technologieeinsatz des PBF-LB/M für die additive Herstellung von Druckgeräten einfließen, die die Anforderungen der Druckgeräterichtlinie DGR 2014/68/EU berücksichtigen. Diese Maßnahme trägt zum Abbau der heute bestehenden Hemmnisse und Sicherheitsbedenken bezüglich des Einsatzes additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Druckgeräten bei. Somit kann eine zukünftige, aus dem Projekt abzuleitende Konformitätsbescheinigung des PBF-LB/M im Sinne der Fertigung nach der Druckgeräterichtlinie die Erschließung neuer Geschäftsfelder und Anwendungen und zum anderen eine deutlich effizientere Ausführung bisheriger Applikationen bewirken.

## 7.4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 7.4.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

In Tabelle 12 sind die durchgeführten spezifischen Transfermaßnahmen zusammenfassend über die Projektlaufzeit aufgeführt.

Tabelle 12: Übersicht der durchgeführten spezifischen Transfermaßnahmen über den gesamten Projektzeitraum

Nr.	Maßnahme	Ziel	Typ	Datum	Zielgruppe	Verbreitung
1	Kick-Off Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (pbA)	Vorstellung u. Diskussion des Projekts, Abstimmung Zeitplanung, Maßnahmen	Veranstaltung	29.04.2019	pbA	pbA-Mitglieder
2	2. Sitzung des NA145-04-02-01 GAK Additive Fertigung	Wissenschaftstransfer in die Wirtschaft u. Fachwelt, Diskussion u. Abstimmung auf Normungsebene	Veranstaltung	09.05.2019	öffentlich	Mitglieder des GAK, DIN Deutschen Institut für Normung e.V.
3	Quick-Check bei BASF SE	Diskussion unternehmensspezifischer Potenziale von LBM, Besprechung von Anforderungen an das Projekt	Consultation	18.07.2019	pbA, BASF	pbA, BASF
4	Quick-Check bei WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG	Diskussion unternehmensspezifischer Potenziale von LBM, Besprechung von Anforderungen an das Projekt	Consultation	30.07.2019	pbA, WIKA	pbA, WIKA
5	3. Sitzung des NA145-04-02-01 GAK Additive Fertigung	Wissenschaftstransfer in die Wirtschaft u. Fachwelt, Diskussion u. Abstimmung auf Normungsebene	Veranstaltung	21.10.2019	öffentlich	Mitglieder des GAK, DIN Deutschen Institut für Normung e.V.
6	2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Diskussion der Zwischenergebnisse, Abstimmung Zeitplanung, Maßnahmen	Online-Veranstaltung	22.10.2019	pbA	pbA-Mitglieder
7	4. Sitzung des NA145-04-02-01 GAK Additive Fertigung	Wissenschaftstransfer in die Wirtschaft u. Fachwelt, Diskussion u. Abstimmung auf Normungsebene	Veranstaltung	19.12.2019	öffentlich	Mitglieder des GAK, DIN Deutschen Institut für Normung e.V.
8	GVT Arbeitskreissitzung	Diskussion Zwischenergebnisse	Online-Veranstaltung	28.04.2020	GVT	GVT-Mitglieder
9	3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Besprechung des Projektstandes und Ergebnisdiskussion	Online-Veranstaltung	29.06.2020	pbA	pbA-Mitglieder
10	4. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (pbA)	Besprechung des Projektstandes und Ergebnisdiskussion	Online-Veranstaltung	21.10.2020	pbA	pbA-Mitglieder
11	Abschlussarbeiten	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende		3x 2020	öffentlich	öffentlich
12	GVT Arbeitskreissitzung	Diskussion Zwischenergebnisse	Online-Veranstaltung	22.02.2021	GVT	GVT-Mitglieder
13	5. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (pbA)	Besprechung des Projektstandes und Ergebnisdiskussion	Online-Veranstaltung	10.06.2021	pbA	PbA-Mitglieder
14	GVT Arbeitskreissitzung	Diskussion Zwischenergebnisse	Online-Veranstaltung	22.06.2021	GVT	GVT-Mitglieder
15	Veröffentlichung (MDPI – Metals)	Wissenschaftlicher Transfer	PDF/ Internet	11.02.2022	öffentlich	öffentlich

16	GVT Arbeitskreis-sitzung	Diskussion Ergebnisse	Online-Veranstaltung	09.03.2022	GVT	GVT-Mitglieder
17	Schlusssitzung des projektbegleitenden Ausschusses (pbA)	Diskussion Ergebnisse	Online-Veranstaltung	13.05.2022	pbA	pbA-Mitglieder
18	Abschlussbericht	Detaillierte Ergebnisdokumentation	Print/ PDF	30.05.2022	GVT	GVT - Mailverteiler

#### 7.4.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Projektabschluss (Transferkonzept)

Alle geplanten Transfermaßnahmen nach Projektabschluss sind nach aktuellem Stand umsetzbar. Mindestens zwei Veröffentlichungen sind bis zum Ende des Jahres vorgesehen. Explizit wird im Rahmen der Fraunhofer DDMC - Direct Digital Manufacturing Conference - am 15. und 16. März ein Fachvortrag und eine Konferenzveröffentlichung mit dem Titel „*Investigation on a predetermined point of failure for stainless steel 316L pressure loaded components made by laser powder bed fusion through stress analysis and experimental testing*“ präsentiert sowie veröffentlicht. Weiterhin erlaubt die aktuelle Lage der Pandemie das Stattfinden von Fachtagungen und Workshops. An der TU Darmstadt werden im Rahmen des bis Ende 2022 neu entstehende Additive Manufacturing Center (AMC) alle an der additiven Fertigung beteiligten Institute der TU Darmstadt örtlich zusammengeführt. Das AMC hat sich zum Ziel gesetzt, die Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu bilden und so insbesondere KMU einen Zugang zum wissenschaftlichen und technologischen Potential der TU Darmstadt zu ermöglichen. Das AMC ist im Kern ein Projekt für den Technologietransfer für Additive Fertigung und Digitale Prozessketten in regionale und überregionale Unternehmen. Als solches ist neben dem Bau des Gebäudes die Konzeption von Schulungsangeboten und Kooperationsformen mit dem neuen Zentrum ein wesentlicher Bestandteil. Nach aktueller Konzeption des Schulungsangebots wird ein einschlägiger Workshop unter Verwendung der anwendungsnahen Forschungsergebnisse aus dem Projekt QuAFD entwickelt. Der Arbeitstitel des Workshops lautet „*The roadmap to component certification; Example: Pressure Equipment Regulation*“. Durch die anwendungsnahe Umsetzbarkeit der Ergebnisse profitieren vor allem KMU von den geplanten Workshops und den bilateralen Gesprächen. Im Rahmen der Zusammenarbeit im Gemeinschaftsarbeitskreis NA145-04-02-01 GAK Additive Fertigung fließen die Ergebnisse des Projekts in nationale und europäische Regelwerke mit ein. Auch hier profitieren vor allem KMU von klaren Vorgaben und Vorgehensweisen. Des Weiteren werden die Forschungsergebnisse in der Ringvorlesung „Einführung 3D-Druck und Additive Fertigung“ an der TU Darmstadt im Vorlesungsblock „Selektives Lasersintern/-schmelzen SLS/SLM“ integriert und an Studierende vermittelt.

Tabelle 13: Übersicht der geplanten spezifischen Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens (Auszug aus Antrag)

Nr.	Maßnahme	Ziel	Typ	Plattform	Wann	Für wen	Verbreitung
9	Forschungsreport	Zusammenfassung der Ziele und Zwischenergebnisse	PDF / Internet	GVT	1 x/Jahr (bis 5 Jahre nach PE)	öffentlich	Mailverteiler ca. 1500
10	Abschlussbericht	Bericht über Ziele, Vorgehensweise und detaillierte Ergebnisse	Print / PDF	GVT	ca. 4 Monate nach PE	öffentlich	Mailverteiler ca. 1500
11	Fachtagungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Veranstaltung	Fachkonferenz, RapidTech, SFFS, DDMC	ca. 6-9 Monate nach PE	öffentlich	Konferenzteilnehmer
12	Veröffentlichung in Fachzeitschriften	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Print / PDF / Internet	Rapid Prototyping Journal, Journal of Material Processing	ca. 6-9 Monate nach PE	öffentlich	> 1000
13	Erarbeitung von Regelwerken	VDI 3405, DGRL 2014/68/EU	Print / PDF / Internet	VDI, Normungsausschüsse	2-5 Jahre nach PE	öffentlich	unbeschränkt
14	Erarbeitung von Regelwerken	Anforderungen zur additiven Fertigung von Bauteilen für Druckgeräte	Print / PDF / Internet	VDMA-AK "Additive Manufacturing für Druckgeräte"	1-2 Jahre nach PE	öffentlich	unbeschränkt
15	Lehre (Vorlesung)	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende	Veranstaltung	Vorlesung an der TU-Darmstadt, Promotion	Jährlich, ca. 4 Monate nach PE	Studierende	Studierende der TU-Darmstadt
16	Berufliche Weiterbildung	In-House Schulungen bei Herstellern von Druckgeräten	Veranstaltung	Schulungen bei Herstellern von Druckgeräten	Bei Bedarf ca. 6 Monate nach PE	Seminarteilnehmer	ca. 20 / Jahr
17	Fachtagung / Kolloquium	Abschlussveranstaltungen "Additive Fertigung in der Druckgeräteindustrie" über DECHEMA, regionale Cluster	Veranstaltung (bis zu 3 Stück)	regionale Multiplikatoren mit kmU-Fokus	ca. 6 Monate nach PE	Seminarteilnehmer	ca. 20-30 pro Veranstaltung

## 7.5 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

- Vu, H.M.; Meiniger, S.; Ringel, B.; Hoche, H.C.; Oechsner, M.; Weigold, M.; Schmitt, M.; Schlick, G., Investigation of Material Properties of Wall Structures from Stainless Steel 316L Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Metals* **2022**, *12*, 285. <https://doi.org/10.3390/met12020285>

## 7.6 Gewerbliche Schutzrechte

Für die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse wurden keine gewerblichen Schutzrechte beantragt.

## 7.7 Danksagung

Es gilt ein großer Dank der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und der Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V. (GVT), die das Forschungsprojekt finanziell gefördert und inhaltlich begleitet haben. Weiterhin ist allen Mitgliedsfirmen des projektbegleitenden Ausschusses zu danken, die sich mit Sach- und Dienstleistungen sowie konstruktiven Diskussionen maßgeblich am Forschungsprojekt beteiligt haben.

Das IGF-Vorhaben 20325 N der Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der GVT, Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main, angefordert werden.

## 8 References

1. European Parliament. *Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt Text von Bedeutung für den EWR*, 2014. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0068&from=DE> (accessed on 7 July 2021).
2. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 13445:2018-12, Unbefeuerte Druckbehälter*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2018.
3. Kranz, J. *Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2017, ISBN 978-3-662-55338-1.
4. Wohlers Associates. *Wohlers Report 2021: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, 2021*.
5. Zinovieva, O.; Zinoviev, A.; Romanova, V.; Balokhonov, R. Three-dimensional analysis of grain structure and texture of additively manufactured 316L austenitic stainless steel. *Additive Manufacturing* **2020**, *36*, 101521, doi:10.1016/j.addma.2020.101521.
6. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 8580:2020-01, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2020.
7. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 28018:2006-05, Druckbehälter aus Stahl, emailliert - Behälter für Anlagen 0,063 m<sup>3</sup> bis 10 m<sup>3</sup>*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2006.
8. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 28136-1:2005-12, Rührbehälter - Teil 1: Hauptmaße*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2005.
9. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 30690-1:2019-05, Bauteile in Anlagen der Gasversorgung - Teil 1: Anforderungen an Bauteile in Gasversorgungsanlagen*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2019.
10. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 12266-1:2012-06, Industriearmaturen - Prüfung von Armaturen aus Metall - Teil 1: Druckprüfungen, Prüfverfahren und Annahmekriterien - Verbindliche Anforderungen*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2012.
11. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 12953-1:2012-05, Großwasserraumkessel - Teil 1: Allgemeines*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2012.
12. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 13480-1:2017-12, Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 1: Allgemeines*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2017.
13. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 1515-4:2021-06, Flansche und ihre Verbindungen - Schrauben und Muttern - Teil 4: Auswahl von Schrauben und Muttern zur Anwendung im Gültigkeitsbereich der Druckgeräte richtlinie 2014/68/EU*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2021.
14. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 764-1:2016-12, Druckgeräte - Teil 1: Vokabular; Deutsche Fassung EN\_764-1:2015+A1:2016*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2016.
15. Dev Singh, D.; Mahender, T.; Raji Reddy, A. Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings* **2020**, doi:10.1016/j.matpr.2020.08.415.

16. Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R. Direct generation of metal parts and tools by selective laser powder remelting (SLPR). In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. ICALEO® '98: Proceedings of the Laser Materials Processing Conference, Orlando, Florida, USA, November 16–19, 1998; Laser Institute of America, 1998; E31-E37, ISBN 0-912035-58-7.
17. Rehme, O. Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. *Schriftenreihe Lasertechnik* **2010**, v.4.
18. Lutter-Günther, M.; Horn, M.; Seidel, C.; Reinhart, G. Einfluss der Korngrößenverteilung auf Fließfähigkeit und Bauteilqualität beim Laserstrahlschmelzen **2017**, 297–311, doi:10.3139/9783446454606.022.
19. Vock, S.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Kieback, B. Powders for powder bed fusion: a review. *Prog Addit Manuf* **2019**, 4, 383–397, doi:10.1007/s40964-019-00078-6.
20. Röttger, A.; Geenen, K.; Windmann, M.; Binner, F.; Theisen, W. Comparison of microstructure and mechanical properties of 316 L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material. *Materials Science and Engineering: A* **2016**, 678, 365–376, doi:10.1016/j.msea.2016.10.012.
21. Sutton, A.T.; Kriewall, C.S.; Karnati, S.; Leu, M.C.; Newkirk, J.W.; Everhart, W.; Brown, B. Evolution of AISI 304L stainless steel part properties due to powder recycling in laser powder-bed fusion. *Additive Manufacturing* **2020**, 36, 101439, doi:10.1016/j.addma.2020.101439.
22. Yang, X.; Ren, Y.-j.; Liu, S.-f.; Wang, Q.-j.; Shi, M.-j. Microstructure and tensile property of SLM 316L stainless steel manufactured with fine and coarse powder mixtures. *J. Cent. South Univ.* **2020**, 27, 334–343, doi:10.1007/s11771-020-4299-9.
23. Khorasani, M.; Ghasemi, A.H.; Awan, U.S.; Singamneni, S.; Littlefair, G.; Farabi, E.; Leary, M.; Gibson, I.; Veetil, J.K.; Rolfe, B. On the role of process parameters on melt-pool temperature and tensile properties of stainless steel 316L produced by powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology* **2021**, 12, 2438–2452, doi:10.1016/j.jmrt.2021.04.043.
24. Ahmadi, A.; Mirzaeifar, R.; Moghaddam, N.S.; Turabi, A.S.; Karaca, H.E.; Elahinia, M. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. *Materials & Design* **2016**, 112, 328–338, doi:10.1016/j.matdes.2016.09.043.
25. Yakout, M.; Elbestawi, M.A.; Veldhuis, S.C. Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Journal of Materials Processing Technology* **2019**, 266, 397–420, doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.11.006.
26. Liverani, E.; Toschi, S.; Ceschini, L.; Fortunato, A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* **2017**, 249, 255–263, doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042.
27. Guan, K.; Wang, Z.; Gao, M.; Li, X.; Zeng, X. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. *Materials & Design* **2013**, 50, 581–586, doi:10.1016/j.matdes.2013.03.056.

28. Röttger, A.; Boes, J.; Theisen, W.; Thiele, M.; Esen, C.; Edelmann, A.; Hellmann, R. Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices. *Int J Adv Manuf Technol* **2020**, *108*, 769–783, doi:10.1007/s00170-020-05371-1.
29. Qiu, C.; Kindi, M.A.; Aladawi, A.S.; Hatmi, I.A. A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 7785, doi:10.1038/s41598-018-26136-7.
30. Kurzynowski, T.; Gruber, K.; Stopyra, W.; Kuźnicka, B.; Chlebus, E. Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* **2018**, *718*, 64–73, doi:10.1016/j.msea.2018.01.103.
31. Yakout, M.; Elbestawi, M.A.; Veldhuis, S.C. On the characterization of stainless steel 316L parts produced by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol* **2018**, *95*, 1953–1974, doi:10.1007/s00170-017-1303-0.
32. Casati, R.; Lemke, J.; Vedani, M. Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Science & Technology* **2016**, *32*, 738–744, doi:10.1016/j.jmst.2016.06.016.
33. Marattukalam, J.J.; Karlsson, D.; Pacheco, V.; Beran, P.; Wiklund, U.; Jansson, U.; Hjörvarsson, B.; Sahlberg, M. The effect of laser scanning strategies on texture, mechanical properties, and site-specific grain orientation in selective laser melted 316L SS. *Materials & Design* **2020**, *193*, 108852, doi:10.1016/j.matdes.2020.108852.
34. Suryawanshi, J.; Prashanth, K.G.; Ramamurty, U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* **2017**, *696*, 113–121, doi:10.1016/j.msea.2017.04.058.
35. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN/TS 17026:2020-10, Unbefeuerte Druckbehälter - Zusätzliche Anforderungen an additiv gefertigte Druckgeräte und deren Bauteile*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2020.
36. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN SPEC 17071:2019-12, Additive Fertigung - Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2019.
37. Yakout, M.; Elbestawi, M.A.; Veldhuis, S.C. A study of thermal expansion coefficients and microstructure during selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Additive Manufacturing* **2018**, *24*, 405–418, doi:10.1016/j.addma.2018.09.035.
38. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 50125:2016-12, Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2016.
39. Koch, C. Normung für neue Technologien am Beispiel Additiver Fertigung: Normen und Standards für die digitale Transformation. In ; Mangelsdorf, A., Weiler, P., Eds.; De Gruyter Oldenbourg, 2019; pp 18–36.
40. Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* **2016**, *117*, 371–392, doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019.
41. Zhong, Y.; Liu, L.; Wikman, S.; Cui, D.; Shen, Z. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *Journal of Nuclear Materials* **2016**, *470*, 170–178, doi:10.1016/j.jnucmat.2015.12.034.

42. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 6892-1:2020-06, Metallische Werkstoffe - Zugversuch- Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2020.
43. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 15305:2009-01, Zerstörungsfreie Prüfung\_ - Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen; Deutsche Fassung EN\_15305:2008*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
44. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 66137-3:2019-03, Bestimmung der Dichte fester Stoffe\_ - Teil\_3: Gasauftriebsverfahren*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
45. Carlton, H.D.; Haboub, A.; Gallegos, G.F.; Parkinson, D.Y.; MacDowell, A.A. Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* **2016**, *651*, 406–414, doi:10.1016/j.msea.2015.10.073.
46. Di Wang; Song, C.; Yang, Y.; Bai, Y. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials & Design* **2016**, *100*, 291–299, doi:10.1016/j.matdes.2016.03.111.
47. Hitzler, L.; Hirsch, J.; Heine, B.; Merkel, M.; Hall, W.; Öchsner, A. On the Anisotropic Mechanical Properties of Selective Laser-Melted Stainless Steel. *Materials (Basel)* **2017**, *10*, doi:10.3390/ma10101136.
48. Zhou, B.; Xu, P.; Li, W.; Liang, Y.; Liang, Y. Microstructure and Anisotropy of the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals* **2021**, *11*, 775, doi:10.3390/met11050775.
49. Verein Deutscher Ingenieure e.V. *VDI 3405 Blatt 3.2, Additive Fertigungsverfahren - Gestaltungsempfehlungen - Prüfkörper und Prüfmerkmale für limitierende Geometrieelemente*, 2019.
50. Verband der TÜV. *AD 2000 Regelwerk: Taschenbuch-Ausgabe 2021*, 13. Auflage, Stand: Dezember 2021; Beuth: Berlin, 2022, ISBN 9783410309512.
51. Lehmhus, D.; Aumund-Kopp, C.; Petzoldt, F.; Godlinski, D.; Haberkorn, A.; Zöllmer, V.; Busse, M. Customized Smartness: A Survey on Links between Additive Manufacturing and Sensor Integration. *Procedia Technology* **2016**, *26*, 284–301, doi:10.1016/j.protcy.2016.08.038.
52. Stoll, P. *Functionality integration in powder bed based additive manufacturing processes*; ETH Zurich, 2020.
53. *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*; Klahn, C.; Meboldt, M., Eds.; Springer: Cham, 2018, ISBN 9783319668666.
54. Havermann, D.; Mathew, J.; MacPherson, W.N.; Maier, R.R.J.; Hand, D.P. Temperature and Strain Measurements With Fiber Bragg Gratings Embedded in Stainless Steel 316. *J. Lightwave Technol.* **2015**, *33*, 2474–2479, doi:10.1109/JLT.2014.2366835.
55. Töppel, T.; Lausch, H.; Brand, M.; Hensel, E.; Arnold, M.; Rotsch, C. Structural Integration of Sensors/Actuators by Laser Beam Melting for Tailored Smart Components. *JOM* **2018**, *70*, 321–327, doi:10.1007/s11837-017-2725-8.
56. Dani, I. Smart components by additive technologies. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2019**, *480*, 12016, doi:10.1088/1757-899x/480/1/012016.

57. Gerstler, W.D.; Erno, D. Introduction of an additively manufactured multi-furcating heat exchanger. In *Proceedings of the Sixteenth InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2017*, May 30-June 2, 2017, Orlando (Lake Buena Vista), FL, USA. 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, 5/30/2017 - 6/2/2017; IEEE: Piscataway, NJ, 2017; pp 624–633, ISBN 978-1-5090-2994-5.
58. Bici, M.; Brischetto, S.; Campana, F.; Ferro, C.G.; Seclì, C.; Varetto, S.; Maggiore, P.; Mazza, A. Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing. *Procedia CIRP* **2018**, *67*, 215–220, doi:10.1016/j.procir.2017.12.202.
59. Maloney, K.J.; Fink, K.D.; Schaedler, T.A.; Kolodziejka, J.A.; Jacobsen, A.J.; Roper, C.S. Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2012**, *55*, 2486–2493, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.011.
60. Peng, Y.; Liu, W.; Liu, B.; Llu, J.; Huang, K.; Wang, L.; Chen, W. The performance of the novel vapor chamber based on the leaf vein system. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2015**, *86*, 656–666, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.126.
61. Sixel, W.; Liu, M.; Nellis, G.; Sarlioglu, B. Cooling of Windings in Electric Machines via 3D Printed Heat Exchanger. In *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 Sep. 2018; IEEE, 2018 - 2018; pp 229–235, ISBN 978-1-4799-7312-5.
62. Peng, H.; Gao, F.; Hu, W. *Design, Modeling and Characterization on Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers with Additive Manufacturing*, 2019.
63. Fasano, M.; Ventola, L.; Calignano, F.; Manfredi, D.; Ambrosio, E.P.; Chiavazzo, E.; Asinari, P. Passive heat transfer enhancement by 3D printed Pitot tube based heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2016**, *74*, 36–39, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.012.
64. Xu, J.; Wu, Y.; Wang, L.; Li, J.; Yang, Y.; Tian, Y.; Gong, Z.; Zhang, P.; Nutt, S.; Yin, S. Compressive properties of hollow lattice truss reinforced honeycombs (Honeytubes) by additive manufacturing: Patterning and tube alignment effects. *Materials & Design* **2018**, *156*, 446–457, doi:10.1016/j.matdes.2018.07.019.
65. Maconachie, T.; Leary, M.; Lozanovski, B.; Zhang, X.; Qian, M.; Faruque, O.; Brandt, M. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* **2019**, *183*, 108137, doi:10.1016/j.matdes.2019.108137.
66. Cao, X.; Duan, S.; Liang, J.; Wen, W.; Fang, D. Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section. *International Journal of Mechanical Sciences* **2018**, *145*, 53–63, doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006.
67. Josten, A.; Höfemann, M. Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering. *Weld World* **2020**, *64*, 1449–1458, doi:10.1007/s40194-020-00959-3.

68. Zhu, H.; Xu, W.; Luo, Z.; Zheng, H. Finite Element Analysis on the Temperature- Dependent Burst Behavior of Domed 316L Austenitic Stainless Steel Rupture Disc. *Metals* **2020**, *10*, 232, doi:10.3390/met10020232.
69. Achenbach, M.; Edler, J.; Hellmig, R.J.; Mattheck, C.; Moldenhauer, H.; Sachs, W.; Tesari, I. *Entwicklung von effizienten, einfach anzuwendenden Konstruktionsprinzipien für technische Bauteile nach dem Vorbild der Natur*, 2011.
70. Song, X.; Cui, L.; Cao, M.; Cao, W.; Park, Y.; Dempster, W.M. A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel. *Energy Conversion and Management* **2014**, *81*, 407–419, doi:10.1016/j.enconman.2014.02.021.
71. Veto, C.C.; Cawthon, A.C.; Barackman, V.J.; Lopez, A.; Lozano, M.E.; Grayson, G.D. Design and Test of Additively Manufactured Check Valves and Pressurization Diffusers. *IJMMM* **2018**, *6*, 199–207, doi:10.18178/ijmmm.2018.6.3.376.
72. Verein Deutscher Ingenieure e.V. *VDI 2225 Blatt 1, Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung*, 1997.
73. Bürgel, R. *Werkstoffmechanik: Bauteile Sicher Beurteilen und Werkstoffe Richtig Einsetzen*, 2nd ed.; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH: Wiesbaden, 2014, ISBN 9783658039356.
74. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 323-1:1974-08, Normzahlen und Normzahlreihen; Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
75. Kerntechnische Ausschus. *KTA 3206:2014 11, Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken*, 2014.
76. Läßle, V. *Einführung in die Festigkeitslehre: Lehr- und Übungsbuch*, 3., verbesserte und erweiterte Auflage, 2011; Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden: Wiesbaden, 2012, ISBN 9783834882813.
77. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 12737:2011-04, Metallische Werkstoffe - Bestimmung der Bruchzähigkeit (ebener Dehnungszustand)*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2011.
78. *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile: Aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*; Rennert, R.; Kullig, E.; Vormwald, M.; Esderts, A.; Siegele, D., Eds., 6., überarbeitete Ausgabe; VDMA Verlag GmbH: Frankfurt am Main, 2012, ISBN 9783816306054.
79. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 148-1:2017-05, Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy\_- Teil\_1: Prüfverfahren (ISO\_148-1:2016); Deutsche Fassung EN\_ISO\_148-1:2016*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
80. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 3651-2:1998-08, Ermittlung der Beständigkeit nichtrostender Stähle gegen interkristalline Korrosion\_- Teil\_2: Nichtrostende austenitische und ferritisch-austenitische (Duplex)-Stähle; Korrosionsversuch in schwefelsäurehaltigen Medien (ISO\_3651-2:1998); Deutsche Fassung EN\_ISO\_3651-2:1998*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
81. Scheithauer, U.; Kordaß, R.; Noack, K.; Eichenauer, M.; Hartmann, M.; Abel, J.; Ganzer, G.; Lordick, D. *Potentials and Challenges of Additive Manufacturing Technologies for Heat Exchanger*, 2018, ISBN 978-1-78985-073-4.

82. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 17635:2017-04, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen\_ - Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe (ISO\_17635:2016); Deutsche Fassung EN\_ISO\_17635:2016*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
83. Ilschner, B.; Singer, R.F. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-01733-9.
84. Xie, S.; Zhang, L.; Zhao, Y.; Wang, X.; Kong, Y.; Ma, Q.; Chen, Z.; Uchimoto, T.; Takagi, T. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects. *NDT & E International* **2020**, *111*, 102211, doi:10.1016/j.ndteint.2019.102211.
85. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 17637:2017-04, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen\_ - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen (ISO\_17637:2016); Deutsche Fassung EN\_ISO\_17637:2016*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
86. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 6507-1:2018-07, Metallische Werkstoffe\_ - Härteprüfung nach Vickers\_ - Teil\_1: Prüfverfahren (ISO\_6507-1:2018); Deutsche Fassung EN\_ISO\_6507-1:2018*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
87. Grosse, C. *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*, 1996.
88. Tamari, S.; Aguilar-Chávez, A. Optimum Design of Gas Pycnometers for Determining the Volume of Solid Particles. *J. Test. Eval.* **2005**, *33*, 12674, doi:10.1520/JTE12674.
89. Spieß, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R.; Behnken, H.; Genzel, C. *Moderne Röntgenbeugung: Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*, 3., überarbeitete Auflage; Springer Spektrum: Wiesbaden, 2019, ISBN 9783834882325.
90. Taylor, H.C.; Garibay, E.A.; Wicker, R.B. Toward a common laser powder bed fusion qualification test artifact. *Additive Manufacturing* **2021**, *39*, 101803, doi:10.1016/j.addma.2020.101803.
91. Spierings, A.B.; Schneider, M.; Eggenberger, R. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal* **2011**, *17*, 380–386, doi:10.1108/13552541111156504.
92. *Fertigungstechnik*; Fritz, A.H., Ed., 12. Aufl. 2018; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2018, ISBN 9783662565353.
93. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO/ASTM 52941:2022-02, Additive Fertigung\_ - Systemleistung und Betriebssicherheit\_ - Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlanlagen für metallische Werkstoffe in Luft- und Raumfahrtanwendungen (ISO/ASTM 52941:2020); Deutsche Fassung EN\_ISO/ASTM 52941:2020*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
94. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 11554:2017-12, Optik und Photonik\_ - Laser und Laseranlagen\_ - Prüfverfahren für Leistung, Energie und Kenngrößen des Zeitverhaltens von Laserstrahlen (ISO\_11554:2017); Deutsche Fassung EN\_ISO\_11554:2017*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.

95. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 11146-1:2021-11, Laser und Laseranlagen\_ - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen\_ - Teil\_1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen (ISO\_11146-1:2021); Deutsche Fassung EN\_ISO\_11146-1:2021*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
96. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 22827-2:2006-02, Abnahmeprüfungen für Nd:YAG-Laserstrahlschweißmaschinen\_ - Maschinen mit Versorgung durch Lichtleiter\_ - Teil\_2: Mechanische Bewegungseinrichtung (ISO\_22827-2:2005); Deutsche Fassung EN\_ISO\_22827-2:2005*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
97. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO/ASTM 52911-1:2020-05, Additive Fertigung\_ - Konstruktion\_ - Teil\_1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (ISO/ASTM 52911-1:2019); Deutsche Fassung EN\_ISO/ASTM 52911-1:2019*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
98. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO/ASTM 52902:2022-01, Additive Fertigung\_ - Testkörper\_ - Geometrische Leistungsbewertung additiver Fertigungssysteme (ISO/ASTM DIS\_52902:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN\_ISO/ASTM 52902:2021*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
99. Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 13018:2016-06, Zerstörungsfreie Prüfung\_ - Sichtprüfung\_ - Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN\_13018:2016*; Beuth Verlag GmbH: Berlin.
100. Mahmoodkhani, Y.; Ali, U.; Imani Shahabad, S.; Rani Kasinathan, A.; Esmaeilzadeh, R.; Keshavarzkermani, A.; Marzbanrad, E.; Toyserkani, E. On the measurement of effective powder layer thickness in laser powder-bed fusion additive manufacturing of metals. *Prog Addit Manuf* **2019**, *4*, 109–116, doi:10.1007/s40964-018-0064-0.