



UNIVERSITÄT  
DES  
SAARLANDES



---

# **Sono-L-PBF: Entwicklung und Qualifikation von schallunterstütztem Laser Powder-Bed Fusion von AlSi10Mg**

Dissertation zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät an  
der Universität des Saarlandes

---

angefertigt am Lehrstuhl für Fertigungstechnik  
unter der Leitung von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

von

**Oliver Maurer**

2024

*Tag des Kolloquiums:*

15.11.2024

*Dekan:*

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

*Berichterstatter:*

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

*Vorsitz:*

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

*Akad. Mitarbeiter:*

Dr.-Ing. Sarah Fischer

*"Like Hippocrates I can affirm  
that the method of science is an appliance  
that emancipates us from dogma and slant and bias"*

***Never let go of the microscope***  
**Enter Shikari - The Mindsweep (2015)**

# Danksagung

In erster Linie gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre, für die Möglichkeit, an seinem Lehrstuhl zu forschen und sich mit einer so interessanten Themenstellung beschäftigen zu dürfen. Außerdem möchte ich mich für seine Unterstützung in jeglicher Form bedanken.

Danke auch an die Herren Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann, Inhaber des Lehrstuhls für Leichtbausysteme an der Universität des Saarlandes und Institutsleiter des Fraunhofer IZfP in Saarbrücken, sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler, Inhaber der Professur Additive Fertigung als Teil des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung an der TU Bergakademie Freiberg, für die bereitwillige Übernahme der Begutachtung der Arbeit und das damit verbundene Interesse am Thema.

Auch allen Mitarbeitenden des Lehrstuhls für Fertigungstechnik - wissenschaftlich sowie technisch - möchte ich danken für die zahlreichen Diskussionen, Anregungen und Hilfestellungen während der Durchführung der Untersuchungen. Diese haben meine Arbeit ebenso unterstützt und bereichert wie alle Studierenden, die ihren Abschlussarbeiten oder ihren Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskräfte im Technologiebereich Additive Fertigung nachgegangen sind.

Meiner Familie und meinen Freunden, insbesondere meiner Kollegin und Ehefrau, Frau Franziska Maurer, die mir während meines Studiums und während der Erstellung der Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben, möchte ich ebenfalls meinen besonderen Dank aussprechen.

---

## Im Rahmen der Promotion betreute und co-betreute Arbeiten

- *Bachelorprojekt* Y. Künstle: Erprobung der Methodik zur Erstellung einer systematischen Übersichtsarbeit nach Cooper im Kontext des Nachhaltigkeitsanspruchs von Selektivem Laserschmelzen, 2022.
- *Bachelorprojekt* C. Klein: Einfluss von Stützstrukturen auf die Qualität additiv gefertigter Gitter aus AlSi10Mg, 2024.
- *Bachelorarbeit* J. Li: Aufbau und Verifikation eines phänomenologischen Prozessmodells zum Selective Laser Melting von AlSi10Mg mittels multivariater Regression, 2021.
- *Bachelorarbeit* Y. Künstle: Nachhaltigkeit metallisch-additiver Fertigung: Konzeption und Durchführung einer wissenschaftlichen Studie im Kontext industrieller Anwendung und Produktion, 2023.
- *Bachelorprojekt* T. Trodler: Untersuchungen zum mechanischen Verhalten additiv gefertigter AlSi10Mg-Proben im quasistatischen Belastungsfall als Vorarbeit zur Ermüdungsanalyse, 2022.
- *Bachelorarbeit* T. Trodler: Systematische Analyse der Eigenschaften additiv gefertigter Gitterstege mit Ansätzen der Monte-Carlo Simulation und der statistischen Versuchsplanung, 2023.
- *Masterseminar* T. Rank: Eigenschaftsvorhersage von mittels Selektivem Laserschmelzen hergestellten Bauteilen anhand einer mathematisch-statistischen Methode und Gegenüberstellung mit anderen Modellierungsansätzen, 2022.
- *Projektarbeit* P. Detchart: Selective Laser Melting of AlSi10Mg alloy: Influence of the process parameters and heat treatment on the porosity, 2022.
- *Masterarbeit* V. Gasanova: Erarbeitung und Anwendung einer standardisierten Pulvercharakterisierung in der laseradditiven, pulverbettbasierten Fertigung von Metallen, 2022.
- *Masterarbeit* T. Rank: Bildung von Regressionsmodellen zur Parameterwahl beim Selektivem Laserschmelzen und Entwicklung eines auf dieser Modellierung basierenden Software-Tools, 2022.
- *Masterarbeit* H. Jacob: Wertstromanalyse und Wertstromdesign in der Additiven Fertigung: Materialeffizienz und Erschließen von Recyclingpotentialen des Selektivem Laser Schmelzens, 2022.

- *Masterarbeit* J. Theis: Quantifizierung der geometrischen Komplexität konventionell und additiv gefertigter Werkstücke sowie Untersuchung der Effektivität der Nachbearbeitung additiv gefertigter Metallbauteile mit Hilfe des Trommelgleit-schleifens, 2023.

## Während der Promotionszeit erstellte Veröffentlichungen

- *Journal-Paper* **O. Maurer**, H. Liborius, C. Rauch, D. Bähre, A. Schubert: Influence of Cutting Speed in Turning and Force in Subsequent Diamond Smoothing on Magnetic Properties of Steel 100Cr6, *Metals*, vol. 7(11), page 1131, 2021.
- *Journal-Paper* **O. Maurer**, F. Herter, D. Bähre: The impact of manufacturing parameters on corrosion resistance of additively manufactured AlSi10Mg-samples: A design of experiments approach, *Manufacturing Letters*, vol. 34, pages 29-33, 2022.
- *Journal-Paper* **O. Maurer**, F. Herter, D. Bähre: Tolerancing the laser powder bed fusion process based on machine capability measures with the aim of process control. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 80, pages 659-665, ISSN 1526-5125, 2022.
- *Konferenz-Paper* C. Rauch, **O. Maurer**, S.-E. Lang, D. Bähre: Serious games in academic education - A multi-dimensional sustainability analysis of additive versus conventional manufacturing technologies in a fictitious enterprise project. 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing 2022, Berlin, Germany, 2022.
- *Software* LPBForecast - Software zur Vorhersage von Eigenschaften mittels L-PBF hergestellter Bauteile aus AlSi10Mg, URL: <https://www.uni-saarland.de/lehrstuhl/baehre/forschung/lpbforecast-software-zur-eigenschaftsvorhersage-fuer-additiv-gefertigtes-aluminium.html>, 2023.
- *Poster mit DGM-Posterpreis* **O. Maurer**, D. Bähre: TripleAM - Acoustically Assisted Additive Manufacturing, DGM Regionalforum Saar 2024.
- *Zeitschriftenartikel* **O. Maurer**, D. Bähre: TripleAM-Technologie auf Basis von Laser Powder-Bed Fusion verbessert Bauteileigenschaften aus AlSi10Mg, *Werkstoffe in der Fertigung*, vol. 1, page 25-26, 2024.
- *Journal-Paper* L. Kollmannsperger, **O. Maurer**, R. Kose, A. Zeuner, D. Bähre, S. Fischer: Acoustic emission of lattice structures under cycling loading relates process parameters with fatigue properties, *Springer Nature Communications Engineering*, vol. 3, article no. 54, 2024.
- *Journal-Paper* **O. Maurer**, H. Jacob, D. Bähre: Reuse of smoulder in Laser Powder-Bed Fusion of AlSi10Mg – powder characterization and sample analysis, *Powders*, vol. 3(2), pp. 154-167, 2024.

- *Journal-Paper* **O. Maurer**, D. Bähre: Acoustically Assisted Additive Manufacturing by Laser Powder-Bed Fusion of AlSi10Mg, zur Publikation eingereicht bei CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024.
- *Journal-Paper* **O. Maurer**, D. Bähre: Parameter adjustment to Acoustically Assisted Additive Manufacturing by Laser Powder-Bed Fusion of AlSi10Mg, zur Publikation eingereicht bei CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024.

---

## Kurzzusammenfassung

Additive Fertigungsverfahren von Metallen wie Laser Powder-Bed Fusion bieten gegenüber konventionellen Verfahren mehr geometrische Gestaltungsfreiheiten und bringen teils verbesserte Materialeigenschaften hervor. Dennoch weisen die Bauteile immer Porositäten, raue Oberflächen, anisotrope Gefüge und geometrische Ungenauigkeiten auf, die die industrielle Nutzung der Additiven Fertigung hemmen. Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, um mittels Schallunterstützung alle genannten Hemmnisse zu reduzieren oder ganz auszuräumen. Dabei wirkt der Schall im Prozess durch Pulverbettverdichtung und Oszillation der Schmelze. Nach einer umfassenden Maschinenanpassung sowie Auslegung eines geeigneten Schallwandlers ermöglicht Sono-L-PBF den experimentellen Beleg von relativen Dichten bis zu 100%, deutlich verringerten Partikelanhaftungen an Oberflächen insbesondere im Downskinbereich, weniger anisotropen Gefügen und teilweise verbesserten geometrischen Genauigkeiten. Für Sono-L-PBF von AlSi10Mg liegt nun ein funktionsfähiger Aufbau mit einem an die Beschallung angepassten Parametersatz vor.

## Abstract

Additive manufacturing technologies for metals like Laser Powder-Bed Fusion offer more geometric design freedom than conventional processes and in some cases produce improved material properties. Nevertheless, the parts always exhibit porosities, rough surfaces, anisotropic microstructures and geometric inaccuracies that inhibit the industrial use of additive manufacturing. This contribution presents an approach that uses acoustic assistance to reduce or eliminate all of these obstacles. In-process sonication acts through powder-bed compaction and oscillation of the molten phase. Following comprehensive machine adaptation and the design of a suitable transducer, Sono-L-PBF provides experimental evidence of relative densities of up to 100%, significantly reduced particle adhesion to surfaces, particularly in the downskin area, less anisotropic microstructures and, in some cases, improved geometric accuracies. A functional setup with a parameter set adapted to sonication is now available for Sono-L-PBF of AlSi10Mg.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Verzeichnis verwendeter Formelsymbole und Abkürzungen</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problemstellung und thematische Einordnung</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen des Sono-L-PBF</b>	<b>8</b>
3.1	Additive Fertigungsverfahren . . . . .	8
3.1.1	Bedeutung Additiver Fertigung für Industrie 4.0 und technische Anwendung . . . . .	9
3.1.2	Laser Powder-Bed Fusion als metalladditives Fertigungsverfahren	12
3.1.3	Stützstrukturen im L-PBF . . . . .	15
3.1.4	Materialwissenschaftlich-mikroskopische Betrachtung des L-PBF- Prozesses . . . . .	17
3.1.5	Das System AISi10Mg . . . . .	21
3.1.6	Pulverqualität und -charakterisierung . . . . .	22
3.1.7	Qualitätsmerkmale von L-PBF-Teilen . . . . .	26
3.2	Hybride Fertigung mit Schallunterstützung . . . . .	31
3.2.1	Schallunterstützung additiver Verfahren . . . . .	32
3.2.2	Physikalische Grundlagen der Akustik . . . . .	35
3.3	Charakterisierung von Fertigungsprozessen durch statistische Versuchs- planung . . . . .	38
3.4	Identifikation des Forschungsbedarfs . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Entwicklungsbausteine zur Schallunterstützung</b>	<b>42</b>
4.1	Motivation von Sono-L-PBF . . . . .	42
4.2	Entwicklungsziele . . . . .	44
4.3	Aufbau des Arbeitsprogramms . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Umzurüstende Maschine und qualifizierende Fertigungsmesstechnik</b>	<b>46</b>
5.1	Baujobvorbereitung . . . . .	46
5.2	L-PBF-Anlagentechnik . . . . .	47
5.3	Simulationen . . . . .	50
5.4	Pulvercharakterisierung . . . . .	50
5.5	Testkörpergeometrien . . . . .	58
5.6	Rauheitsmessung . . . . .	60

---

5.7	Dichtemessung . . . . .	62
5.7.1	Archimedische Dichtemessung . . . . .	62
5.7.2	Röntgen-CT . . . . .	63
5.8	Messung von Maßhaltigkeit, Form und Lage . . . . .	63
5.9	Metallographische Präparation und Mikroskopie . . . . .	66
5.10	Statistische Datenbehandlung und Fehlerabschätzung . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Theoretische Vorüberlegungen und Simulationen zur Schallunterstützung</b>	<b>68</b>
6.1	Theoretische Vorüberlegungen zum Schalleinsatz beim L-PBF . . . . .	68
6.1.1	Folgen aus der Verdichtung des Pulverbetts . . . . .	69
6.1.2	Folgen aus der Beschallung der Schmelzphase . . . . .	71
6.1.3	Potentielle Risiken für den Sono-L-PBF-Prozess . . . . .	75
6.2	Simulation der Schallausbreitung in Pulverbett und Bauteil . . . . .	76
6.2.1	Aufbau und Validierung der Simulation . . . . .	76
6.2.2	Geometrieauswahl der Substrates . . . . .	79
6.2.3	Ergebnisse aus der Simulation des Pulverbetts . . . . .	81
6.2.4	Ergebnisse aus der Simulation des Bauteils . . . . .	82
6.3	Fazit aus den theoretischen Vorüberlegungen und Simulationen . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Experimentelle Analyse von Prozesselementen des L-PBF</b>	<b>84</b>
7.1	Pulvercharakterisierung . . . . .	84
7.1.1	Morphologie . . . . .	84
7.1.2	Partikelgrößenverteilung . . . . .	85
7.1.3	Fließfähigkeit . . . . .	87
7.1.4	Schüttdichte . . . . .	88
7.1.5	Pulverdämpfung . . . . .	88
7.2	Einfluss der Substratplattenheizung . . . . .	91
7.3	Zusammenfassende Betrachtung der Prozesselemente . . . . .	95
<b>8</b>	<b>Validierung der Vorüberlegungen und Umrüstung auf Sono-L-PBF</b>	<b>97</b>
8.1	Grundlegende Pulverbeschallungsexperimente . . . . .	97
8.1.1	Beschallung mit hochintensivem Ultraschall . . . . .	97
8.1.2	Beschallung im Ultraschallbad . . . . .	98
8.2	Wanderauslegung . . . . .	103
8.2.1	Auslenkung und Frequenzbereich . . . . .	103
8.2.2	Schalleistung . . . . .	108
8.2.3	Temperaturbeständigkeit . . . . .	108
8.2.4	Finale Wanderauswahl . . . . .	110

---

8.3	Konstruktive Anpassung der Maschinenteknik . . . . .	111
8.3.1	Wandlersteuerung und -überwachung . . . . .	112
8.3.2	Leistungsübertragung an die Maschine . . . . .	115
8.3.3	Leistungsübertragung an den Bauraum . . . . .	120
8.3.4	Anpassungen zur Kabelführung . . . . .	121
8.3.5	Komponenten der Umrüstung . . . . .	122
8.4	Abgleich der Pulverbeschallung im repräsentativen Sono-L-PBF-Aufbau	124
8.5	Zusammenbau des Aufbaus in der L-PBF-Maschine . . . . .	127
8.6	Pulverbeschallung im fertig umgerüsteten Aufbau . . . . .	129
8.7	Fazit aus der Umrüstung auf Sono-L-PBF . . . . .	133
<b>9</b>	<b>Qualifizierung von Sono-L-PBF</b>	<b>134</b>
9.1	Einfluss verschiedener Beschallungsmodi . . . . .	134
9.2	Auswahl des für AlSi10Mg am besten geeigneten Beschallungsmodus .	144
9.3	L-PBF-seitige Parametervariation . . . . .	145
9.4	Bewertung des umgerüsteten Sono-L-PBF-Systems . . . . .	156
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>181</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>186</b>
	<b>Anhang</b>	<b>195</b>



# 1 Verzeichnis verwendeter Formelsymbole und Abkürzungen

## Formelsymbole

Symbol	Größe	Einheit
$a$	Schallbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$A$	Fläche	$\text{mm}^2$
$a_C$	kritische Fehlergröße in der Bruchmechanik	$\mu\text{m}$
$a_P$	Aspektverhältnis	–
$\alpha$	Lagefaktor in Central Composite Design DoE	–
$b$	Flächenbelegung von Substratplatten	%
$c_P$	spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
$d$	Spurabstand	$\text{mm}$
$D$	Wandlerdurchmesser	$\text{mm}$
$D(T)$	Diffusionskoeffizient	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$d_{10}, d_{50}, d_{90}$	Quantile der Partikelgrößenverteilung	$\mu\text{m}$
$\Delta G$	Triebkraft der freien Gibbschen Enthalpie	$\text{J}$
$\Delta x$	Abweichung der betreffenden Größe $x$	$[x]$
$d_K$	Korndurchmesser im Gefüge	$\mu\text{m}$
$d_L$	Fokusbildungsdurchmesser des Lasers	$\mu\text{m}$
$d_S$	Substratdicke	$\text{mm}$
$D_{WS}$	Werkstoffbedingte Pegeldämpfung	$\text{dB}$
$e$	Stoßzahl	–
$E$	Elastizitätsmodul	$\text{GPa}$
$E_L, E_A, E_V$	Linien-, Flächen- und Volumenenergiedichte	$\frac{\text{J}}{\text{mm}}, \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}, \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$
$E_{pot}$	Potentielle Energie	$\text{J}$
$E_{bau}$	Energie zur Herstellung eines Volumens im L-PBF	$\text{J}$
$\eta$	Verlustfaktor bei Schalldämpfung	–
$\eta_0$	Plateauviskosität der Pulverrheometrie	$\text{Pa s}$
$f$	Frequenz	$\text{Hz}$
$G$	Schubmodul	$\text{GPa}$
$\gamma$	Grenzflächenenergie	$\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$
$h$	Pulverlagendicke	$\mu\text{m}$
$H$	Hausner-Verhältnis	–
$I_S$	Schallintensität	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$K$	Spannungsintensitätsfaktor	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K_{IC}$	Risszähigkeit	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$k_B$	Boltzmannfaktor	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{K s}^2}$
$k_{het}$	Vorfaktor der heterogenen Keimbildung	–

Symbol	Größe	Einheit
$L$	Länge	m
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_L$	Wellenlänge des Lichtes	nm
$\lambda_S$	Wellenlänge von Schallwellen	$\mu\text{m}$
$L_p, L_W$	Pegel des Schalldruckes bzw. der Schalleistung	dB
$m$	Masse	kg
$M$	Beliebiger mechanischer Modul	GPa
$M^2$	Strahlqualitätsfaktor	–
$n$	Zählvariable	–
$N$	Schwingspielzahl	–
$\dot{N}$	Keimbildungsrate	–
$\omega$	Kreisfrequenz	Hz
$p$	Druck	Pa
$P$	Leistung	W
$r$	Radius	m
$r^*$	Kritischer Keimradius	$\mu\text{m}$
$R$	Krümmungsradius der Pulveroberfläche	mm
$R_a, R_z, R_{max}, R_k, R_{pk}, R_{vk}$	Rauheitskennwerte	$\mu\text{m}$
$R_{b,th}$	Theoretische Baurate	$\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$
$r_{corr}$	Korrelationskoeffizient	–
$R_{dämm}$	Pegeldämmung durch Querschnittssprünge	dB
$R_e, R_{p0,2}$	Streckgrenzen	MPa
$r_s, r_{xy}$	Reflexionskoeffizient des Schalls an Grenzflächen zwischen Medien x und y	–
$R_m$	Zugfestigkeit	MPa
$\rho$	Massendichte	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
$\rho_r$	Relative Dichte	%
$R_S$	Shunt-Widerstand	$\Omega$
$s_G(x)$	Standardabweichung bezüglich Grundgesamtheit	[x]
$s_P(x)$	Standardabweichung bezüglich Stichproben	[x]
$\sigma_V$	Grenzspannung zur Versetzungsbewegung	MPa
$T$	Absolute Temperatur	K
$\dot{T}$	Temperaturänderung über der Zeit	$\frac{\text{K}}{\text{s}}$
$t_s, t_{xy}$	Reflexionskoeffizient des Schalls an Grenzflächen zwischen Medien x und y	–
$t_{\text{Verdicht}}$	Inkubationszeit der Verdichtung	s
$\vartheta$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\Theta$	Winkel	$^{\circ}$

Symbol	Größe	Einheit
$u$	Schallauslenkung bzw. Schallamplitude	$\mu\text{m}$
$U_i$	Elektrische Spannung	V
$v$	Scangeschwindigkeit des Lasers	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
$v_L, v_T$	Geschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwellen	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
$v_S$	Geschwindigkeit einer allgemeinen Schallwelle	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
$V$	Volumen	$\text{mm}^3$
$x_i$	Wert einer Größe in Summationen	$[x]$
$\bar{x}$	Mittelwert über $x_i$	$[x]$
$x, y$	Richtungen der Beschichtungsebene im L-PBF	mm
$Y$	Geometriefaktor der Bruchmechanik	–
$Z_x$	akustische Impedanz eines Mediums $x$	MRayl
$z$	Aufbaurichtung des L-PBF ab dem Schallwandler	mm
$z'$	Aufbaurichtung des L-PBF ab dem Substrat	mm

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Additive Manufacturing / Additive Fertigung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BV	Bauraumverkleinerung
CAD	Computer Aided Design
CCD	Central Composite Design; aus DoE
CT	Computertomographie
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DoE	Statistische Versuchsplanung
EBSD	Elektronenrückstreubeugung
EN	Europäische Norm
FFF	Fused Filament Fabrication
HIP	Heiß-isostatisches Pressen
ISO	Internationale Organisation für Normung
KB	Keimbildung
KMG	Koordinatenmessgerät

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
LCS	Layer Control System
LMD	Laser Metal Deposition / Laserauftragsschweißen
LMF	Laser Metal Fusion
L-PBF	Laser Powder-Bed Fusion; Oberbegriff für DMLS, LMF, SLM
MSH	Standard-L-PBF mit Substratheizung
OSH	Standard-L-PBF ohne Substratheizung
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PET-G	Glykolfunktionalisiertes Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactic Acid
PP	Polypropylen
PS	Parametersatz
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
REM	Rasterelektronenmikroskop
SLM	Selektives Laserschmelzen
STOP-Prinzip	Substitution, Technik, Organisation, Person; aus Arbeitssicherheit
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TRLV	Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZfP	Zerstörungsfreie (Werkstoff-)Prüfung
ZTU	Zeit Temperatur Umwandlung

## 2 Problemstellung und thematische Einordnung

Technologien, die zu den Additiven Fertigungsverfahren zählen, erfahren aktuell einen wahren Hype, wie 2,02 Mio. gefundene Publikationen zum Begriff „Additive Manufacturing“ bei Google Scholar im April 2024 zeigen. Die Vorzüge und insbesondere geometrische Gestaltungsfreiheiten erklären die Einstufung des World Economic Forums, die gesamte Verfahrensklasse der Additiven Fertigung zu den zehn zukunftsreichsten Technologien zu zählen [1]. Laser Powder-Bed Fusion gehört zu den Additiven Fertigungsverfahren für Metalle und bringt geometrisch hoch komplexe, funktionsintegrierte sowie leichtbauoptimierte Bauteile hervor [1, 2], indem ein Laserstrahl nach Softwarevorgabe entlang seines Pfades Pulverpartikel zu einer Geometrie verschmilzt. Kleinserien mit hohem Individualisierungsgrad und Prototypenfertigung gehören zu den wichtigsten Anwendungsgebieten der Technologie.

Trotz aller Vorteile und Forschungsintensität muss sich die Additive Fertigung diversen Herausforderungen stellen, die in vielen Fällen wenigstens teilweise dazu führen, dass die Verfahren noch nicht in die industrielle Anwendung kommen. Neben fehlender Erfahrung des Personals und der Notwendigkeit, die Produktgestaltung neu zu überdenken, gehören vor allem hohe Prozesszeiten und Produktkosten zu den Punkten, die die Attraktivität der Additiven Fertigung schmälern. Auch im neben Zeit und Kosten dritten Punkt der Qualität, gibt es noch einige Hürden zu überwinden. Speziell die AM-Verfahren für Metalle stellen Bauteile mit vergleichsweise groben Oberflächen, mikrostruktureller Anisotropie und zum Teil erheblicher geschlossener Porosität im Inneren der Bauteile her. Bei zyklischer Belastung wirken Poren als Mikrokerbstellen [3] und führen zu einem frühen Proben- oder Bauteilversagen. Auch beim L-PBF tragen viele Porenbildungsmechanismen zur Herabsetzung der relativen Dichte bei. Zu einem gewissen Grad kann die Porenbildung unterdrückt werden, wie zahlreiche Optimierungsstudien und Ergebnisse dieser Arbeit belegen, eine vollständige Vermeidung gelingt jedoch noch nicht.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Prozesstechnik der am LFT vorhandenen L-PBF-Maschine so anzupassen, dass Porosität zuverlässig reduziert und nach Möglichkeit andere Bauteileigenschaften wie die Oberfläche und die Anisotropie im selben

Zuge ebenfalls verbessert werden. Diese Effekte soll Schall hervorrufen, der durch das Substrat eingekoppelt und so ausgelegt wird, dass sowohl das Pulverbett als auch die Schmelzphase dessen Einfluss erfahren. Im Falle des Pulverbetts geht es um die Verdichtung der Pulverschüttung, während der Schall die Keimbildung und Erstarrung in der Schmelzphase beeinflussen soll. Die Existenz entsprechender Effekte zeigen bereits Studien aus anderen AM-Technologien [4]. Es bedarf jedoch eines Transfers und einer technisch geeigneten Anpassung des Verfahrens auf L-PBF. Es besteht insofern Forschungsbedarf, als dass die Umrüstung auf Sono-L-PBF in einem ganzheitlichen Ansatz neu ist. Deshalb spannt diese Arbeit den Bogen von den bisherigen Erkenntnissen über Modellvorstellungen und einfache Simulationen auf maschinentechnische Details sowie die Planung, Auslegung und Durchführung des Maschinenumbaus bis hin zur Qualifikation des angepassten Aufbaus. Dabei spielen physikalische Grundlagen und Berechnungen eine ebenso große Rolle wie technische Abstimmungen und deren praktische Umsetzung.

# 3 Grundlagen des Sono-L-PBF

## 3.1 Additive Fertigungsverfahren

AM-Verfahren bergen dadurch große Potentiale, dass sie ohne Werkzeuge und Formen auskommen und aus formlosem Stoff wie z.B. Pulvern, Drähten oder Filamenten schichtweise ein Bauteil generieren [1]. Aus diesem Grund wird diese Verfahrensgruppe stellenweise als technische Revolution gehandelt [5]. Standardisierungsansätze gibt es bereits durch Normen der Reihe DIN 52900 sowie durch die VDI-Richtlinie 3405 und reichen von Begriffsdefinitionen bis hin zu Qualifikationen von Bauteilen und Personal [6–13].

Konventionelle Fertigungsverfahren, wie DIN 8580 sie nach Form und Zusammenhalt klassifiziert [14], scheinen den additiven Verfahren konträr gegenüber zu stehen. Tabelle 3.1 bildet die Einteilung in sechs Fertigungshauptgruppen ab. Es besteht keine eindeutige Möglichkeit, AM-Verfahren einer Hauptgruppe zuzuordnen. Je nach Einsatz der Technologie zur Herstellung von Bauteilen oder zur Reparatur [15] erscheint entweder Urformen, Beschichten oder Fügen als passend [2]. Darüber hinaus besteht eine Ähnlichkeit zu den CNC-Zerspanungsverfahren aus der Hauptgruppe Trennen aufgrund der starken Nutzung von Computersteuerung [2], jedoch gibt es technologisch bedeutende Unterschiede.

Tabelle 3.1: Hauptgruppen konventioneller Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [14]

<b>Hauptgruppe</b>	<b>Form</b>	<b>Zusammenhalt</b>
1 Urformen	Schaffen	Schaffen
2 Umformen	Ändern	Beibehalten
3 Trennen	Ändern	Vermindern
4 Fügen	Ändern	Vermehren
5 Beschichten	Ändern	Vermehren
6 Stoffeigenschaften ändern	Beibehalten	Beibehalten

Fertigungsgerechte Konstruktion spielt in der konventionellen Fertigung eine große Rolle [16], um Werkzeugpfade zu ermöglichen oder zu optimieren und um möglichst defektfreie Teile urzuformen. Die Additive Fertigung bietet zwar sehr hohe geometrische Freiheitsgrade in der Bauteilgestaltung, unterliegt aber ebenfalls Restriktionen

und Richtlinien für das Design [1, 2]. Im Vorlauf der additiven Bauteilherstellung steht die Konstruktion in einer CAD-Software und das anschließende Slicing, in dem das Modell in die einzelnen Schichten diskret aufgeteilt und ein Satz von Prozessparametern zugewiesen wird. Eine Gegenüberstellung von Vorteilen beider Fertigungskategorien findet sich in Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Vorteile konventioneller und Additiver Fertigung nach [2]

	<b>Pro AM</b>	<b>Pro konventionell</b>
Material	Unabhängig von Festigkeiten	Reproduzierbares Ergebnis
Geschwindigkeit	Verkürzung von Prozessketten	Wesentlich geringere Taktzeit insbes. für einfache Geometrien
Geometrie- komplexität	Sehr große Freiheit, aber nicht unbegrenzt	Wirtschaftlich für einfache Geometrien
Genauigkeit	Verfahrensabhängig, immer mit Anisotropie	Hoch bei angepassten Prozessen
Programmierung	Einfach, wenn Parametersätze existieren	Einfach anpassbar wegen weniger Schlüsselparameter

### 3.1.1 Bedeutung Additiver Fertigung für Industrie 4.0 und technische Anwendung

Im Fokus für die industrielle Nutzung von AM stehen insbesondere metallische Bauteile. Mit einem Wachstum von jährlich ca. 20% liegt der Markt für AM-Metalteile in den Branchen Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Automotive und sonstige Industrien [17]. Über die geometrischen Freiheitsgrade von AM hinaus benötigen die Verfahren weniger Montageschritte dank Integralbauweise [2, 18], produzieren weniger Abfall als konventionelle Technologien und stellen direkt endkonturnahe Bauteile her [19]. Herausforderungen bestehen jedoch in der zum Teil hohen Porosität, den groben Oberflächen, Anisotropien sowie Geometrie- und Orientierungsabhängigkeiten von Qualitätsmerkmalen [20].

Die hohe Flexibilisierung von Produktion oder Prototypenbau kann das Interesse der Industrie wecken [19]. Im Jahr 2021 haben 44% der deutschen Industrieunternehmen mit mehr als 100 Beschäftigten angegeben, Additive Fertigung im weitesten Sinne zu nutzen, z.B. für Muster, Formen oder Ersatzteile [18], denn sie erkennen, dass sich schichtweise aufbauende Verfahren besonders gut für Rapid Prototyping und Rapid Tooling eignen [21]. AM-Verfahren dienen im Allgemeinen den Zielen den nachfolgend genannten Rs [22, 23], auch wenn der Begriff Rapid bei langen Prozesszeiten nicht immer zutrifft und stattdessen Direct verwendet wird.



(kurz: L-PBF) können beispielsweise das Verhalten von Bauteilen aus Formgedächtnislegierungen steuern [25], was zur Funktionserfüllung von Aktoren in speziellen Anwendungen beiträgt. Mehr und mehr sicherheitsrelevante Bauteile können additiv gefertigt werden. Für die Luftfahrt hat ein L-PBF-Strukturbauteil im Enteisungssystem 2022 die Zulassung erhalten und mit Lufthansa einen namhaften Kunden gewonnen [18]. Die sicherheitstechnischen Anforderungen lassen sich nach DIN 65124 in drei Klassen absteigender Sicherheitsrelevanz einteilen [17]. Klasse 1 bedeutet, dass ein Bauteilversagen zum Verlust von Hauptkomponenten führt, direkt Menschenleben gefährdet und ist auch für additiv gefertigte Bauteile höchster Güte vorgesehen. Unter diesen sicherheitstechnischen Voraussetzungen in Verbindung mit hoher geometrischer Gestaltungsfreiheit ist die Additive Fertigung in der Lage, Massenprodukte zunehmend zu individualisieren [5]. Massenindividualisierung kann sowohl passiv durch intensive Variantenbildung des Vertriebs als auch aktiv durch eigenständiges Parametrieren und Konfigurieren durch die Kundschaft erfolgen [22].

Zunehmende Flexibilisierung der Produktion wie durch Massenindividualisierung und der stark softwarelastige Bezug Additiver Fertigung passen zu aktuellen Produktionstrends. Industrie 4.0 fasst disruptive Änderungen in der Produktionslandschaft zusammen und steht für die vierte industrielle Revolution [26], wobei dem Begriff insbesondere die Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten in Echtzeit mit dem Ziel der Wertschöpfung innewohnt. Damit geht wiederum die zunehmende Digitalisierung und Individualisierung einher [27]. Zusätzlich kann mit diesen Entwicklungen die Ersatzteilerfertigung nach Bedarf erfolgen und Maschinen können schneller wieder in Betrieb gehen [28]. Additive Fertigung profitiert von diesen Trends und kann sie darüber hinaus beflügeln. Digitale Zwillinge und zunehmende Datendurchgängigkeit können von der Produktentstehung bis zum Fertigteil in der Anwendung bei AM von technischer Seite Individualisierung bewirken [28], denn statt statistisch abgesicherter Angaben sind bestimmte Daten eines Bauteils heranzuziehen. Dazu gehört die lückenlose Rückverfolgbarkeit jedes Teils. Der AM-Prozess kann direkt und stoffschlüssig 3D-Identifikationsnummern auf Teile aufbringen und so für eine eindeutige Zuordnung sorgen. Geometrische Freiheitsgrade als Hauptargument für den Einsatz von AM [1] führen zu hoch optimierten, angepassten Strukturen, wie z.B. die Herstellung von Werkzeugen und Aufnahmen für die Zerspanung mit angepassten, innenliegenden Kühlkanälen [29]. So lange das Pulver die Kanäle verlassen kann, stellt deren Form kein Hindernis für die additive Herstellung dar.

### 3.1.2 Laser Powder-Bed Fusion als metalladditives Fertigungsverfahren

Herstellerbedingt hört das in dieser Arbeit Laser Powder-Bed Fusion (L-PBF) genannte Verfahren auf viele Namen wie beispielsweise DMLS (Markforged), SLM (Nikon SLM Solutions) oder LMF (Trumpf).

Die schichtweise Herstellung eines Bauteils auf der Basis von mikroskaligem Metallpulver mit Hilfe eines Lasers besteht beim L-PBF aus drei Schritten, die sich bis zum Fertigstellen der letzten Schicht im Bauteil wiederholen. Die Abfolge lautet:

- **Schichtauftrag:** Aufrakeln einer homogenen dünnen Pulverschicht in der vordefinierten Pulverlagendicke  $h$
- **Belichtung:** Rastern des Lasers gemäß der zu erzeugenden Geometrie über der Pulveroberfläche mit definierten Parametern Laserleistung  $P$ , Scangeschwindigkeit  $v$  und Spurbabstand zweier Laserlinien  $d$
- **Absenken der Substratplatte:** Die Substratplatte verfährt um eine Pulverlagendicke nach unten, um Raum für den nächsten Schichtauftrag freizugeben

Aus dem Ablauf folgen einige Randbedingungen für das Innere eines Bauraumes. Es muss einen Beschichter geben, der über seinem Verfahrensweg Pulver ablegt. Überschüssiges Pulver muss in Abwurfschächte fallen können. Wenn der Beschichter über zwei Kammern verfügt und in zwei Verfahrrichtungen eine Schicht auftragen kann, muss es in Beschichtrichtung auch vor und hinter dem Substrat einen solchen Schacht geben. Die Belichtung erfolgt von oben, sodass das Substrat nach unten verfährt, um immer die aktuelle Pulverschicht im Laserfokus zu platzieren. Abbildung 3.2 zeigt dazu schematisch den Bauraum der in dieser Arbeit genutzten L-PBF-Maschine.

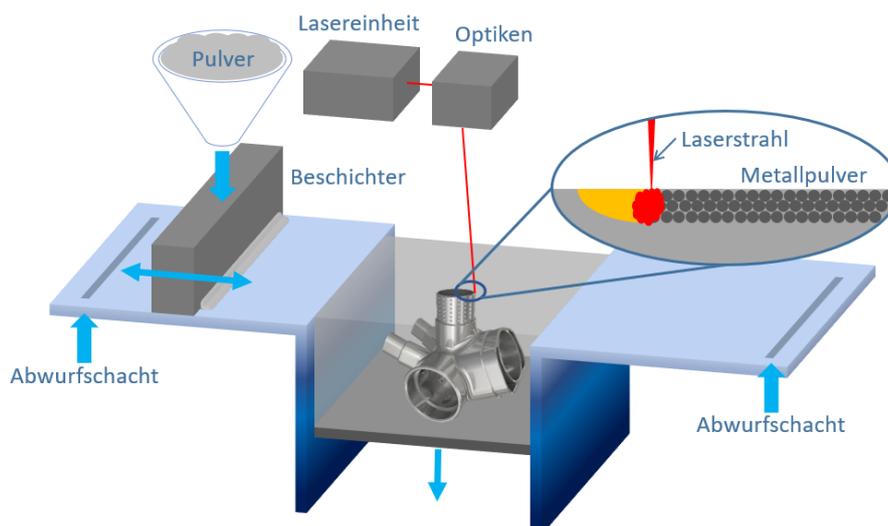


Abbildung 3.2: Schematische Skizze eines Bauraumes in einer L-PBF-Maschine, in der der Beschichter in zwei Richtungen beschichten kann

Es existieren also die Schlüsselparameter Pulverlagendicke  $h$ , Laserleistung  $P$ , Scangeschwindigkeit  $v$  und Spurabstand  $d$  [2]. Darüber hinaus gibt es jedoch noch eine große Vielzahl von anderen Einflussgrößen, die teils im Slicing, also der Unterteilung des CAD-Modells in diskrete Schichten, festgelegt werden und teils vom Pulver oder von der Maschine kommen. Die verwendete Slicing-Software Materialise Magics bietet für Parameterregime wie Upskin (nach oben gerichtete Fläche), Downskin (zum Substrat gerichtete Fläche), Kontur und Hatch (Füllbereich zwischen Konturen) insgesamt 76 Parameter [30]. Aus Vereinfachungsgründen werden Energiedichten bezüglich einer Linie  $E_L$ , der Fläche  $E_A$  oder des Volumens  $E_V$  als kollektive Größen definiert [2], die aus den vier Schlüsselparametern bestehen, sodass gilt:

$$E_L = \frac{P}{v} \quad (3.1)$$

$$E_A = \frac{P}{v d} \quad (3.2)$$

$$E_V = \frac{P}{h v d} = \frac{P}{R_{b,th}} \quad (3.3)$$

Das Produkt aus Pulverlagendicke, Scangeschwindigkeit und Spurabstand heißt theoretische Baurate  $R_{b,th}$  und gibt an, in welcher Zeit theoretisch wie schnell ein bestimmtes Volumen aufgebaut werden kann [31]. Es handelt sich hierbei um eine maximale Baugeschwindigkeit, die Zeiten für die Beschichtung oder die Abkühlung der belichteten Fläche vernachlässigt [32]. Bezüglich der Energiedichten, deren Korrelation mit der betrachteten Bauteileigenschaft variiert, lassen sich Prozessfenster abstecken, die durch qualitätsmindernde Phänomene begrenzt werden [33], siehe Abbildung 3.3.

- **Keyholing:** Starke Verdampfungserscheinungen in Kombination mit hoher Eindringtiefe des Lasers führen zu starker Porenbildung [33, 34]
- **Lack of Fusion:** Ungenügender Energieeintrag ins Pulverbett führt zum unvollständigen Aufschmelzen und zum Einlagern von Pulverpartikeln mit Porosität ins Bauteil [35].
- **Balling:** Verrundung der Schmelze durch abnehmende Benetzung [36]. Die Grenzfläche zwischen Gas und Schmelze fördert Balling, während es die Benetzung auf vorherigen Schichten hemmt.

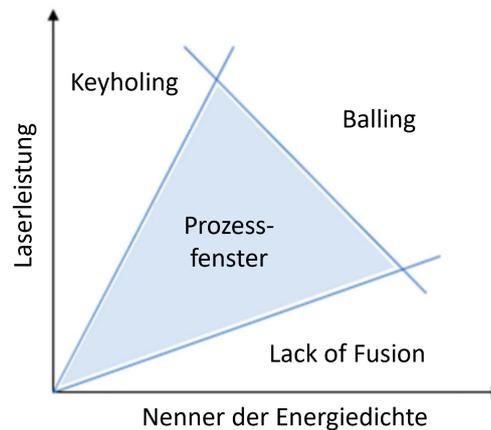


Abbildung 3.3: Schema eines L-PBF-Prozessfensters mit Begrenzung durch Mechanismen wie Keyholing, Lack of Fusion und Balling [33]

Die Prozessparameter wirken also einzeln sowie kollektiv durch den Energieeintrag auf die Bauteileigenschaften ein. Dieser Einfluss zeigt sich auch anhand der Form einzelner Schmelzspuren [37]. Die Einschweißtiefe  $\delta_h$  beim L-PBF hängt von thermischen Eigenschaften des verarbeiteten Werkstoffs, von dessen Massendichte  $\rho$ , vom Laserfokussdurchmesser  $d_L$  und von der Scangeschwindigkeit  $v$  ab. Gleichung 3.4 beinhaltet die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_P$  des Werkstoffs. Es gilt nach [2]:

$$\delta_h = \sqrt{\frac{\lambda d_L}{\rho c_P v}} \quad (3.4)$$

Daraus resultiert eine Schmelzbadtiefe im Bereich von 0,5 bis 0,8  $\delta_h$  [2]. Im Schliffbild parallel zur Aufbaurichtung zeigt sich eine fischschuppenähnliche Mesostruktur benachbarter Schmelzbäder, die durch Überlagerung vieler Schweißraupen oder Laserspuren entstehen. Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch eine solche Mesostruktur für L-PBF von AlSi10Mg.

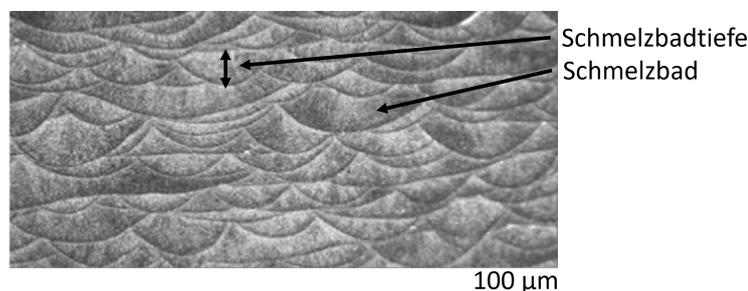


Abbildung 3.4: Mesostruktur von L-PBF-AlSi10Mg verursacht durch Schmelzspuren des Lasers im Querschliff [38]

Offensichtlich existieren diverse Parallelen zwischen der Schweißtechnik und der Additiven Fertigung, sodass einige Entlehnungen aus diesem Bereich sinnvoll erscheinen.

Zur Festlegung von Laserpfaden und Scanstrategien bietet sich der Schweißfolgeplan als Teil der umfassenden Schweißanweisung nach DIN EN 288-2 an [39], denn die Schweißfolge beeinflusst die Bildung von Eigenspannungen, Schrumpf sowie Verzügen. Passend dazu wird beispielsweise für dickwandige L-PBF-Teile eine maximale Scanvektorlänge definiert und die Fläche in einem Flickenteppichmuster abgerastert [30]. Dünnwandige Strukturen und Gitterstrukturen können davon abweichen [40].

### 3.1.3 Stützstrukturen im L-PBF

Bei Stützstrukturen, auch Supports genannt, handelt es sich um feine gitter- oder stabförmige Strukturen, die ebenfalls additiv gefertigt, aber nicht Bestandteil des hergestellten Produktes sind. Sie dienen dem Erfolg eines Baujobs und stellen einen Prozessabfall dar [41]. Zu den Hauptaufgaben zählen die mechanische, stoffschlüssige Fixierung eines Bauteils am Substrat zur Verhinderung von Verformungen und die Gewährleistung der Wärmeleitung von der Laserinzidenz weg zum Substrat hin [5], sodass Wärmestau an Querschnittssprüngen sowie resultierende Gefügestörungen in geringerem Maß auftreten oder das Gefüge durch die schnellere Wärmeabfuhr feinkörniger kristallisiert [42]. Da besonders überhängende Geometriebereiche anfällig gegenüber den Warping genannten Deformationen sind, wirken Stützstrukturen hier sowohl dem gravitationsbedingten Verzug zum Substrat als auch dem eigenspannungsbedingten Verzug nach oben entgegen [43]. Deshalb gibt es empirische Grenzwerte, ab welchem Überhangwinkel oder ab welchem Durchmesser liegender Löcher Stützstrukturen erforderlich sind [44]. Neben einer möglichst hohen Belegung des Bauraumes und einer angepassten Orientierung von Bauteilen, sodass sich die anisotropen mechanischen Eigenschaften [45] der Belastung entsprechend verteilen, muss also auch die Größe von Supportflächen am Bauteil in der Baujobvorbereitung berücksichtigt werden [43]. Zusätzlich steigert sich die Komplexität der Supportstrategie durch vielfältige Supportgeometrien [46], die die Gefügebildung und damit die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Üblicherweise bestehen Stützstrukturen aus 2,5D- oder 3D-Gitterstrukturen mit Zähnen zur Substratplatte hin [44]. Zunehmend und bauteilgeometrieabhängig etablieren sich außerdem Säulen sowie bioinspirierte Strukturen wie Bäume und Spinnennetze [47]. Die Slicing Software Materialise Magics bietet materialabhängig verschiedene Typen, die je nach Wärmeleitfähigkeit variable Grundquerschnitte aufweisen. Abbildung 3.5 illustriert gängige Supportgeometrien an einem würfelförmigen Musterbauteil.

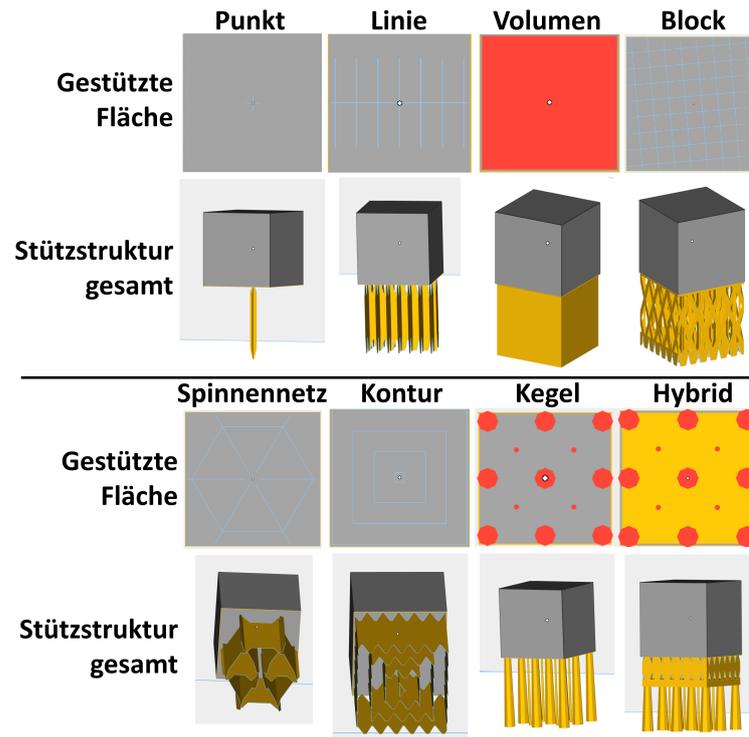


Abbildung 3.5: Beispielfähige, vergrößerte Standards für Stützstrukturen bei AlSi10Mg aus Materialise Magics; hellblau, gelb und rot repräsentieren stützende Linien, Flächen und Volumina [30]

Stützstrukturen reduzieren die Materialeffizienz des Fertigungsprozesses und erhöhen darüber hinaus noch Nachbearbeitungsaufwände [48]. Insbesondere bei komplexen Geometrien und im Bauteil innenliegenden Stützstrukturen macht die schlechte Erreichbarkeit die Nachbearbeitung oft unmöglich oder disqualifiziert etablierte konventionelle Verfahren [5]. Das reduziert die technische Praktikabilität von Bauteilen sowie die Nachhaltigkeit von L-PBF. Weber et al. tragen in [47] die Einflüsse von Stützgeometrien auf die Bauteileigenschaften qualitativ geordnet zusammen. Deren Ergebnis gibt Abbildung 3.6 an.

		Supportfestigkeit	Bauteilfestigkeit	Oberflächenrauheit	Supportentfernungszeit	AMbarkeit	Materialverbrauch	Baujobzeit
Supportfeatures	Durchmesser Stamm	↑	→	→	↑	↗	↑	↑
	Durchmesser Ast	↑	→	→	↑	↗	↑	↑
	Anzahl der Äste	↑	→	↘	↗	↗	↑	↑
	Anzahl der Verzweigungen	→	→	→	↗	↗	↑	↑
	Verzweigungshöhe	↗	→	→	→	↗	↘	↘
	Abstand Supportpunkte am Teil	→	→	↑	↘	↘	→	→
	Abstand Supportpunkte am Substrat	→	→	↗	↘	↘	→	→

Abbildung 3.6: Einflüsse von Stützgeometrien auf Bauteileigenschaften qualitativ geordnet nach [47], grün: positiver Einfluss, gelb: neutral, rot: negativer Einfluss

Es resultiert also ein Dilemma aus der Erforderlichkeit von Stützstrukturen und ihren Störeinflüssen. Deshalb entwickeln sich neue Trends zur Minimierung der Supportfläche am Bauteil [48]. Eine Möglichkeit bieten die Contactless Supports, die nicht mit dem Bauteil in Kontakt stehen und nur konvektiv Wärme ableiten. Cooper et al. belegen eine akzeptable Wärmeabfuhr durch Contactless Supports in Kombination mit der Verhinderung von Verzügen in der Simulation und im Experiment [49], benötigen aber dazu Stützstrukturen aus Vollmaterial statt aus Gittern. Alternativ kann der Laser durch Mehrfachbelichtungen im Wiederaufschmelzen derselben Bereiche versuchen, Verzüge zu reduzieren und Rauheiten einzuebneten [48], was jedoch das Gefüge beeinflusst. In etablierten Verfahren mit Stützstrukturen im Bauteilkontakt gibt es Bestrebungen, die gestützte Fläche an Bauteilen und das hergestellte Supportvolumen immer weiter zu reduzieren [5]. Mit Blick auf die in dieser Arbeit angestrebte Schallunterstützung birgt das gesamte Konzept der Bauteilstützung insofern Herausforderungen, als dass die Schallausbreitung stark der Geometrie folgt und so auch von der Supportgeometrie abhängt [50]. Bei reduzierter Herstellung von Stützstrukturen müssen die Einkopplungsbedingungen des Schalls geklärt werden.

### 3.1.4 Materialwissenschaftlich-mikroskopische Betrachtung des L-PBF-Prozesses

Kristalline Metalle durchlaufen bei ihrer Erstarrung aus der Schmelze die Phasen von Keimbildung und Keimwachstum [51]. Als Triebkraft agiert die Unterkühlung einer Schmel-

ze unter den Schmelzpunkt  $T_m$  [52], was thermodynamisch betrachtet eine Differenz der spezifischen freien Enthalpien von Schmelze und Festkörper bedeutet, siehe Abbildung 3.7 a). Während der Keimbildung konkurriert dann die Oberflächenenthalpie  $\Delta G_O = 4\pi r^2 \gamma$  mit der Volumenenthalpie  $\Delta G_V = -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_V$ . Die Gleichungen enthalten die Oberflächenenergie  $\gamma$ , die spezifische Volumenenergie  $\Delta g_V$  sowie den Radius des entstandenen Kristallisationskeims  $r$  [53]. Es folgt in der Superposition nach [51] für die Triebkraft der homogenen Keimbildung:

$$\Delta G_{hom} = \Delta G_O + \Delta G_V = 4\pi r^2 \gamma - \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_V \quad (3.5)$$

Ab dem globalen Maximum der Summenkurve kann ein Keim stabil wachsen, denn ab dann überwiegt die gewonnene Volumenenergie die Oberfläche [53]. Das Maximum besteht sowohl aus dem kritischen Keimradius  $r^* = \frac{2\gamma}{\Delta g_V}$  als auch aus der Energiebarriere  $\Delta G_{max} = \Delta G_{hom}(r^*)$  [52] und gibt so wichtige Kenngrößen der Kristallbildung an. Abbildung 3.7 b) zeigt eine graphische Darstellung von Gleichung 3.5.

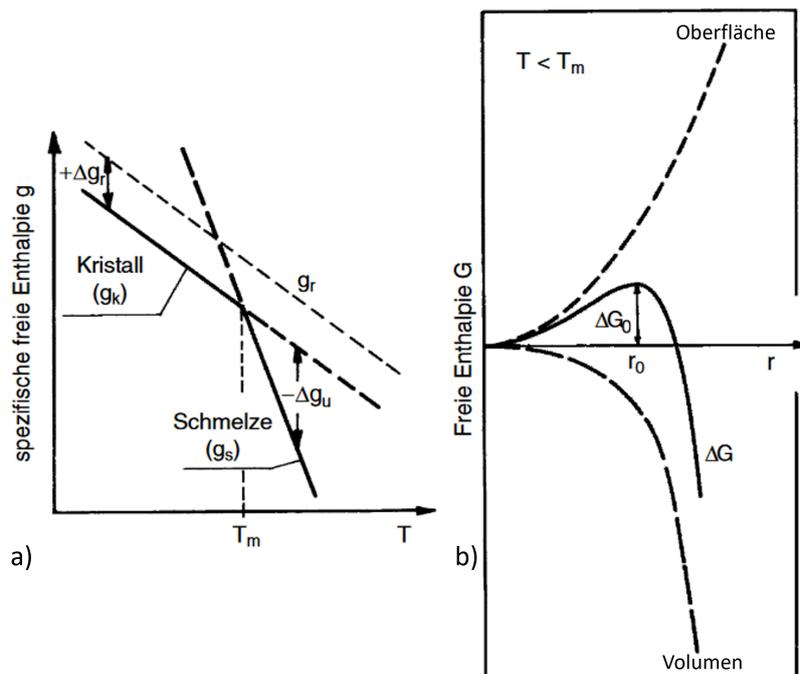


Abbildung 3.7: a) Entwicklung einer Kristallisationstriebkraft im Zuge der Unterkühlung, b) Summenkurve der freien Enthalpie zur homogenen Keimbildung [51]

In dieser Art treffen die Betrachtungen lediglich auf einen vollständig von Schmelze umgebenen Keim zu. Im Konzept der heterogenen Keimbildung werden realistischere Szenarien der Keimbildung berücksichtigt [54], denn Verunreinigungen, Kokillenwände, oder im Fall von L-PBF der bereits gebaute Festkörper, stellen Orte besonders starker Unterkühlung dar. Über die lokal stärkere Unterkühlung hinaus bieten diese Orte auch benetzbare Flächen für Keime an, sodass weniger Energie für die Bildung von

Grenzflächen erforderlich ist. Mathematisch lässt sich das durch einen Vorfaktor der heterogenen Keimbildung  $k_{het}$  ausdrücken, der zwischen 0 und 1 liegt und vom Benetzungswinkel  $\Theta$  abhängt. Es gilt nach [51]:

$$k_{het} = \frac{1}{4} (2 + \cos\Theta) (1 - \cos\Theta)^2 \in [0; 1] \quad (3.6)$$

$$\Delta G_{het} = k_{het} \Delta G_{hom} \quad (3.7)$$

In dieser Theorie fehlt noch die Dimension der Zeit. Die Keimbildungsrate beginnt, die Erstarrungskinetik zu erfassen. Sie nimmt mit fallender Energiebarriere zu und sorgt so bei der Erstarrung gemeinsam mit anderen Einflüssen wie Temperaturgradienten für eine initiale Korngrößenverteilung [51], denn es gilt:

$$\dot{N} \sim \exp\left(-\frac{\Delta G_{max}}{RT}\right) \quad (3.8)$$

Die Verteilung von Legierungselementen in Mischphasen oder separiert in Ausscheidungen einer Matrix hängt ebenso von der Zeit ab wie der sich bildende Gefügetypus selbst. In mehrkomponentigen Systemen bilden sich mit Kristallseigerungen Entmischungszonen bei nicht-eutektischen Zusammensetzungen bei Abkühlung der Schmelze [52, 55] dadurch, dass eine Komponente zuerst kristallisiert und andere nur bis zur Sättigungsgrenze des Festkörpers einlagert. Die Restschmelze reichert sich nach dem Hebelgesetz mit den übrigen Komponenten an, die sich in später kristallisierenden Seigerungszone sammeln. Bei welchem Abkühlverlauf über der Zeit sich welche Gefügetypen bilden, geben Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme, kurz ZTU-Diagramme an, da die Kinetik der realen Gefügebildung nicht zwingend im Phasendiagramm, das sehr langsame Abkühlungen repräsentiert, abgelesen werden kann [56]. Die charakteristischen Nasen eines ZTU-Diagramms entstehen aus der Summenkurve von der Keimbildungsrate und des Diffusionskoeffizienten über der Temperatur [51]. Für die Additive Fertigung spielen insbesondere kontinuierliche ZTU-Diagramme eine Rolle, da sie die Abkühlung eines Festkörpers von einer Starttemperatur auf eine Endtemperatur behandeln [56]. Als Gegenstück gibt es isotherme Diagramme, die die Abschreckung auf eine bestimmte Temperatur gefolgt von einer Haltezeit zur Umwandlung beinhalten. Abbildung 3.8 a) zeigt die schematische Bildung einer Nase im ZTU, das reale Diagramm für die Legierung AlSi10Mg hergestellt im Kokillenguss nach [57] steht in Abbildung 3.8 b) und gibt den Grad der Ausscheidungsbildung in % an. Das restliche Gefüge besteht in der Folge aus übersättigtem Mischkristall.

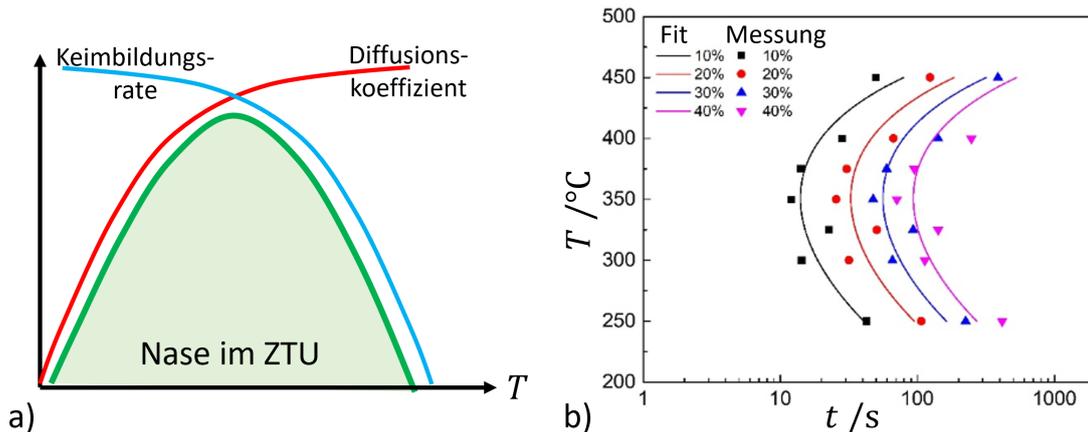


Abbildung 3.8: a) Schematische Bildung einer Nase im ZTU-Diagramm nach [51] und b) ZTU für kokillengegossenes AlSi10Mg [57]

Durch den erheblichen Einfluss auf das Werkstoffgefüge wirken die Abkühlbedingungen über verschiedene Verfestigungsmechanismen auch auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften ein. In der Regel setzen diese Mechanismen die Duktilität herab, indem sie die Versetzungsbewegung im Kristall erschweren [56]. Daraus resultiert eine Steigerung der Festigkeit. Dass diese Mechanismen in L-PBF-Teilen auftreten, beweist das stark spröde Verhalten in Experimenten von Takata et al. [38]. Nach Weissbach gibt es folgende Einteilung von Verfestigungsmechanismen [56]:

- **Kaltverfestigung:** Plastifizierung des Werkstoffes unterhalb der Rekristallisationstemperatur, besonders bei kubisch-flächenzentrierten Kristallen
- **Mischkristallverfestigung:** Einbringung von Fremdatomen ins Kristallgitter entweder substitutionell bei kleiner Größendifferenz der Atome oder interstitiell bei großer Größendifferenz
- **Partikelverfestigung:** Behinderung der Versetzungsbewegung durch kohärente oder inkohärente Ausscheidungen, durch Fremdpartikel oder intermetallische Phasen
- **Feinkornverfestigung:** Vermehrte Herstellung von Korngrenzen durch Kornfeinung und Versetzungspinning

Als einziger der genannten Mechanismen erhöht die Feinkornverfestigung auch die Duktilität, da mit der Anzahl an Körnern im Gefüge die Wahrscheinlichkeit steigt, eine Orientierung zur anliegenden Last zu treffen, die günstig im Sinne des Gram-Schmidt'schen Schubspannungsgesetzes liegt [56]. Mathematisch setzt sich die Hall-Petch-Beziehung zur Beschreibung der Fließspannung  $R_e$  aus der Grenzspannung

zur Versetzungsbewegung  $\sigma_V$ , einem Korngrenzstrukturfaktor  $k_G$  und dem mittleren Korndurchmesser  $d_K$  zusammen zu [53, 58]:

$$R_e = \sigma_V + \frac{k_G}{\sqrt{d_K}} \quad (3.9)$$

Laut Todaro et al. geht die Korngröße üblicherweise mit  $\frac{1}{\sqrt{\dot{T}}}$ , was aus der Keimbildungsrate resultiert. Geringere Kühlraten können dennoch feinere Körner bewirken, wenn gleichzeitig Ultraschall wirkt [59]. Um die unkontrollierte Anregung von Partikelverfestigung beim L-PBF zu verhindern, wird der gesamte Bauraum unter eine Inertgasatmosphäre gesetzt, da insbesondere bei Aluminiumlegierungen Oxidation und Nitrierung stabile Keramiken hervorbringen, die sich als nichtmetallische Einschlüsse im Festkörper ablagern könnten [60, 61]. Minimale Sauerstoffgehalte können zudem die Bildung von Passivschichten auf den erzeugten Werkstücken reduzieren [60], da Argon mit seiner höheren Dichte Restsauerstoff im Bauraum vom Pulverbett weg verdrängt.

### 3.1.5 Das System AlSi10Mg

Aluminiumwerkstoffe zeichnen sich durch ihr geringes spezifisches Gewicht, hohe thermische sowie elektrische Leitfähigkeit, gute Verarbeitbarkeit und guten elektrochemischen Eigenschaften aus [52, 62]. Der Werkstoff AlSi10Mg mit 10 wt.% Silizium trägt die Werkstoffnummer 3.2381 [63] und zählt als Al4046 zu den Al-Gusswerkstoffen der 4000er-Serie [64]. Durch ausgezeichnete Schweißbarkeit [60] qualifiziert er sich fürs L-PBF. Die hohe Wärmeleitfähigkeit erfordert eine konzentrierte Wärmezufuhr [60]. Insbesondere in Pulverform verlangt AlSi10Mg hohe Laserleistungen aufgrund der Reflektivität zum Aufschmelzen und zum Aufbrechen von Oxiddünnschichten auf den Partikeloberflächen [19, 20]. Die Legierung bietet hohe Leichtbaupotentiale [62] durch die geringe Massendichte, die sich gut mit bionischen Optimierungen verbinden lässt [1]. Wegen fehlender Biokompatibilität sind medizintechnische Anwendungen jedoch weitgehend ausgeschlossen.

Der Siliziumanteil von 10 wt.% bewirkt bei Al-Gusslegierungen verbesserte Fließigenschaften der Schmelze, sodass das Anwendungsgebiet um komplizierte Gussgeometrien erweitert wird [58]. Der Zusatz von Magnesium im Bereich von 0,2 wt.% bis 0,7 wt.% führt zur Aushärtbarkeit durch die Bildung von  $Mg_2Si$ -Phasen zusätzlich zur substitutionellen Mischkristallverfestigung. Gemeinsam beschreiben die drei Hauptkomponenten ein ternäres Phasendiagramm. Zur besseren Übersichtlichkeit zeigt Abbildung 3.9 einen Auszug des ternären Phasendiagrammes, nämlich das binäre Phasendiagramm Al90Si10 von 0 wt.% bis 10 wt.% Magnesium. Beim Abkühlen aus der

Schmelze offenbart sich die Kristallisationsreihenfolge der Komponenten von Aluminium über Silizium zu Magnesium.

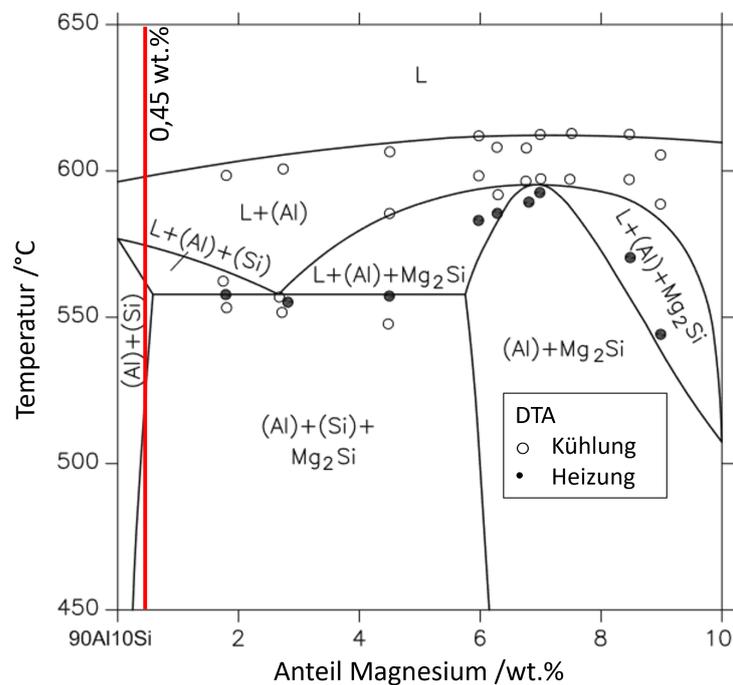


Abbildung 3.9: Phasendiagramm von Al<sub>90</sub>Si<sub>10</sub> mit variablem Magnesiumgehalt, Markierung repräsentiert AlSi<sub>10</sub>Mg [65]

### 3.1.6 Pulverqualität und -charakterisierung

Ein adäquates Pulverhandling schont Mensch und Maschine, da von Pulverrückständen ggf. Gesundheitsgefahr, Brandgefahr oder auch erhöhter Verschleiß von Mechaniken in Maschinen ausgeht [2]. Über die stoffliche Toxizität hinaus sind Partikel mit einem Durchmesser von <100 µm einatembar (E-Fraktion) und mit einem Durchmesser von <15 µm sogar alveolengängig (A-Fraktion) [66], dringen also tief in die Lunge ein. AlSi<sub>10</sub>Mg-Pulver (Nikon SLM Solutions AG) zählt mit einer angegebenen Körnung von 20 µm bis 63 µm zur E-Fraktion [67] und erfordert so gezielte Arbeitssicherheitsmaßnahmen. Zusätzlich zu den Gründen des Arbeitsschutzes wirken die Pulvereigenschaften vielfältig auf die Bauteilqualität ein [68, 69], sodass statistische Eigenschaftsverteilungen Störeinflüsse darstellen können. Die Wichtigkeit der Pulverqualität für den L-PBF-Prozess verdeutlicht DIN SPEC 17071 mit der Festlegung von Maßnahmen für das Qualitätsmanagement [70]. Regelmäßige Kontrollen helfen dabei, den Verfall von Pulverwerkstoffen durch chemische Reaktionen an den großen Partikeloberflächen zu überwachen [2].

### Klassische Pulvereigenschaften

Dadurch, dass die Pulvereigenschaften auf die resultierende Porosität, mechanische Eigenschaften, Gefügebildung, Oberflächenrauheit und geometrische Genauigkeit Einfluss nehmen [71], empfiehlt sich eine Qualitätskontrolle ab der Herstellung. Laut Baesso et al. [69] spielen Schütt- und Klopfdichte inkl. Hausner-Verhältnis, Schüttwinkel und Fließigenschaften in Bezug auf die Bauteileigenschaften eine große Rolle. Dabei gibt die Fließfähigkeitsanalyse lediglich einen ersten Hinweis auf das Prozessverhalten des Pulvers, da im Prozess deutlich andere Kinematiken und Geometrien von Verteileinheiten herrschen. DIN EN ISO ASTM 52907 als internationale Norm [72] erkennt die wichtigsten Pulvereigenschaften an und nennt zusätzlich noch die Partikelgrößenverteilung, die chemische Zusammensetzung sowie die Pulvermorphologie als relevante Größen. So ergibt sich ein Set von relevanten Pulvereigenschaften, die zum Teil qualitativ und zum Teil quantitativ anzugeben sind [17]. Die Morphologie befasst sich mit der Form von Pulverpartikeln [73]. Beispielweise klärt sich so die Sphärizität, also die Annäherung von Partikeln an eine ideale Kugelform, sowie die Existenz von Satelliten, also Kleinstpartikeln, die an größeren anbinden. Das Hausner-Verhältnis  $H$  setzt sich aus Schütt-  $\rho_S$  und Klopfdichte  $\rho_K$  zusammen [74] und repräsentiert die Verdichtbarkeit einer Pulverschüttung. Es gilt:

$$H = \frac{\rho_K}{\rho_S} \quad (3.10)$$

Üblicherweise erfolgt die Klopfdichtemessung nach ISO 3953 [75] mit Klopfern auf eine Pulverschüttung, die eine Fallhöhe von 3 mm aufweisen. ISO 3923 legt die Messung der Schüttdichte fest [76]. Eine natürliche Obergrenze für das Hausner-Verhältnis gibt die dichteste Kugelpackung von 74% an [54].

Schüttgüter können sich je nach Randbedingungen wie ein Festkörper oder wie eine Flüssigkeit verhalten [74]. Besonders im kompaktierten Zustand ähnelt das Pulververhalten einem Festkörper, da eine Fluidisierung ein Zerbrechen bedeutet. Wie leicht ein Pulver fließt oder wie stark ein Pulver in Folge von Kohäsion stockt, beschreibt die Fließfähigkeitsmessung nach ISO 4490 [77]. Aktuelle Studien befassen sich darüber hinaus mit der Verteilbarkeit im L-PBF-Prozess [78], was sehr stark von der Pulverfeuchte abhängt [68]. Ursachen für Kohäsion können in der Bildung von Flüssigkeitsbrücken, Van-der-Waals-Wechselwirkungen oder elektrostatischen Kräften liegen [74]. Zudem weisen feuchte Pulver größere Gasgehalte an Sauerstoff und Wasserstoff auf [79], was zu unerwünschten Reaktionen führen kann. Aufgrund von großen apparativen Aufwänden kommen Verteilbarkeitsexperimente selten zur Anwendung. Stattdessen wird häufig die Korrelation zwischen den Fließigenschaften und dem Hausner-Verhältnis ausgenutzt, denn je besser ein Pulver fließt, desto schlechter lässt es sich

verdichten und umgekehrt [74]. Dieser Zusammenhang drückt sich nach [69] in Tabelle 3.3 aus.

Tabelle 3.3: Zusammenhang des qualitativen Fließverhaltens mit dem quantitativen Hausner-Verhältnis [69]

<b>Fließverhalten</b>	<b>Hausner-Verhältnis</b>
Exzellent	1,00-1,11
Gut	1,12-1,18
Befriedigend	1,19-1,25
Passabel	1,26-1,34
Ausreichend	1,35-1,45
Schlecht	1,46-1,59
Ungenügend	>1,60

Aufgrund der energetisch hoch intensiven Pulverherstellung [80] werden Pulver so häufig wie möglich recycelt und wiederaufbereitet. Nach vielen Durchläufen durch Aufbereitungen und Baujobs lassen sich folgende Tendenzen oder Einflüsse erkennen [81]:

- Größere Pulverfraktion im Einsatz
- Leichte Veränderung der Morphologie
- Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Pulver
- Verringerung der Porosität im Bauteil
- Erhöhung der Werkstückhärte
- Erhöhung der Zugfestigkeit

### **Pulver unter Schalleinfluss**

Pulverschüttungen dissipieren Energie in Form von inelastischen Stößen und Reibung zwischen Pulverpartikeln [82] in einem solchen Ausmaß, dass sie als passive Dämpfungssysteme Anwendung finden [83]. Abhängig von auftretenden Schwingungsmoden und Anregungsniveaus dämpfen Pulverschüttungen breitbandig und können so eingeschlossen in einen additiv gefertigten Werkzeughalter unerwünschten Schwingungen entgegenwirken [84]. Die Beschreibung der Phänomene bedient sich der Stoßzahl  $e \in [0; 1]$ , wobei 0 einen ideal plastischen und 1 einen ideal elastischen Stoß beschreibt [85]. Begriffe wie elastisch und plastisch sind von Verformungszuständen

bekannt. Solche Zustände existieren auch bei beschallten Pulverschüttungen. Ein besonderer Fokus liegt hier auf dem Auftreten von plastischen, also irreversiblen Verformungen eines Pulverbetts. Infolge einer Anregung geraten Pulverpartikel in Bewegung, gleiten gegeneinander ab und erlangen so die Möglichkeit, vorherige Lückenvolumina zu besetzen [74]. Bei der Betrachtung von Volumenelementen mit vielen Pulverpartikeln offenbart sich die irreversible Verdichtung wie eine Werkstoffplastifizierung eines Werkstoffes im Druckversuch. Synonym zur plastischen Verformung von Pulverschüttungen kann Fließen genutzt werden. Partikeldämpfung bildet also den Mechanismus der Pulververdichtung ab. Wie viel Energie tatsächlich dissipiert, hängt stark von den Beschallungsbedingungen ab. Im Frequenzgang der Dämpfung treten Peaks auf, die sich auf Resonanzen des Pulverkörpers zurückführen lassen [86]. Mit steigendem Anregungsniveau verschieben sich die Peaks jedoch zu kleineren Frequenzen und flachen ab [87]. Zusätzlich bestimmt das Aspektverhältnis der Pulversäule die Dämpfungseigenschaften. Experimente von Gharib et al. [85] belegen einen Einfluss von der Partikelgrößenverteilung. Durch die Einflüsse der Pulver-Beschallungs-Paarung ergeben sich nach [83, 84, 86] folgende Designelemente für Partikeldämpfungssysteme:

- **Anregungsniveau:** Die erforderliche Anregung wächst mit der Partikelgröße, da Partikel in Bewegung sein müssen. Ab einem Produkt von Auslenkung  $u$  und Frequenz  $f$  zum Quadrat  $u f^2 \geq 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  gilt der Einfluss als stark.
- **Partikelmasse:** Abhängig von Partikelzahl und Füllvolumen oder -grad steigt die Dämpfung mit der Partikelmasse bis zu einem Grenzwert an. Im Grenzfall hemmt die zunehmende Verdichtung unter dem Eigengewicht die Dämpfung.
- **Partikelform und -werkstoff:** Je nach Kohäsion in einer Pulverschüttung fallen die beiden Einflüsse unterschiedlich stark aus. Bei Al-Legierungen mit hoher Kohäsion gewinnt die Partikelform gegenüber der genauen chemischen Zusammensetzung an Bedeutung.
- **Packungsdichte und Kavitäten:** Bei hoher Packungsdichte und kleinen Kavitäten nimmt die Dämpfung ab.
- **Reibung:** Glatte Oberflächen führen zu geringer Dämpfung bei hohen Frequenzen.

Für große Pulvermengen vereinfachen sich die Modelle durch den sinkenden Werkstoffeinfluss [82], sodass Geometrie und Anregung die treibenden Parameter darstellen. Unter dem Einfluss von Vibrationen verändert sich das rheologische Verhalten und Pulverschüttungen. Marchal et al. untersuchen in [88] diesen Einfluss im Bereich von

50 Hz bis 110 Hz auf sphärisches Glaspulver mit  $d_{50} = 530 \mu\text{m}$ . Für die Plateaufrequenz gilt in deren Experiment:

$$\eta_0 \sim \frac{1}{f} \quad (3.11)$$

Je höher also die Anregungsfrequenz liegt, desto niedriger fällt die Plateaufrequenz aus. Bei konstanter Frequenz und variabler Pulvermasse, also Randbedingungen ähnlich der Beschallung eines AM-Pulverbetts, verschlechtert sich das Fließverhalten unter dem Druck des Eigengewichts im Pulverbett. Mit steigendem Energieeintrag jedoch schwächt sich diese Abhängigkeit ab [88].

### 3.1.7 Qualitätsmerkmale von L-PBF-Teilen

#### Defektdichte

Anzahl, Größe und Art von Defekten und Fertigungsartefakten sowie deren Auswirkungen hängen von vielfältigen Faktoren und Wechselwirkungen ab. Je nach der eingestrahnten Energiedichte gibt es mit dem Leitungsmodus bei niedrigem Energieeintrag und dem Keyhole-Modus bei hohem Energieeintrag zwei Schmelzmodi [89], wobei der Keyhole-Modus größere Einschweißtiefen hervorruft [90]. Zu starke Ausprägungen des Keyhole-Modus führen zu Keyholing und so zu Defekten. Wie bereits das Prozessfenster bzgl. einer Energiedichte in Abbildung 3.3 andeutet, kann es im Leitungsmodus der Belichtung jedoch zu Lack of Fusion kommen [33, 89]. Nach Kumar et al. [91] stellen Breiten und Tiefen von Schmelzbädern mesoskopische Kenngrößen dar, die die Defektdichte bestimmen und linear mit der Flächenenergiedichte zusammenhängen. In Kombination mit Prozessfenstern lassen sich so Prozessparameter optimieren. So zeigen Altiparmak et al. [89], dass defektfreie Al-Bauteile additiv in einem hybriden Aufschweißprozess herstellbar sind. Trotzdem wohnt den Zusammenhängen häufig eine erhebliche Streuung inne, die selbst wiederum von der Schichtdicke abhängt [92].

#### Porosität

Poren, die durch vielfältige Bildungsmechanismen entstehen können, stellen einen wesentlichen Grund dafür dar, dass die Bauteilqualität additiv gefertigter Bauteile keine ausreichende Reproduzierbarkeit aufweist [20]. Dabei beeinflusst die Porosität wesentlich quasistatische wie auch zyklische Festigkeiten [60]. Die Bruchdehnung reduziert sich bei konventionellen Werkstoffen in Anwesenheit von bis zu 0,4 mm großen Poren um bis zu 5%. Dagegen kann bei Poren  $>1,6 \text{ mm}$  die Zugfestigkeit um 10% und die Bruchdehnung um 45% fallen. Ferro et al. beschreiben in [20] den porenbedingten

Festigkeitsverlust, der im Fit an Messdaten folgender Gleichung genügt:

$$R_m = R_{m0} \left( 1 - \frac{100\% - \rho_r}{100\%} \right)^n \quad (3.12)$$

$R_m$  bezeichnet die Zugfestigkeit,  $R_{m0}$  die porenfreie Zugfestigkeit von 338 MPa,  $\rho_r$  die relative Dichte des Werkstückes in % und  $n$  den dimensionslosen Verfestigungsexponenten von 10. Die Daten beziehen sich auf L-PBF-AISi10Mg. Abbildung 3.10 zeigt den Plot von Gleichung 3.12. Ein Abfall von 100% auf 99% relativer Dichte bewirkt einen Abfall der Zugfestigkeit um 33 MPa. Das verdeutlicht den Bedarf, in der Additiven Fertigung den Porengehalt zu minimieren.

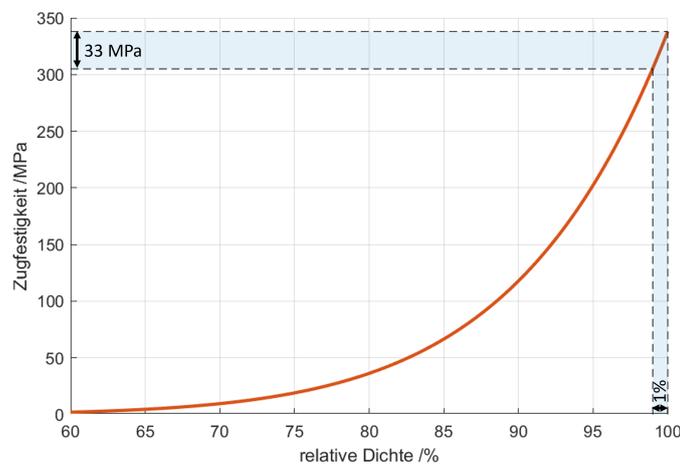


Abbildung 3.10: Verlauf der Zugfestigkeit von L-PBF-AISi10Mg über der relativen Bauteildichte nach [20]

Häufig gehören Wärmebehandlungen fest zur Nachbearbeitung von L-PBF-Teilen [38]. Dabei kann es je nach Krümmung der Grenzfläche zwischen Festkörper und Pore diffusionsbedingt zu einem Wachstum oder einer Schrumpfung der Pore kommen. Welcher Fall eintritt, bestimmt die Young-Laplace-Gleichung der Sinterkinetik [93], die auch Anwendung beim Dichtsintern von keramischen Grünkörpern Anwendung findet [61]. Es gilt für den Porenbinnendruck  $\Delta p$  in Abhängigkeit von der Grenzflächenenergie  $\gamma$  sowie dem Krümmungsradius  $r$ :

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad (3.13)$$

Es ist  $r < 0$  bei konkav und  $r > 0$  bei konvex geformten Poren. So entsteht eine Richtung des Drucks, der ein Wachstum oder einen Kollaps der Pore verursacht. Im L-PBF-Prozess selbst kann dieser Vorgang wegen der schnellen Abkühlung nicht stattfinden [94], da zu geringe Zeiträume dafür zur Verfügung stehen [93].

In der konventionellen Fertigungstechnik sind vielfältige Mechanismen zur Bildung von Poren und Lunkern bekannt [16]. Auch in der Schweißtechnik bilden sich Poren bei-

spielsweise durch zu geringen Einbrand oder Lufteinschlüsse am Rand von Schmelzbädern [60]. Bei der Verarbeitung von Aluminium scheint Wasserstoff eine große Rolle zu spielen [62], da seine Löslichkeit in der Schmelze um ca. einen Faktor 10 größer als im Festkörper ist, und so Poren durch Übersättigung bei der Erstarrung ausfallen [95]. Laut [96] entstehen auf diese Art ca. 96 vol.% aller Poren in AM-Teilen aus Aluminium. Es gibt jedoch noch weitere Bildungsmechanismen, die sich zum Teil durch Größe und Form der gebildeten Poren unterscheiden lassen, siehe Tabelle 3.4. Grundsätzlich bilden sich meistens entweder kleine sphärische oder große unregelmäßige Poren [97]. Kleine Poren liegen im einstelligen Mikrometerbereich, große hingegen bei bis zu einigen Hundert Mikrometern [98], wobei kleine Poren im Leitungsmodus und große Poren im Keyhole-Modus entstehen. Ein Teil der Poren ist über angepasste Prozessparameter vermeidbar [19, 97]. Treiber einer hohen theoretischen Baurate, Pulverlagendicke und Spurbstand, begünstigen die Porenbildung jedoch [98].

Tabelle 3.4: Üblicherweise auftretende Porenbildungsmechanismen beim L-PBF

<b>Mechanismus</b>	<b>Porenform</b>	<b>Quellen</b>
<i>Pulverbedingt</i>		
Gaseinschluss bei Pulverherstellung	rund	[1, 19, 98, 99]
Feuchtigkeit im Pulver Gasbildung bei Oxidation	regelmäßig	[20, 95, 96, 98, 100]
Oxiddünnschichten auf Pulver	unregelmäßig	[19, 20]
<i>Prozessbedingt</i>		
Balling	rund	[19, 20, 100]
Lack of Fusion	unregelmäßig	[1, 19, 101]
Metallverdampfung im Keyhole-Mode	rund oder unregelmäßig	[19, 98, 101]
Ungleichmäßige Schichtdicke durch raue Oberfläche vorheriger Schicht	unregelmäßig	[98]
Schmauch im Schmelzbereich	unregelmäßig	[98]

Simulationen an einzelnen Schmelzspuren in einem Pulverbett können die Anpassung von Prozessparametern erleichtern [101], auch wenn Scanmuster von Realteilen ebenfalls darauf Einfluss nehmen [102]. Eine ausgiebige Prozessparameteroptimierung mit dem Ergebnis eines Prozessfensters ist werkstoff- und scanspezifisch also unumgänglich [99]. Hyer et al. präsentieren in [92] eine solche Optimierung bezüglich der Scangeschwindigkeit und Volumenenergiedichte bei L-PBF- $\text{AlSi10Mg}$ , siehe Abbildung 3.11.

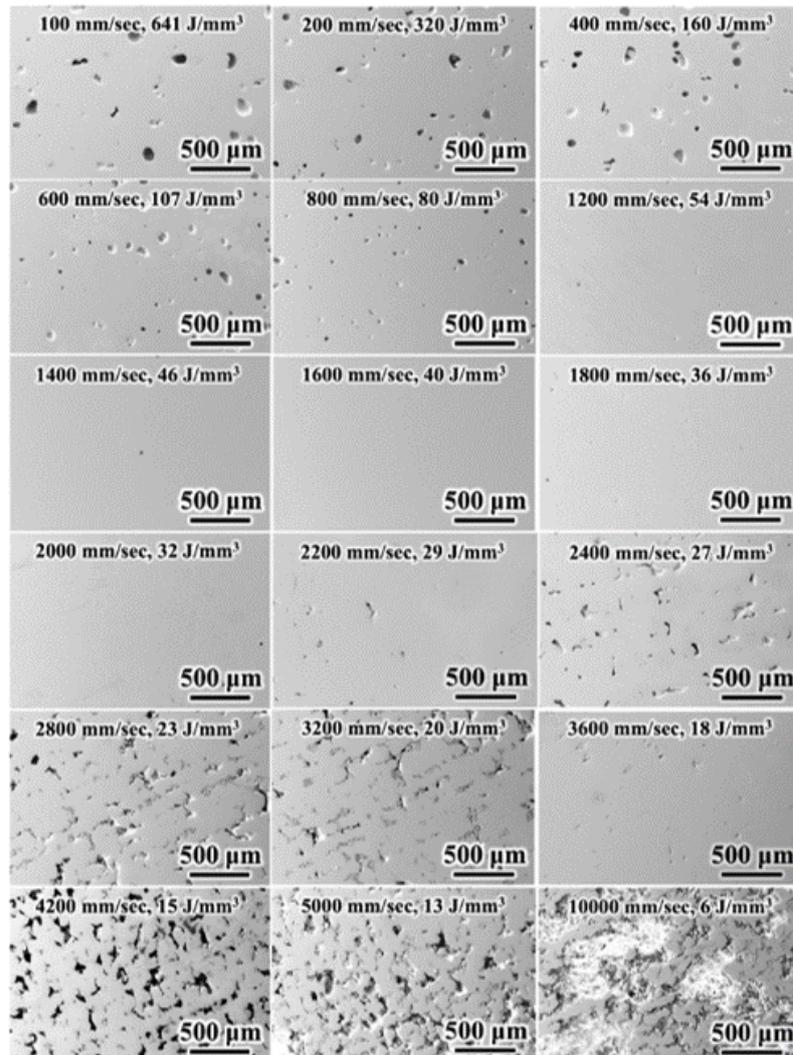


Abbildung 3.11: Schiffe aus L-PBF-AISi10Mg-Teilen zur Bestimmung eines Prozessfensters bezüglich der Porosität nach [92]

Neben der Parameteroptimierung muss das Pulver einer strengen Qualitätskontrolle unterzogen werden, um insbesondere die Feuchtigkeit zu überwachen und durch Aufbereitung zu reduzieren [95]. Zur Schließung von Poren im fertigen Bauteil kommt häufig Heiß-Isostatisches Pressen zum Einsatz. Unter Einwirkung hoher Temperaturen und allseitig wirkenden Drücken, z.B. 500 °C und 100 MPa für AISi10Mg, werden Poren förmlich zerquetscht [19]. Dennoch können Wärmebehandlungen bei Al-Teilen einen Teil der Poren wieder öffnen. Um energieintensives HIP zu vermeiden, zeigen erste Ergebnisse, dass hochfrequente Mikrovibrationen die Porosität verringern können [98, 103].

## Oberflächen

Technische Werkstückoberflächen tragen wesentlich zur Funktionserfüllung in Produkten bei [104]. Es besteht insbesondere ein Einfluss auf die Lebensdauer bei zyklischer Belastung [105], denn Rauheit forciert an vielen Stellen einen mikroskopischen Kerbeffekt, der Rissinitiierung fördert [106]. Bei additiv gefertigten Teilen hängt die Rauheit von der Position, der Geometrie sowie der Flächenart Upskin-, Downskin- oder Seitenfläche ab [107]. Darüberhinaus nimmt das Scanmuster des Lasers Einfluss auf die Oberfläche. Deshalb raten Rivalta et al. in [108] dazu, lange Linien im Scanmuster zu vermeiden. Die Baujobvorbereitung in Magics bietet deshalb die Möglichkeit, passend zum zuvor erwähnten Schweißfolgeplan eine maximale Scanvektorenlänge zu definieren [30]. Sowohl die Rauheit als auch die Homogenität des Pulverbettes stellen weitere Einflussgrößen dar [33]. Je glatter und homogener das Pulverbett aufgetragen werden kann, desto geringer die Rauheit des L-PBF-Teils. Dennoch kann es in Zonen, in denen die eingestrahlte Energie nicht mehr zum vollständigen Aufschmelzen von Partikeln ausreicht zur Anhaftung dieser am Bauteil kommen [109] und einen Anstieg im arithmetischen Mittenrauwert  $R_a$  von ca. 3  $\mu\text{m}$  hervorrufen. Eine Reihe von erzielten Rauheitswerten von L-PBF-Teilen verschiedener Werkstoffe ist in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5: In der Literatur dokumentierte Rauheitskennwerte von L-PBF-Teilen verschiedener Werkstoffe; Kommentare in Klammern beschreiben Scanmuster

Werkstoff	Arithmetischer Mittenrauwert	Mittlere Rautiefe	Quelle
	$R_a / \mu\text{m}$	$R_z / \mu\text{m}$	
IN718	10-25	k.A.	[109]
IN718	15-35	75-175	[107]
CoCr	3-8	16-39	[110]
18Ni300	12-17 (Streifen)	k.A.	[108]
	11-16 (Schachbrett)		
	14-19 (Hexagon)		
X2CrNiMo17-12-2	6-15	k.A.	[111]
AlSi10Mg	4-14	k.A.	[112]
AlSi10Mg	8-12	k.A.	[113]
AlSi10Mg	9-27	46-152	[114]

Über Parameteroptimierung hinaus können Mehrfachbelichtungen derselben Schicht Rauheiten einebnen, wie Jahns et al. in [115] an CuCr1Zr mit  $\Delta R_a = -31 \mu\text{m}$  zeigen.

### Form-, Maß- und Lagegenauigkeit

Bezüglich der geometrischen Qualität von L-PBF-Werkstücken gibt es wenig Literatur, die zumeist sehr vage Aussagen trifft. Grundsätzlich eilt der Technologie jedoch der Ruf voraus, große Abweichungen in Form, Maß und Lage hervorzubringen [116]. Laut Pragana et al. [117] ähneln die einhaltbaren Toleranzen dem Gesenkschmieden und liegen in den Klassen 11-16 nach ISO 286. Wie in der Mikrostruktur und den mechanischen Eigenschaften [97] unterliegen auch die Gestaltabweichungen von L-PBF-Teilen einer Anisotropie, die in Aufbaurichtung anders ausfällt als in der Beschichtungsebene [118]. Ein Grund dafür sind die verschieden starken Einflüsse der Energiedichten der Kontur und der Füllung einer Belichtungsfläche auf die Geometrie [119]. Nicht ideale Scanmuster können in Kombination mit der Existenz unterschiedlicher Parameterregime insbesondere die Ebenheit und die Maßerfüllung in der Beschichtungsebene reduzieren. Auch Maurya et al. belegen in [120] den Einfluss von Prozessparametern auf relative Maß- und absolute Zylindrizitätsabweichungen bei L-PBF-ALSi10Mg, wobei beide Abweichungen zu  $r_{corr} = -0,69$  miteinander korrelieren. Maße in z-Richtung weichen zunehmend mit der Bauhöhe um wenige Zehntel Millimeter vom Soll ab [118]. In ähnlichen Größenordnungen streuen auch die Maße nach einer Cluster-Analyse von Maßen in L-PBF-ALSi10Mg. Fournet-Fayard et al. zeigen in [119], dass die Geometrietreue eine Funktion von der Wandstärke eines Bauteils ist. Somit lassen sich kaum allgemeingültige Aussagen über Form-, Maß- und Lagetoleranzen treffen.

## 3.2 Hybride Fertigung mit Schallunterstützung

Es gibt zahlreiche hybride Technologien aus der konventionellen Fertigung, die entweder mehrere Technologien miteinander kombinieren oder eine physikalische Anregung durch Belichtung oder Beschallung zur Verbesserung von Werkstückeigenschaften nutzen [21, 121], wie z.B. bei der Ultraschallunterstützung des Bohrens oder Drehens [122]. Mit Schallfrequenzen von 0,1 kHz bis 80 kHz und Schwingamplituden bis 200  $\mu\text{m}$  lassen sich so Zerspankräfte und Werkzeugverschleiß reduzieren oder bestimmte Topographien an Oberflächen erzeugen. Im Bereich der Additiven Verfahren gibt es zwei Klassen von hybrider Fertigung, nämlich die Herstellung von Kompositen und die Hybridisierung von Prozessen mit anderen AM-Verfahren oder mit konventionellen Technologien aus DIN 8580 [2]. Gängige Beispiele sind die Kombination aus L-PBF mit Fräsen und Auftragsschweißen mit Drehen, Fräsen oder Schleifen. Physikalische Unterstützung durch Laser oder Schall verbessert bei Umform- und Trennverfahren oft die maximalen Umformgrade, den Eigenspannungszustand sowie die Oberflächenbeschaffenheit [2, 21, 122]. Hybride AM-Verfahren zielen nach diesem Vorbild

ebenfalls auf Defektminimierung ab und verbessern so die mechanischen Eigenschaften, die Prozessperformance und die produktionsbedingten Treibhausgasemissionen, da Nachbearbeitungsbedarfe sinken [89].

### **3.2.1 Schallunterstützung additiver Verfahren**

Der Überblick über die Literatur zu Hybrid-AM zeigt eine Bevorzugung von Prozessmodifikationen bei Verfahren, die über einen tendenziell großen Bauraum ohne Einhausung verfügen [123–125]. Dazu zählt insbesondere das Laserauftragsschweißen. Gekapselte Maschinen wie beim L-PBF kommen zwar auch für Hybrid-AM in Frage [126], aber nicht durch physikalische in-situ Unterstützung sondern eher durch Aufbau auf anwendungsspezifische Bleche statt auf maschinenspezifische Substratplatten. Ultraschall dient als klassische ZfP-Methode beim L-PBF oft der Prozessüberwachung in Echtzeit [127, 128], sodass solche Maschinen grundsätzlich mit Schallwandlern ausrüstbar sind. In den wenigen Vorarbeiten zur schallunterstützten AM erfolgt die Beschallung üblicherweise durch das Substrat [4, 103, 123, 129].

#### **Schalleinfluss auf die Mikrostruktur**

Schall kann die thermische Konvektion unterstützen und beeinflusst so die Gefügebildung [130]. Leistungsschall ab 10 W [121] vermag es, die Keimbildung zu triggern und durch eine gesteigerte Bildungsrate Kornfeinung hervorzurufen [59, 131]. Dieser Effekt scheint gegenüber dem flacheren Temperaturgradienten in der Schmelze zu überwiegen [130], da ansonsten die Keimbildungsrate abnehme. Ultraschallunterstütztes Laserauftragsschweißen zeigt jedoch sowohl eine Kornfeinung als auch einen Abbau von Anisotropie, insbesondere bei schrägem Einfall der Schallwellen [132]. Werkstoffunabhängig resultiert daraus eine Erhöhung von Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung, z.B. um einen Faktor 1,5 für Sono-LMD-ALSi12 im Vergleich zum Gussteil [4, 103, 129]. Li et al. erklären das Phänomen mit einem Aufbrechen des eutektischen Si-Netzwerkes bei ALSi10Mg und dem darauffolgenden Zerfall in eine feinere Zellulärstruktur [103], wie Abbildung 3.12 zeigt. Das führt gleichzeitig zu einem geringeren Volumenanteil an hypoeutektischem Al-Si im Vergleich zum Gussgefüge.

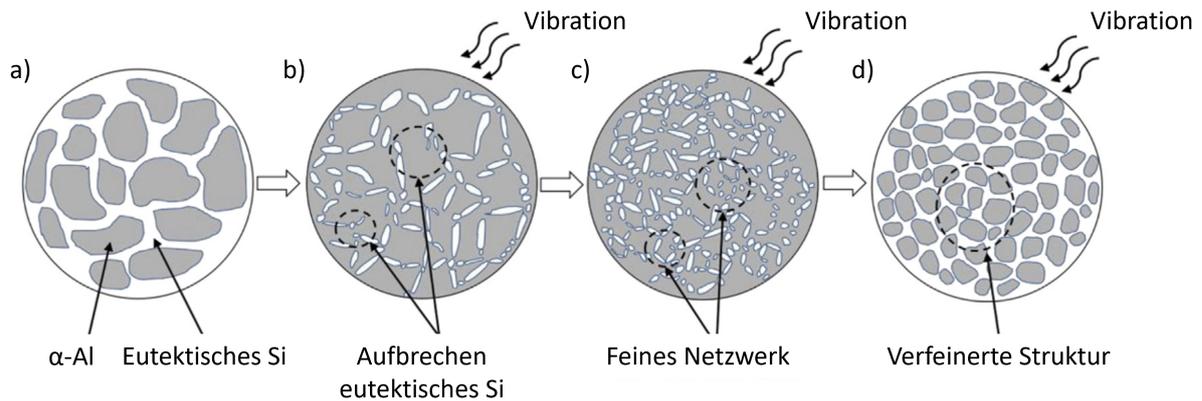


Abbildung 3.12: Schematischer Mechanismus der Kornfeinung beim Sono-LMD von AlSi10Mg nach [103]

Die resultierende Kornfeinung aus dem vorgestellten Mechanismus deckt sich mit Untersuchungen zur Kornorientierung mittels EBSD an Sono-LMD-AlSi10Mg, Sono-LMD-IN625 und Sono-LMD-X2CrNiMo17-12-2 von Todaro et al. [4, 59]. Offenbar kann der Schall durch Rotation der Kristallisationskeime aus der Richtung des Temperaturgradienten hinaus das Stengelkristallwachstum unterbinden und zu einem globulitischeren Gefüge führen, wie Abbildung 3.13 belegt. Todaro et al. nennen als Ursache für das feinere Gefüge eine schallbedingte Bildung von Kavitation [59].

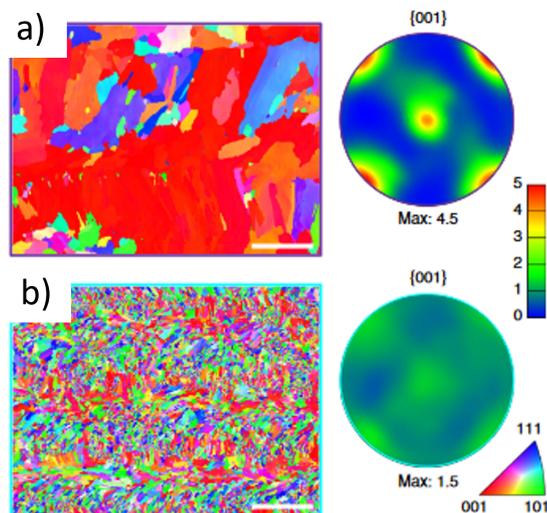


Abbildung 3.13: Kornorientierung in LMD-IN625 a) ohne und b) mit Beschallung der Schmelzphase [4]

Ultraschall bei 40 kHz mit einer Leistung von 60 W haben Yan et al. im L-PBF-Prozess zur Verarbeitung einer Cobalt-Basislegierung eingesetzt. Ihre Ergebnisse aus EBSD-Messungen bestätigen die Kornfeinung durch die Beschallung, wobei der Effekt auf die Anisotropie eher gering ausfällt [133]. Untersuchungen im Kontext Sono-L-PBF

sollten also den Prozess dahin weiterentwickeln, als dass auch die Anisotropie durch Beschallung reduziert werden kann.

### Schalleinfluss auf die Porosität

Eine signifikante und reproduzierbare Erhöhung der relativen Bauteildichte  $\rho_r$  durch Reduktion der Porosität ist ein schlagendes Argument für den Schalleinsatz im AM-Prozess. Zhang et al. berichten in [129] von einer mit der Schalleistung monoton wachsenden relativen Dichte für die Legierung AlSi12 bei einer Frequenz von 20 kHz. Noch mehr profitieren offensichtlich partikelverstärkte Verbundwerkstoffe wie TiB/Ti und TiC/AlSi10Mg von der Schallunterstützung [103, 134]. Dabei verwenden Li et al. an TiC/AlSi10Mg für Menschen hörbare Schallfrequenzen zur Pulverbettverdichtung anstatt von Ultraschall [103].

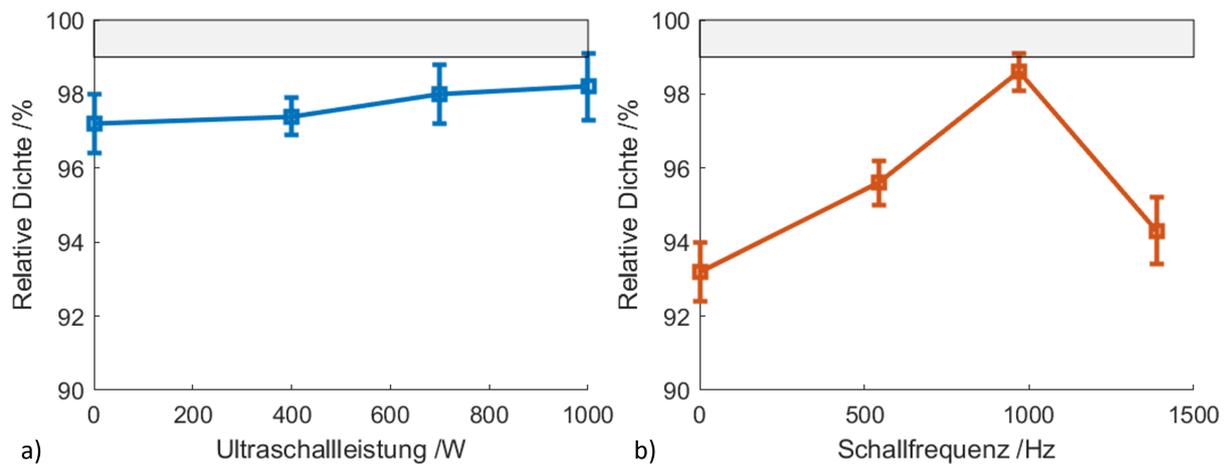


Abbildung 3.14: Entwicklung von Porosität in Sono-LMD von a) AlSi12 für verschiedene Schalleistungen [129] und b) TiC/AlSi10Mg für verschiedene Frequenzen [103]

Abbildung 3.14 stellt die Ergebnisse aus der Literatur dar. Sowohl die Schalleistung als auch die Schallfrequenz scheinen geeignete Stellschrauben darzustellen, um die Porosität deutlich zu verringern. Eine Erklärung für den Peak der relativen Dichte über der Frequenz geben die Autor\*innen jedoch nicht an. Es ist demnach unklar, welche Phänomene den Effekt verursachen und inwieweit sich die Frequenzlage des Peaks auf andere Werkstoffsysteme übertragen lässt. Für den Sono-L-PBF-Prozess scheint es eine besondere Rolle zu spielen, wann im Prozess der Schall wirkt. Yan et al. setzen sich in [133] zum Ziel, möglichst nur die Schmelzphase zu beschallen und erzielen keinen Effekt auf die relative Dichte und einen schwach negativen Effekt auf die Oberflächenqualität, da die Verdichtung des Pulverbettes ausbleibt.

### 3.2.2 Physikalische Grundlagen der Akustik

Akustische Verfahren finden vielfältige technische Anwendungen wie beispielsweise mit Hilfe von Ultraschall in der Prüftechnik [135], in der Sensorik [136] sowie in der Prozessüberwachung von AM-Prozessen [128]. Die primäre Wirkung von Schall lässt sich auf seine Energie einerseits und die oszillierende Auslenkung andererseits zurückführen [121]. Auf dieser Grundlage fußen vielfältige Effekte, die eigene Forschungsfelder wie z.B. die Sonochemie eröffnen. Darüber hinaus bestehen zahlreiche Kopplungen mit anderen Feldern der Physik, sodass Schall mechanische, thermische und elektrische Effekte in Stoffen verschiedener Aggregatzustände bewirken kann. Bei der Beschallung metallischer Schmelzphasen ruft eine Beschallung Kornfeinung hervor [4], erhöht die Sättigungsgrenze und beeinflusst so die Legierbarkeit [121]. Auch metallische Festkörper erfahren bei der Verarbeitung wünschenswerte Wirkungen von Schall. So lässt sich die Einhärtung bei Stählen durch Nitrierung erhöhen. Die Einteilung von Schall orientiert sich zum Teil an den Frequenzgrenzen des menschlichen Gehörs, siehe Tabelle 3.6.

Tabelle 3.6: Einteilung von Schallbereichen bezüglich der Frequenz nach [137]

Schallbereich	Infraschall	Hörschall	Ultraschall	Hyperschall
Frequenz /Hz	0 – 15	16 – 2 * 10 <sup>4</sup>	2 * 10 <sup>4</sup> – 10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup> – 10 <sup>13</sup>

Schallemissionen erfordern je nach Lautstärke zudem Maßnahmen zum Arbeitsschutz [138]. TRLV Lärm beinhaltet deshalb Grenzwerte, welche Pegel gemessen in Dezibel (dB) kurzzeitig oder dauerhaft in Arbeitsbereichen herrschen dürfen, bevor Schutzmaßnahmen angeordnet werden. Pegel existieren bezüglich aller gängiger Schallgrößen und folgen einem logarithmischen Zusammenhang [137], wie beispielhaft am Schallleistungspegel  $L_W$  bezüglich der Schallleistung  $P_S$  demonstriert:

$$L_W = 10 \log \left( \frac{P_S}{P_0} \right); P_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (3.14)$$

Physikalisch genügt Schall mit seiner wellenförmigen Ausbreitung einer Differentialgleichung bezüglich des Druckes  $p$  oder der Schallschnelle  $v$ . Für die Druckdifferenz  $\Delta p$  folgt [139]:

$$\Delta p = \frac{1}{v_L^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

$$\Delta p = \frac{1}{v_L^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

Abhängig vom Ausbreitungsmedium liegt Schall als Longitudinal- oder Transversalwelle vor [121]. Die medienabhängige Größe  $v_L$  aus den Differentialgleichungen be-

schreibt die Longitudinalwellengeschwindigkeit des Schalls, die stets gegenüber der Transversalwellengeschwindigkeit überwiegt. Gleichung 3.17 gibt den elementaren Zusammenhang zwischen einer Schallgeschwindigkeit  $v_S$ , der Wellenlänge  $\lambda_S$  und der Frequenz  $f$  an.

$$v_S = \lambda_S f \quad (3.17)$$

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche, treten Reflexion und Transmission auf [137]. Die Substanzen, die gemeinsam diese Grenzfläche bilden, entscheiden darüber, welche Anteile reflektiert oder transmittiert werden, durch ihre akustische Impedanz  $Z$ , die einen Widerstand gegen Schallausbreitung beschreibt [135]. Es gelten die Grundgleichungen aus Tabelle 3.7.

Tabelle 3.7: Grundgleichungen von Schall bei senkrechtem Welleneinfall auf Grenzflächen [137, 140] mit Massendichte  $\rho$ , mechanischen Moduln  $E, G$ , Schalleistung  $P_S$ , beschallter Fläche  $A$ , Amplitude  $u$  und Kreisfrequenz  $\omega$

Größe	Berechnung	Einheit
Akustische Impedanz	$Z = \rho v$	$1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} = 1 \text{ Rayl}$
Volumenenergiedichte	$E_{V,S} = \frac{\Delta p_0^2}{2Z} = \frac{1}{2} u^2 \rho \omega^2$	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$
Geschwindigkeit der Longitudinalwelle	$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Geschwindigkeit der Transversalwelle	$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Effektiver Schalldruck	$p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{P_S Z}{A}}$	Pa
Transmissionskoeffizient von Medium 1 nach Medium 2	$t_S = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$	dimensionslos
Reflexionskoeffizient von Medium 1 nach Medium 2	$r_S = 1 - t_S = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$	dimensionslos

Analog zur Optik existiert eine Art Snellius'sches Brechungsgesetz für Schall an Grenzflächen bei nicht-senkrechtem Einfall [141], wobei Totalreflexion ab einem Grenzwinkel von  $\Theta_c = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$  auftritt. Es gilt bei schiefer Schallinzidenz:

$$t = \frac{2 Z_2 \cos(\Theta_{\text{ein}})}{Z_2 \cos(\Theta_{\text{ein}}) + Z_1 \cos(\Theta_{\text{aus}})} \quad (3.18)$$

Eine weitere wichtige Größe ist die Schallintensität  $I_S = p_{\text{eff}} v_{\text{eff}}$ , die quadratisch von der Frequenz abhängt und deshalb bei hohen Frequenzen sehr stark ansteigt [121]. Werte oberhalb einer Grenzintensität von ca.  $100 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$  können Kavitation in geschmol-

zenen Leichtmetallen auslösen [4]. Es gilt dann mit der Bauhöhe  $z$ :

$$I_{S,c} = \frac{1}{2} \rho v_S \left( 2 \pi f u \cos \left( \frac{2 \pi f}{v_S} z \right) \right)^2 \quad (3.19)$$

Kavitation tritt allgemein bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten von Fluiden auf und beschreibt die Bildung feiner Gasblasen, die schlagartig mit Schallgeschwindigkeit kollabieren und so hohe Verdichtungsdrücke nach sich ziehen [142]. Mikroskalige Gasblasen können als Keimstellen für die Blasenbildung fungieren und diese so fördern.

Jenseits aller schallbedingter Effekte bedarf es einer Auslegung der Beschallung, um die gewünschten Wirkungen auch erzielen zu können. Ultraschall unterteilt sich nach Auskopplung aus seinem Wandler in das Nahfeld (Fresnel'sche Zone) und das Fernfeld [121], siehe Abbildung 3.15. Das Nahfeld ist gekennzeichnet durch starke und zahlreiche Interferenzen, viele Druckextrema sowie Phasenunterschiede. Ab dem letzten Druckmaximum gilt für das Fernfeld ein monotoner Abfall der Druckamplitude um den Kehrwert des Abstandes [143]. Endlich große Schallwandler weisen eine berechenbare Nahfeldlänge auf [144, 145]. Es gilt mit dem Wandlerdurchmesser  $D$ :

$$L = \frac{D^2 f}{4v_S} \quad (3.20)$$

Im Abstand  $L$  vom Wandler befindet sich der Fokuspunkt des ausgekoppelten Schallfeldes [121], ab dann divergiert es mit einem Öffnungswinkel von  $2\theta$ .

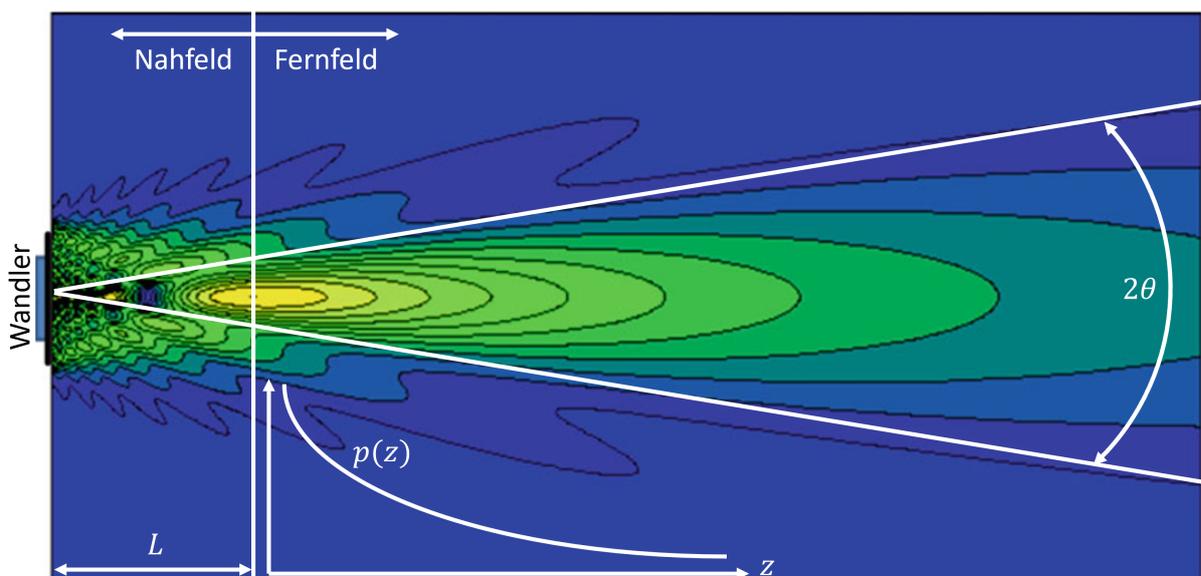


Abbildung 3.15: Schallfeldunterteilung in Nahfeld mit Länge  $L$  und Fernfeld mit Divergenzwinkel  $2\theta$  nach [144, 145]

Naturgemäß schwächt sich also der Schall mit Abstand vom Wandler ab. Zusätzlich führen Geometrieänderungen durch Schalldämmung und Dissipationen innerhalb von Werkstoffen durch Schalldämpfung zu Schwächung [50]. Folglich ist die Schallausbreitung geometrie- sowie medienabhängig, was eine Beschallung von nahezu beliebigen AM-Bauteilen erschwert. Zudem können Rückwände von anderen Wänden einer Geometrie mit dem Primärschall überlagern [146]. Das geschieht jedoch nur auf kleinen Maßstäben, da diese Echos mit dem Kehrwert des quadratischen Abstands an Intensität verlieren. Darüber hinaus gilt für akustische Wellen das Huygens'sche Prinzip [121], das besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront eine Quelle für eine kugelförmige Elementarwelle darstellt. Defekte im beschallten Festkörper bieten solche Quellen für Kugelwellen, was die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung häufig ausnutzt [146]. Die komplexen Zusammenhänge zwischen Geometrie, defektbehaftetem Werkstoff und der daraus resultierenden Schallschwächung erschweren die Auslegung von akustischer Prozessunterstützung. Ein Lösungsansatz geht von scharfen Linienspektren einzelner bis weniger Frequenzen bis hin zu breitbandigen Anregungen namens Rauschen [139] aus. Rauschen unterscheidet sich in der Ableitung der Schallintensität nach der Frequenz  $\frac{dI_S}{df}$  und wird üblicherweise mit Farben benannt. So bildet weißes Rauschen das Analogon zum weißen Licht und es gilt  $\frac{dI_S}{df} = \text{const.} > 0$ , wohingegen rosa Rauschen leicht zu geringeren Frequenzen rotverschoben ist und  $I_S(f) = \text{const.}$  sowie  $\frac{dI_S}{df} = 0$  gilt. In der Folge steigt der Pegel beim weißen Rauschen mit der Frequenz um 3 dB pro Oktave und beim rosa Rauschen bleibt der Pegel konstant [147]. Für eine homogene Beschallung kann je nach Bedarf an besonders intensiven Frequenzen Rauschen unerwünschte andere Effekte der Einfrequenzbeschallung überdecken. Darüber hinaus zeigt sich ein umso homogeneres, ebeneres Beschallungsbild, wenn ein Schallwandler gezielt in Dickenrichtung angesprochen werden kann und auf diese Art planare Wellen aussendet [146].

### 3.3 Charakterisierung von Fertigungsprozessen durch statistische Versuchsplanung

Ohne Bindung an eine bestimmte Fachrichtung zielt die statistische Versuchsplanung oder DoE darauf ab, empirische Zusammenhänge durch mathematische Gleichungen zu beschreiben und dabei gleichzeitig Extrapolation zu vermeiden [148]. Zur Erreichung dieses Ziels werden Einflussgrößen als Faktoren gezielt auf wenigen, diskreten Stufen kodiert variiert, um ihren einzelnen oder gemeinsamen Einfluss auf eine Zielgröße zu formulieren. Eine Untersuchung von  $n_k \in \mathbb{N}$  Faktoren spannt sich ein  $n_k$ -dimensionaler Versuchsraum auf, der mit  $n_L \in \mathbb{N}$  kodierten Levels (z.B. - und +) im vollfaktoriellen Fall dreier Faktoren einen Würfel beschreibt [149], dessen Eckpunkte

mit einem Experiment besetzt sind. Damit ergibt sich für die Anzahl der benötigten Proben  $n_P$  zusammen mit der Anzahl an Wiederholungsversuchen  $n$  zu:

$$n_P = n n_L^{n_k} \quad (3.21)$$

Wegen der exponentiellen Abhängigkeit von der Faktoranzahl gewinnen Versuchspläne mit vielen variierten Einflussgrößen schnell an Umfang. Unter Einbußen der Auflösung des Versuchsplans kann mit der Reduktionsstufe  $r \in \mathbb{N}$  der Aufwand deutlich reduziert werden, indem nicht mehr alle Ecken des Würfels im Versuchsraum belegt sind [148]. Dabei überlagern sich aber Faktoreffekte mit Wechselwirkungen aus mehreren Faktoren. Abbildung 3.16 zeigt einen zweistufigen, vollfaktoriellen Versuchsplan aus drei Faktoren in tabellarischer Form und im Versuchsraum. Zur Elimination systematischer Einflüsse, die entstehen, wenn die Experimente genau in der Reihenfolge des Plans stattfinden, gibt es Randomisierung und Blockbildung, also eine zufällige Reihenfolge der Experimente und eine Gruppierung verschiedener Proben zu konstant gehaltenen Randbedingungen [149, 150].

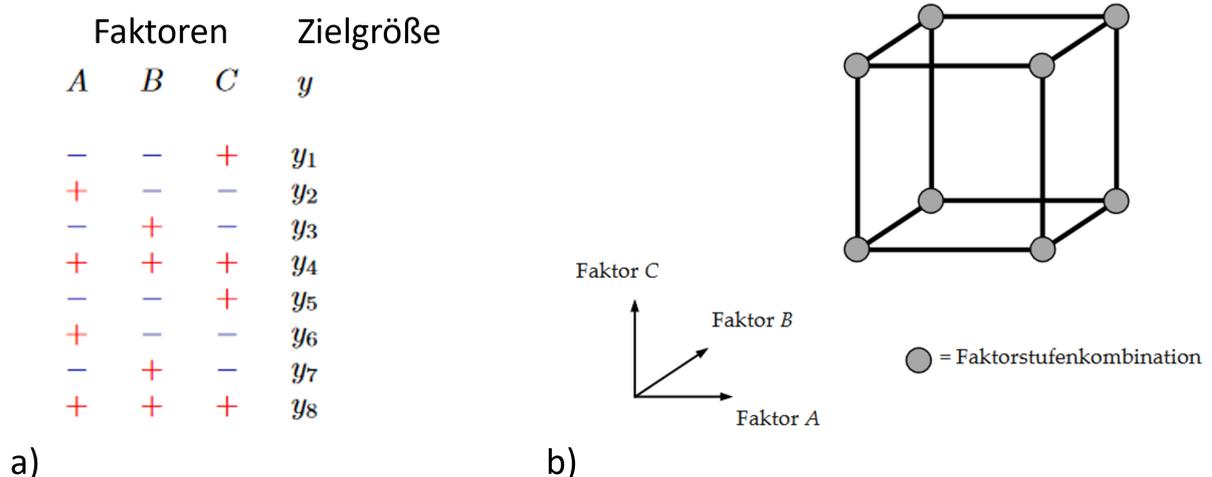


Abbildung 3.16: a) Zweistufiger, vollfaktorieller Versuchsplan für drei Faktoren A, B und C nach [149] und b) derselbe Versuchsplan in seinem dreidimensionalen Versuchsraum nach [148]

Zur klassischen Auswertung einer DoE gehören berechnete Faktor- und Wechselwirkungseffekte sowie dazu gehörige Diagramme. Die Effekte tragen jeweils die Einheit des betrachteten Qualitätsmerkmals [149]. Die Berechnung im zweistufigen Versuchsplan erfolgt über die Differenz der Mittelwerte über alle Ergebniswerte einer bestimmten Faktoreinstellung. Es gilt für den Effekt des Faktors A auf die Ausgangsgröße y:

$$E_{A,y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{i,+}}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m y_{j,-}}{m}; n, m \in \mathbb{N}, i \leq n, j \leq m \quad (3.22)$$

Als Erweiterung zum faktoriellen Versuchsplan gibt es das Central Composite Design (CCD), das weniger Versuche beinhaltet als ein dreistufiger, vollfaktorieller Plan, aber im Gegensatz zum zweistufigen, vollfaktoriellen Plan auch Nichtlinearitäten abzubilden vermag [151]. Das CCD besetzt die Ecken des Würfels im Versuchsraum, nutzt also den zweistufigen Plan und erweitert diesen um die Flächenmitten für  $\alpha = 1$  sowie die Raummitte, siehe Abbildung 3.17. Bei  $\alpha < 1$  oder  $\alpha > 1$  verschieben sich die Punkte auf den Flächenmitten entlang der Achse ins Innere des Würfels oder nach außen. Das macht die Auswertung beim CCD ungleich schwieriger als bei faktoriellen Ansätzen und bedarf Softwareunterstützung durch R, Minitab oder Matlab. Auch die Benennung von Parametersätzen verkompliziert sich von -, + oder -1, +1 auf  $-\alpha$ , -1, 0, +1,  $+\alpha$ .

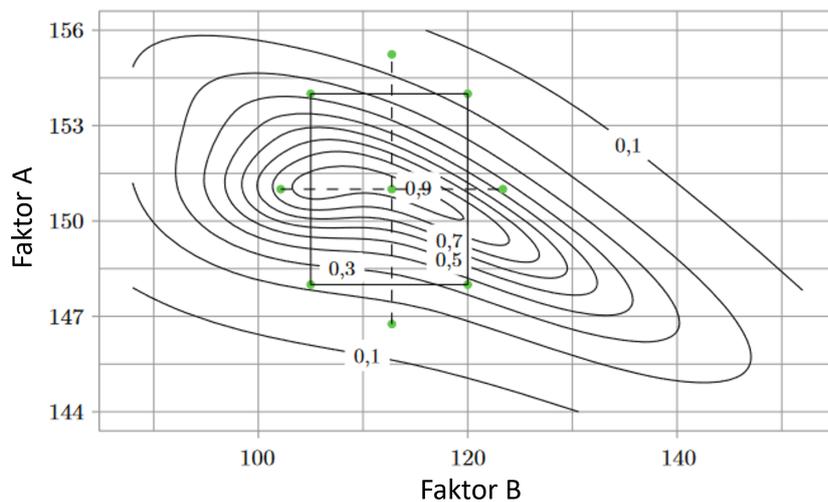


Abbildung 3.17: Central Composite Design im Versuchsraum zweier Faktoren mit  $\alpha > 1$  nach [151]

### 3.4 Identifikation des Forschungsbedarfs

Schallunterstützung von AM-Prozessen besetzt aktuell eher eine Nische in der Forschungslandschaft. Durch verschiedene physikalische sowie apparative Hürden behandeln die wenigen Publikationen eher Auftragsweißprozesse und in seltenen Fällen nur rudimentär L-PBF. Partikeldämpfung stellt offenbar den Mechanismus für die Verdichtung einer Pulverschüttung um das Hausner-Verhältnis dar, limitiert allerdings gleichzeitig die maximale Bauhöhe des Sono-L-PBF. Eine Kombination von ausreichender Schalleistung und verdichtetem Zustand bereits beschallter Schichten könnten den Effekt jedoch in für typische L-PBF Pulverbett Höhen transportieren. Literatur zu Sono-LMD bestätigt, dass Schall erhebliche Effekte in additiv gefertigten Werkstücken erzielen kann, die Übertragung zum L-PBF steht jedoch noch aus.

Das beinhaltet auch, dass die Wirkung des Schalls bei einem Pulverbettverfahren möglicherweise andere Effekte hervorruft als die bereits dokumentierten des Sono-LMD. Verfahrenübergreifend zeigt die Literatur für intensiven Schall, dass Kavitation durch mikroskalige Gasblasen befördert und bei Beschallung die Poren währenddessen womöglich ihre eigene Elimination fördern. Es existiert also eine realistische Chance, die Bauteilqualität durch Sono-L-PBF deutlich zu steigern. Dies erfordert eine detaillierte Auslegung des Prozesses sowie ein fundiertes Ausloten von Limitationen im Experiment.

# 4 Entwicklungsbausteine zur Schallunterstützung

## 4.1 Motivation von Sono-L-PBF

Obwohl technologisch durch Anpassung von Prozessparametern die Möglichkeit besteht, Porosität in L-PBF-Bauteilen zu reduzieren, lässt das Verfahren trotzdem noch genug Optimierungsbedarfe offen. Auch bei relativen Dichtewerten  $>99,5\%$  liegt eine statistische Verteilung vor, was zur Erhöhung von Sicherheitsfaktoren führt und Leichtbauoptimierung sowie Volumenersparnis hemmt. Als Beweis dafür dient eine Reproduzierbarkeitsuntersuchung von 60 gleichartigen Dichtewürfeln der Kantenlänge 20 mm aus L-PBF-ALSi10Mg mit einem in eigenen Vorarbeiten identifizierten, sehr gut geeigneten Parametersatz. Oberflächenkenngrößen, Korrosionseigenschaften und die Mikrostruktur sind in einer eigenen Publikation veröffentlicht worden [152]. Neben diesen Eigenschaften weist der Parametersatz mit einer Pulverlagendicke von  $30\ \mu\text{m}$ , einer Laserleistung von 250 W, einer Scangeschwindigkeit von  $1650\ \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  und einem Spurbabstand von 0,13 mm zusätzlich vergleichsweise hohe Dichtewerte  $>99,5\%$  auf. Abbildung 4.1 stellt die Häufigkeitsverteilung der relativen Dichte von Teilen dieses Parametersatzes dar. Angefittet im Diagramm befindet sich eine Exponentialfunktion, der die Dichte zu folgen scheint, wobei die am häufigsten auftretende Klasse des Histogramms nahe am physikalischen Limit von 100% liegt.

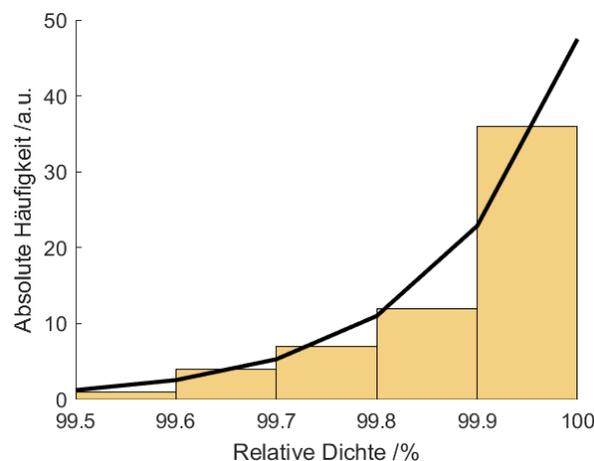


Abbildung 4.1: Häufigkeitsverteilung der relativen Dichte für L-PBF-ALSi10Mg mit  $h = 30\ \mu\text{m}$ ,  $P = 250\ \text{W}$ ,  $v = 1650\ \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  und  $d = 0,13\ \text{mm}$

Im Bereich der vorgestellten relativen Dichten treten Mechanismen, die große und unregelmäßige Poren bilden, erfahrungsgemäß kaum mehr auf. Prozesstechnisch lässt sich offensichtlich der am häufigsten aktive Bildungsmechanismus der Wasserstoffporen nach [95, 96] noch nicht vermeiden.

Nach theoretischer Betrachtung des Poreneinflusses mit Hilfe der linear elastischen Bruchmechanik sowie der Ermüdung, siehe Anhang A, folgt der Beleg für deren Schädigungsrelevanz in Abbildung 4.2. Laut linear-elastischer Bruchmechanik erreichen Poren erst bei Lasten weit über der Zugfestigkeit der Legierung Schädigungsrelevanz, im Ermüdungsfall dagegen können Defekte in der Größe von Poren die Lebensdauer herabsetzen. Es trägt also wesentlich zur Haltbarkeit additiv gefertigter Komponenten bei, Porosität zu verringern. Anhand der Näherungen für die Zeitfestigkeitsabschnitte einer Wöhlerlinie zeigt sich dieser Einfluss, der sowohl durch die statistische Verteilung von Porosität im Bauteil als auch durch die statistische Verteilung der relativen Dichte bei gleichartigen Bauteilen eine Safe-Life-Auslegung inklusive ihrer Absicherung erschwert. Auch das Niveau der Schwingfestigkeit hängt von der Porosität und deren Größe ab [45].

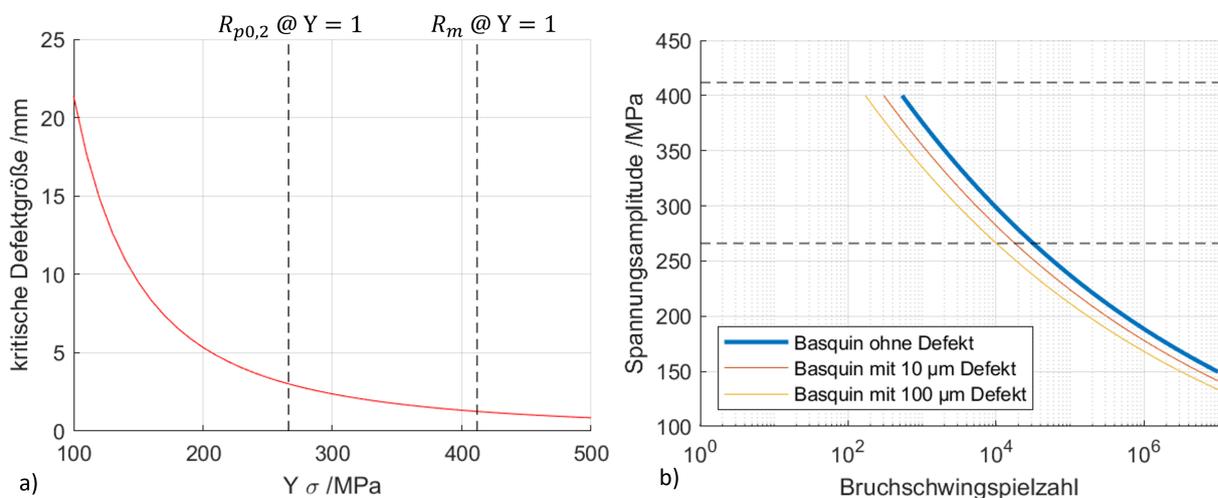


Abbildung 4.2: a) Kritische Fehlergröße über dem geometrieabhängigen Belastungszustand für die linear-elastische Bruchmechanik und b) durch Porosität reskalierte Basquin-Kurve für L-PBF-AISi10Mg mit Daten aus [153, 154]

Obwohl diese Betrachtung den Einfluss von Anzahl und Verteilung von Porosität im Bauteil nicht beachtet, steigt sicherlich die Versagenswahrscheinlichkeit mit der Porosität an. Romano et al. stützen mit ihren Ergebnissen diese Vermutung in [45].

In der Konsequenz sollte das Hauptziel also darin bestehen, Porosität weiter zu reduzieren und im Idealfall sogar zu eliminieren. Der Schalleinsatz bei anderen Metall-AM-Verfahren verspricht auch für L-PBF einen positiven Effekt. Weitere Effekte wie

die Reduktion von mikrostruktureller Anisotropie und die Beeinflussung von Oberflächen können zusätzlich auftreten und können gegebenenfalls sogar die Bauteilqualität weiter erhöhen.

## 4.2 Entwicklungsziele

Auf der Basis der theoretischen Grundlagen in Verbindung mit analytischen Näherungsrechnungen und modellhaften Gedankenexperimenten lassen sich die im Folgenden formulierten Entwicklungsziele ableiten. Trotz der Plausibilität aus der Theorie heraus gilt es, diese experimentell und falls nötig statistisch abgesichert zu überprüfen.

- *Maschinenentwicklungsziel:* Die L-PBF-Maschine SLM125 von Nikon SLM Solutions ist auf Sono-L-PBF umrüstbar und kann im angepassten Zustand a) gasdicht und b) erfolgreich Baujobs abschließen, ohne Maschinenschäden in Kauf nehmen zu müssen.
- *Sicherheitsentwicklungsziel:* Es existieren Beschallungsmodi aus Frequenz und Auslenkung, die a) nicht die Sicherheit des maschinenbedienenden Personals in Frage stellen und b) bei Sono-L-PBF die gewünschten Effekte hervorrufen.
- *Dichteentwicklungsziel:* Sono-L-PBF kann die Porosität in AlSi10Mg durch Verdichtung des Pulverbettes und Beschallung der Schmelzphase eliminieren.
- *Oberflächenentwicklungsziel:* Insbesondere bei Downskinflächen starker Neigung entstehen durch Sono-L-PBF glattere Oberflächen als beim Standard-L-PBF.
- *Mikrostrukturentwicklungsziel:* Die sich beim L-PBF anisotrop ausbildende Mikrostruktur mit Stengelkristallwachstum lässt sich durch Sono-L-PBF zu einem globulitischeren, isotroperen Gefüge wandeln.
- *Parameterentwicklungsziel:* Beim Sono-L-PBF gibt es Parametersätze, die höherwertige Teile als beim Standard-L-PBF hervorbringen.

## 4.3 Aufbau des Arbeitsprogramms

Aus der Forschungslücke, die aus dem Stand der Forschung hervorgeht, resultiert in Verbindung mit den Entwicklungszielen das in Abbildung 4.3 dargestellte Arbeitsprogramm. Das Ziel besteht darin, die identifizierte Forschungslücke zu schließen. Der Stand der Forschung bietet aus verschiedenen Fachgebieten hinreichende Grundlagen, um theoretische Vorüberlegungen und grundlegende Simulationen in Bezug auf

das Zielsystem Sono-L-PBF anzupassen. Als Vergleichsbasis für spätere Ergebnisse dient der Status Quo, was L-PBF ohne Schallunterstützung zu leisten im Stande ist. Zusätzlich besteht der Bedarf, das eingesetzte Metallpulver zu charakterisieren. Da der Umbau im ersten Stadium noch nicht den Einsatz der Substrateheizung gewährleisten kann, müssen Bauteileigenschaften ohne diese zu Vergleichszwecken bekannt sein. Die Umrüstung der Anlagentechnik mit passender Auslegung von Komponenten, des Schallwandlers inklusive seiner Elektronik und erste Baujobs mit Untersuchungen der schallbedingten Effekte schließt sich an, bevor eine umfangreichere Variation der gängigen L-PBF-Parameter stattfindet. Zum Schluss existiert ein neu entwickeltes hybrides Fertigungssystem, das einen Reifegrad von fünf bis sechs auf der Skala von Technology Readiness Levels erfüllt. Diese Stufen geben vor, dass ein technisches System in einem relevanten Umfeld erprobt wird [155]. Da sich die Additive Fertigung insbesondere für Prototypen und individualisierte Einzelstücke sowie Kleinserien eignet [2], kann das relevante Umfeld durch die Herstellung von prototypischen Probengeometrien abgedeckt werden.

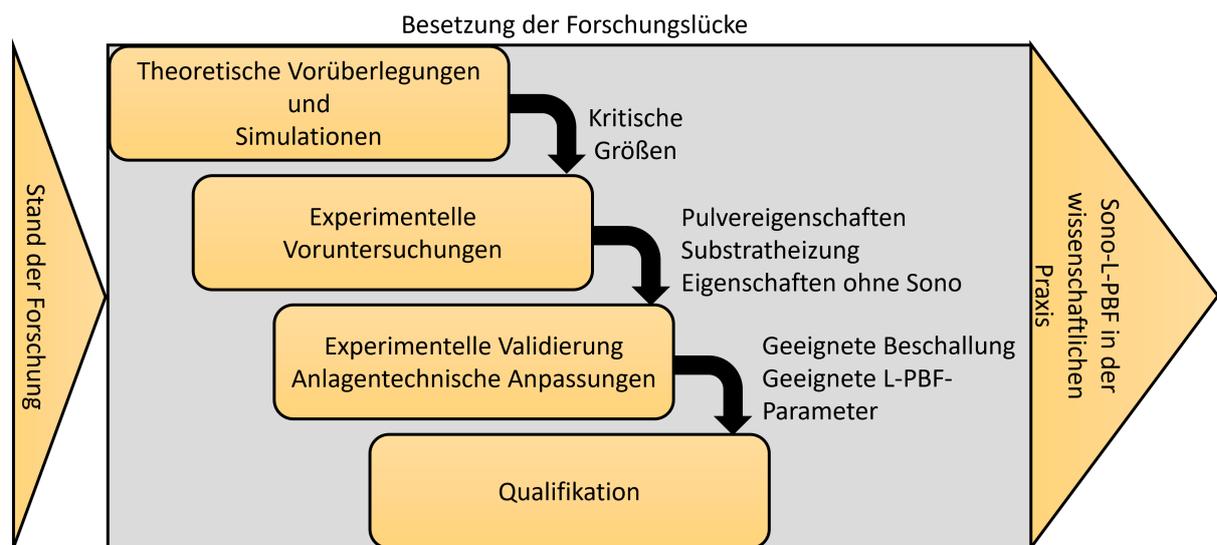


Abbildung 4.3: Arbeitsprogramm dieser Arbeit, das zur Schließung der Forschungslücke beiträgt

## 5 Umzurüstende Maschine und qualifizierende Fertigungsmesstechnik

Die Norm DIN EN ISO ASTM 52902 [7] schreibt für additiv gefertigte Bauteile und Testkörper von der Datei bis zum Fertigteil eine detaillierte Dokumentation vor. Deshalb empfiehlt es sich, den Ablauf bezüglich der Baujobvorbereitung sowie der Maschinenrüstung und Baujobdurchführung zu standardisieren. Für die nachfolgende Charakterisierung sind Regions of Interest und Messgrößen zu bestimmen, die mit Hilfe der entsprechenden Verfahren ermittelt werden können.

### 5.1 Baujobvorbereitung

Die Konstruktion von Bauteilen und Testkörpern erfolgt in Inventor Professional (Autodesk GmbH), das Dateien im .ipt-Format generiert. Zum Import und zur weiteren Verarbeitung in Magics (Materialise NV), der Software, die die von der Maschine lesbaren .slm-Dateien inklusive Bauteilanordnungen, Parametrierung und Stützstrukturen ausgibt, muss als Zwischenstufe eine .stl-Datei erzeugt werden. Deren Exportqualität beeinflusst die geometrische Genauigkeit der folgenden Additiven Fertigung wesentlich, sodass in diesem Schritt Ungenauigkeiten und Dateidefekte später erhebliche Auswirkung auf das Arbeitsergebnis haben. Deshalb ist jede .stl-Datei auf ihre Unversehrtheit zu prüfen, in hoher Auflösung (der höchsten von drei Qualitätsstufen in Inventor) zu exportieren und bei Bedarf in Magics zu reparieren. Nach einem erfolgreichen Import in Magics werden im virtuellen Bauraum die Teile platziert. Bei der Anordnung spielt aufgrund von Anisotropieeffekten die Orientierung für die späteren Bauteileigenschaften eine große Rolle. Für ein Gelingen des Prozesses kommen darüber hinaus noch Abstände zwischen Teilen und ihre Verteilung in der Beschichterrichtung hinzu. Ein Abstand von mehreren Millimetern zwischen den Bauteilen eines Baujobs dient der Entpulverung, während eine versetzte Platzierung von Teilen in Beschichterrichtung die Standzeit der Gummilippe, die das Pulverbett rakelt, deutlich verlängert. Aus Gründen des Verschleißschutzes sollten zusätzlich gerade Kanten um 15° gedreht zur Beschichterrichtung stehen. Der Vielfalt an Stützgeometrien sind kaum Grenzen gesetzt, so lange die Strukturen ihre Aufgaben erfüllen können. Magics verfügt über Standardgeometrien, deren Ausgestaltung im Detail vom Werkstoff und von der thermischen

Leitfähigkeit des Werkstoffes abhängt. So können für Al-Basislegierungen dünnere Supports genutzt werden als beispielsweise für Stähle. Die verfügbaren Standards decken bereits ein weites Bauteilspektrum vom 3D-Gitter bis hin zum dickwandigen Massivteil ab und ermöglichen durch Ausstellung und Positionierfreiheit eine hohe Flächenbelegung der Substratplatte sowie die Stapelung von Bauteilen in die Höhe. Nach der Erstellung der Anordnung und Auswahl einer geeigneten Supportsstrategie, die aktuell auf der Erfahrung des Personals beruht, erfolgt die Definition und Zuweisung von Parametersätzen. Jedem Bauteil kann einzeln ein Parametersatz zugeordnet werden, was Parameterstudien deutlich vereinfacht. In der Literatur beschreiben üblicherweise die vier Prozessparameter Pulverlagendicke, Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand einen Parametersatz, aber tatsächlich erfordert die Definition deutlich mehr Details, da in Abhängigkeit vom Scanmuster Parameterregime anders parametrisiert werden als die Nennwerte vermuten lassen. Für einen ersten Überblick reichen die vier Standardgrößen jedoch aus, wobei jeweils die Maximalwerte genannt werden und in anderen Parameterregimen eine Reskalierung um einen Faktor zwischen 0 und 1 erfolgt. Nach all diesen Schritten, die sich vollständig innerhalb von Softwareumgebungen abspielen, steht eine auf die Maschine transferierbare Baujobdatei zur Verfügung.

## 5.2 L-PBF-Anlagentechnik

Am Lehrstuhl für Fertigungstechnik steht eine L-PBF-Maschine des Typs SLM125 (Nikon SLM Solutions AG) zur Verfügung. In einem Bauraum von 125 mm Kantenlänge in alle drei Raumrichtungen können Bauteile im Pulverbett mit Hilfe eines Yb:YAG-Faserlasers (IPG Laser GmbH) bei einer Wellenlänge von 1070 nm hergestellt werden. Zusätzlich gibt es eine Bauraumverkleinerung, die sich besonders für Baujobs mit Kleinteilen oder kostspieligen Pulverwerkstoffen mit limitiertem Vorrat eignet, die ein Baufläche von 50 mm x 50 mm bei maximal 45 mm Bauhöhe aufweist. Die Substratplatte kann bis maximal 250 °C heizen, wobei die Heizung bei Nutzung der Bauraumverkleinerung wegen zusätzlicher Einbauteile nicht mehr genutzt werden kann. Als Inertgas bietet sich wegen höherer Oberflächenqualitäten am Bauteil Argon an [156]. Die vorgenannten gängigen Prozessparameter sind zum Teil durch die Maschine begrenzt. Die maximale Laserleistung liegt bei  $P = 400 \text{ W}$  und die maximale Scangeschwindigkeit bei  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Spurabstand und Pulverlagendicke sind nicht durch die Maschine limitiert, aber es existieren sinnvolle Intervalle zur Parameterwahl. Eine untere Grenze stellt die Körnung des Pulvers dar, da dünnere Lagendicken als der Partikeldurchmesser nicht realisierbar sind. Durch eine gewisse Rauheit des Pulverbettes lässt sich der Partikeldurchmesser geringfügig unterschreiten, indem sich Partikel in den Zwickeln

der vorangegangenen Schicht positionieren. Eine obere Grenze der Pulverlagendicke lässt sich experimentell durch die resultierenden Bauteilqualitäten ermitteln. Der Energieeintrag pro Belichtungsfläche, der mit sinkendem Spurbstand signifikant ansteigt, bildet eine Untergrenze für den diesen. Die Obergrenze des Spurbstandes besteht in der Forderung nach Überlappung benachbarter Laserspuren und beträgt damit die Schmelzbadbreite.

Zwischen den Koordinatensystemen der Maschine und den theoretischen Vorüberlegungen bestehen Unterschiede. Die Gasflussrichtung  $x$  bleibt davon unberührt, die Beschichterrichtung  $y$  verläuft parallel zu einer Achse, der Schichtauftrag erfolgt aber in positiver und negativer Bewegungsrichtung, sodass eine Festlegung der Achsrichtung technisch keinen Einfluss nimmt. Die  $z$ -Richtung jedoch wird gegenläufig definiert, weil im Maschinenkoordinatensystem die Bewegungsrichtung der Substratplatte im Prozess die Richtung vorgibt, in den übrigen Betrachtungen und Modellvorstellungen aber die zeitlich variierende Bauhöhe im Fokus steht. Beide Größen bedingen sich gegenseitig, sodass gilt:

$$|z_{Machine}| = |z_{Bau}| \quad (5.1)$$

Über die L-PBF-Maschine hinaus braucht es weitere Peripheriegeräte. Abbildung 5.1 zeigt das Layout im Technikum des Lehrstuhls mit den zugehörigen Geräten und Einrichtungen inklusive der Flüsse von Materialien und Hilfsmedien im Prozess. Alle notwendigen Anschlussleistungen sind neben den Geräten aufgeführt. L-PBF-Maschine und Siebanlage PSM100 (Nikon SLM Solutions AG) erfordern eine Versorgung mit Argon (gelb). Beide Geräte sowie die Sandstrahlanlage Peenmatic 620S (iepcO AG) benötigen zudem eine Versorgung mit Druckluft (7 bar, schwarz). Der Materialfluss des Pulvers ist durch hellblaue Pfeile gekennzeichnet. Frischpulver durchläuft vor dem Einsatz im L-PBF-Prozess eine Siebung und bleibt danach so lange im Kreislauf der Wiederverwendung von Siebungen und Prozessdurchläufen, bis es in einem Bauteil Verwendung findet oder als Abfall oder Schlechkorn dem Kreislauf entnommen wird. Der Kühlkreislauf (dunkelblau) dient der Temperaturregelung der Laserquelle und der optischen Bank, um Überhitzungen und thermischen Verzügen entgegenzuwirken. Zusätzlich gibt es diverse Vorratsschränke, die zur Lagerung von Werkzeugen, persönlicher Schutzausrüstung oder zur Bevorratung von Pulver und Inertgas dienen. Die Sandstrahlanlage kommt in der Baujobvorbereitung der Substratplatten zum Einsatz, damit das Pulverbett auf der geschliffenen Platte gut verteilt werden kann, und fungiert ebenso wie der Wärmebehandlungssofen LH60/12 (Nabertherm GmbH) als Nachbearbeitungsgerät. Die Entfernung von Pulverresten, von denen Brand- und Explosionsgefahr ausgehen kann, erfordert einen explosionsgeschützten Staubsauger AMC330 (EVO Products Blankenburg GmbH).

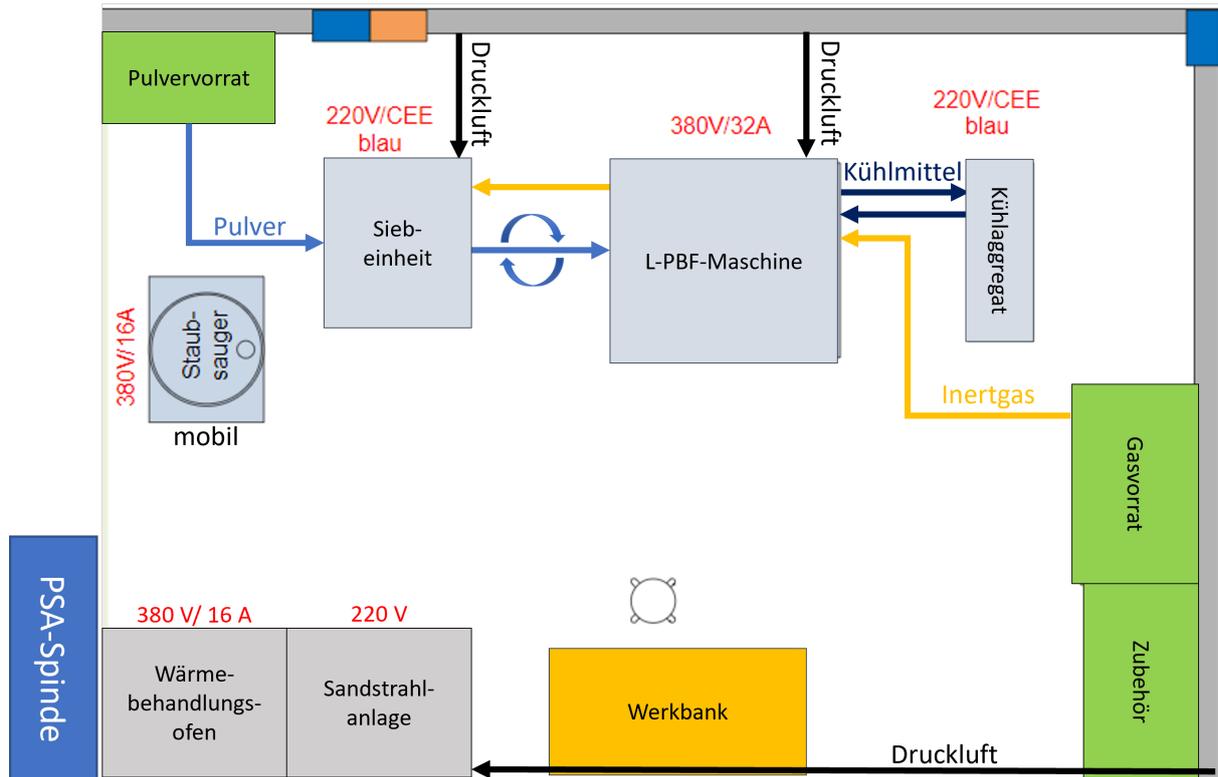


Abbildung 5.1: Layout des Bereiches L-PBF im Technikum des Lehrstuhls für Fertigungstechnik inklusive Material- und Hilfsstoffflüsse

Die zuvor genannten Peripheriegeräte sind inklusive ihrer Aufgaben und wichtigsten Merkmale in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Peripheriegeräte der Additiven Fertigung

Gerät	Aufgabe	Merkmale
Siebeeinheit PSM100	Pulversiebung	Grenzpartikelgröße 75 µm
Kühlaggregat	Kühlung von Optik und Laser	geschlossener Kühlkreislauf
Sandstrahlanlage Peenmatic 620S	Substratplattenvorbereitung, Bauteilnachbearbeitung	variabler Strahldruck variable Düsengeometrie
Ofen LH60/12	Wärmebehandlung	variable Atmosphäre
Staubsauger AMC330	Entfernung von Pulverresten	Explosionsschutz
Pulvervorrat	Pulverlagerung in Weithalsfässern	Brandschutzklasse 90
Gasvorrat	Gaslagerung in fixierten Druckbehältern	Brandschutzklasse 90

## 5.3 Simulationen

Ansys Workbench (Ansys Inc., Version 2022R1) ermöglicht innerhalb des Mechanik-Solvers eine harmonische Analyse mit vorgeschalteter Modalanalyse mit dem Ziel der Ermittlung eines Frequenz-Antwort-Spektrums für diverse mechanische und akustische Größen. Gegenstand der Analysen ist einerseits die Verdichtung eines Pulverbettes und die Ausbreitung des Schalls in einem Bauteil, das auf einer vereinfachten Supportgeometrie steht. Beide Varianten der Simulation versuchen, die Effekte isoliert voneinander darzustellen, also finden die Analysen zum Pulverbett ohne Bauteil und die Analysen zum Bauteil ohne Pulverbett statt, auch wenn eine Trennung in der Realität unmöglich ist. Die Schallausbreitung lässt sich vermutlich über die Geometrie der Substratplatte steuern, also dienen die Simulationen zur Bestimmung geeigneter Substratgeometrien. Die eingebrachte Verschiebung in Baurichtung  $z$  bildet sich in Abhängigkeit von Geometrie, betrachteter  $z$ -Höhe, Zeit, Anregung und Frequenz aus. Die Beschreibung als säulenförmiger Festkörper folgt aus einer annähernden Abstraktion der Pulverschüttung. Dessen mechanische Eigenschaften stammen aus der Ansys-Datenbank [157] oder [158] und werden über Mischungsregeln mit Gewichtungsfaktoren der Schüttdichte zwischen Pulver und Inertgas im Lückenvolumen berechnet. Das beinhaltet die Vernachlässigung von kontaktmechanischen Randbedingungen. Die starke Vereinfachung des gewählten Modells verlangt nach einem Beweis der Validität der Ergebnisse. Deshalb gilt es im ersten Schritt, ein geometrisch simples Modell zu simulieren und mit analytischen Rechnungen zu vergleichen. Für den späteren Einsatz im Prozess spielt die Lage von Resonanzfrequenzen eine große Rolle, folglich dienen die Resonanzfrequenzen als Verifikationskriterium. Die Beträge der lokalen Verschiebungen wirken sich im Prozess ebenfalls aus, weichen aufgrund der Vereinfachungen aber ohnehin von den realen Beträgen ab. Das bedeutet, dass lediglich die örtlichen Unterschiede aufzulösen sind, wobei die Zonen sich von niedriger Verschiebung bis zu hoher Verschiebung auf einer qualitativen Skala erstrecken. Der untersuchte Frequenzbereich erstreckt sich von 15 kHz bis 100 kHz. Der geschätzte Hub des Schallwandlers beträgt  $u = 100 \mu\text{m}$  und schallbedingte Beschleunigung  $a = 500 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Auch wenn die Beschleunigung sehr hoch ausfällt, lassen sich so inhomogene Schallverteilungen aufgrund von Geometrieeffekten besser abbilden.

## 5.4 Pulvercharakterisierung

Im Standard-Prozess ohne Bauraumverkleinerung füllen bis zu  $2,2 \cdot 10^{10}$  Partikel das maximale Bauvolumen. Selbst bei Nutzung der Bauraumverkleinerung sind ca.  $1,3 \cdot 10^9$  Partikel nötig, um das Bauvolumen zu füllen. In solchen Größenordnungen gewinnen

statistisch verteilte Eigenschaften an Gewicht, weshalb das Pulver als Eingangsgröße in den Prozess, die nicht im Detail steuerbar ist, zumindest wohl bekannt sein muss. Zudem hängen die erwartbaren Effekte durch die Schalleinwirkung zum Teil wesentlich von Pulvereigenschaften ab. Das von Nikon SLM Solutions zur Verfügung gestellte Materialdatenblatt für das Pulver des Werkstoffes AISi10Mg beinhaltet die Angaben aus Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Grundlegende Pulvereigenschaften gemäß Materialdatenblatt [67]

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Theoretische Massendichte	$2,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Partikeldurchmesser	20 $\mu\text{m}$ –63 $\mu\text{m}$
Wärmeleitfähigkeit	$140 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$
Partikelform	sphärisch

Größen, die für die Verdichtbarkeit des Pulverbetts eine große Rolle spielen, sind Partikelgrößenverteilung, Fließfähigkeit sowie Schütt- und Klopfdichte. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle diese Größen charakterisiert. Laut aktuellem Stand der Forschung hängen Pulvereigenschaften wesentlich von dem relativen Feuchtegehalt ab. Deshalb muss in regelmäßigen Abständen eine Messung mit dem Taupunktsensor HYTE-LOG 4800 Bd (Hygrosens Instruments GmbH) erfolgen. Inwieweit sich die Packung der Pulverpartikel dem Ideal einer dichtesten Kugelpackung von 74% [54] nähert, hängt zusätzlich von der Morphologie ab und kann mit Hilfe der statistischen Häufigkeitsverteilung der Aspektverhältnisse von Minimal- zu Maximaldurchmesser einzelner Partikel charakterisiert werden. Digitalmikroskopische Aufnahmen mit dem VHX7000 (Keyence Corp.) und anschließender automatischer Bildauswertung ermöglichen diese Analyse. Im Zentrum davon stehen dann die häufigsten Aspektverhältnisse sowie Art und Kenngrößen der Verteilung, um das Streuverhalten quantitativ angeben zu können.

### **Partikelgrößenverteilung**

Die Vergabe des Messauftrages nach extern verspricht ein zuverlässiges Ergebnis aus akkreditierten Laboren. Die erste Pulvercharge (Nummer 2019000400) wird bei Dillinger AG mit einem HELOS H2482 Lasergranulometer vermessen und mit der Software WINDOX 5 ausgewertet. Der zweiten Charge (Nummer 2021000766) liegt bei Lieferung bereits ein Messprotokoll von Nikon SLM Solutions bei. Die Analyse erfolgt mit einem Cilas 990L unter Ausnutzung der Lichtstreuung. Beide Varianten geben Daten aus, mittels derer sich Häufigkeitsverteilungen und Summenpolygonzüge plotten lassen. Die Häufigkeitsverteilungen müssen dann auf dasselbe Integral, also dieselbe

Fläche unter der Verteilung, normiert werden, um Vergleichbarkeit zu erzielen. Die Interpretation der Summenpolygonzüge gestaltet sich deutlich leichter. Aus dieser Form der Darstellung lassen sich leicht charakteristische Partikelgrößen der Quantile  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{90}$  ablesen, wobei die Durchmesser  $d_n$  angeben, dass  $n\%$  der Partikel maximal diesen Durchmesser aufweisen. Ebenso ist hier ablesbar, welcher Anteil aller Partikel im Rahmen einer Siebung in Abhängigkeit von der Grenzpartikelgröße als Schlechkorn abfällt.

### Fließfähigkeit

Die Norm DIN EN ISO 4490 [77] schreibt vor, wie die Fließfähigkeit von Pulvern vergleichbar und reproduzierbar zu messen ist. Das Messergebnis lässt erste Schlüsse darauf zu, wie sich ein Pulver beim Auftrag des Pulverbettes verhält. Wie im Stand der Forschung beschrieben gibt es repräsentativere Methoden, das Auftragsverhalten prozessnah zu bestimmen. In dieser Arbeit soll jedoch eine Messung nach Norm der Fließfähigkeit und die In-process-Überwachung der Auftragsqualität im L-PBF-Prozess mittels Layer Control System genügen.

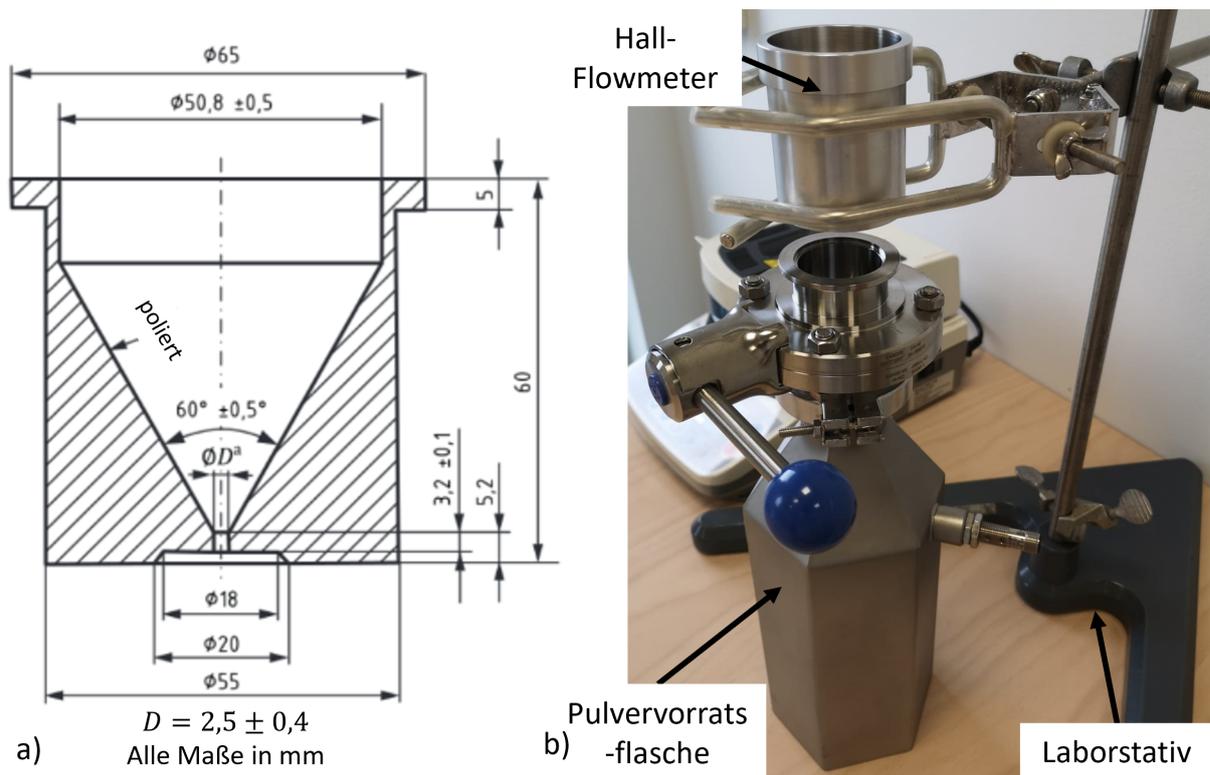


Abbildung 5.2: a) Technische Zeichnung eines Hall-Flowmeters gemäß DIN EN ISO 4490 [77] und b) in dieser Arbeit genutzter Fließfähigkeits-Messaufbau

Die normgetreue Messung der Fließfähigkeit nutzt ein trichterförmiges Pulverreservoir namens Hall-Flowmeter, aus dem zum Messbeginn die vorgehaltenen 50 g Pulver ausfließen sollen. Durch die genormte Geometrie des Hall-Flowmeters mit technischer Zeichnung in Abbildung 5.2 a), den vorgegebenen, polierten Oberflächenzustand sowie die standardisierte Größe des Halses zum Ausfluss gibt die Zeit, die ab dem Messbeginn bis zur vollständigen Leerung des Trichter vergeht, eindeutige Rückschlüsse auf die Fließfähigkeit an. Zu besserer Vergleichbarkeit führt der Massenfluss als Zeitableitung der Masse aus dem Trichter  $\frac{dm}{dt}$ . Die Fließfähigkeit ist somit abhängig vom Pulverwerkstoff bestimmbar. Dennoch fällt ein Vergleich zwischen verschiedenartigen Werkstoffen schwer, da verschiedene Massen verschiedene Füllvolumina des Hall-Flowmeters hervorrufen. Der gesamte Messaufbau ist in Abbildung 5.2 b) dargestellt.

### Schüttdichte

ISO 3923 [76] schreibt vor, wie die Messung der Schüttdichte eines Pulvers ablaufen muss. Der zuvor beschriebene Hall-Trichter dient hier der definierten Befüllung des Messgefäßes. Bei vollständiger Füllung eines Messtopfes mit einem Volumen von  $25 \text{ cm}^3 \pm 0,03 \text{ cm}^3$  wird überschüssiges Pulver abgerakelt. Die Maße des Topfes stehen in Abbildung 5.3. Die Berechnung der Schüttdichte erfolgt nach Wägung auf 0,01 g genau gemäß  $\rho_S = \frac{m}{V}$ . Zur statistischen Absicherung verlangt die Norm insgesamt drei Messungen pro untersuchtem Pulverwerkstoff.

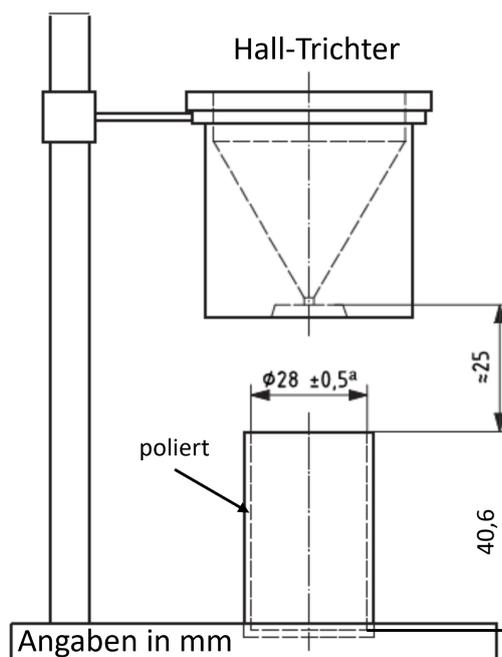


Abbildung 5.3: Aufbau zur normgetreuen Schüttdichtemessung nach ISO 3923

## Pulverdichtungsexperimente

EN ISO 3953 [75] definiert die Parameter zur reproduzierbaren, zuverlässigen Messung der Klopfdichte, dem Nenner im Verdichtbarkeitsverhältnis nach Hausner. Nach der Schüttdichte des geprüften Pulverwerkstoffes richtet sich die Prüfmasse. Bei metallischen Legierungen, deren Schüttdichten oft zwischen  $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und  $4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  liegen, bestimmt die Norm für einen transparenten Prüfzylinder mit Eichstrichen und einem Volumen von  $100 \text{ cm}^3$  eine Prüfmasse von  $100 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ . Mindestens 3000 Klopfer aus einer Fallhöhe von 3 mm sollen die Pulversäule vom schüttdichten in den klopfdichten Zustand komprimieren. Die Norm trifft dabei keine Aussage über die Klopfrequenz. Aufgrund unterschiedlicher Kinematiken kann jedoch erwartet werden, dass eine Beschallung höhere Frequenzen erreicht als ein gängiger Prüfaufbau gemäß EN ISO 3953. Gleichzeitig fallen die Hübe sicherlich im Beschallungsfall deutlich geringer aus. Das führt wiederum zu einer unzuverlässigen Aussage eines klassisch ermittelten Hausner-Verhältnisses für die Anwendung beim Sono-L-PBF.

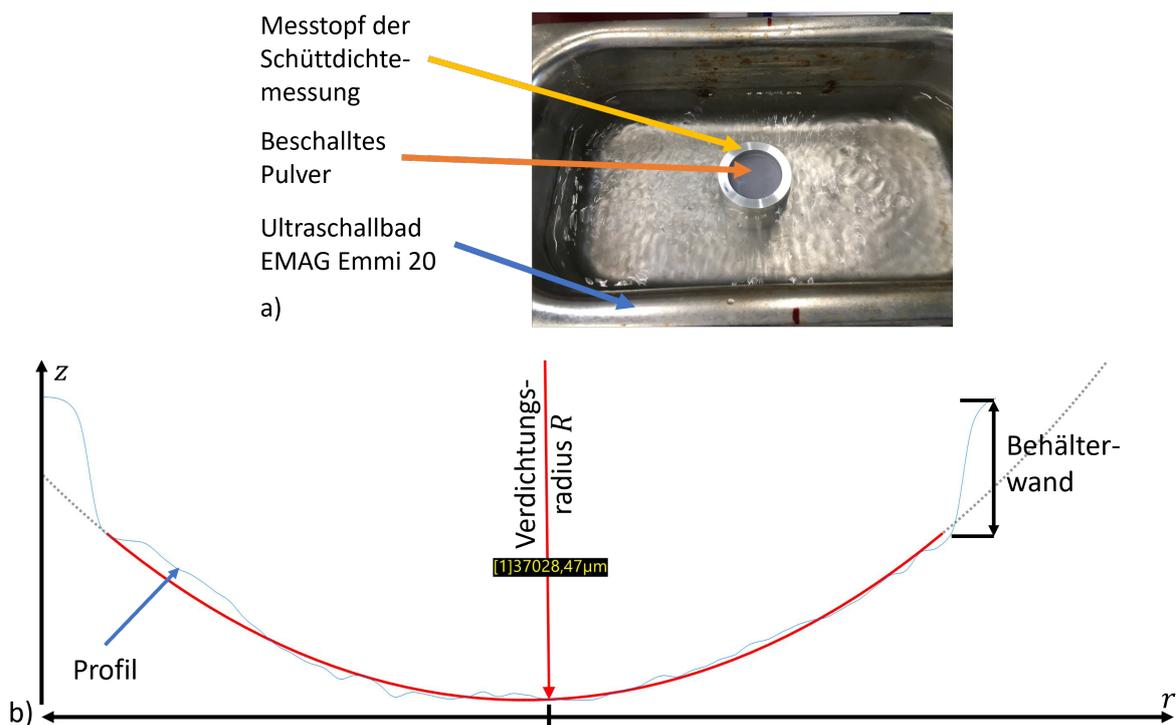


Abbildung 5.4: a) genutzter Aufbau zur Pulverbeschallung im wassergefüllten Ultraschallbad und b) Messung des verdichtungsbedingten Krümmungsradius der Pulveroberfläche am Digitalmikroskop VHX-7000

Aus diesem Grund wird einerseits die Pulververdichtung unter Schalleinfluss betrachtet und andererseits über eine Energiebilanz die Anzahl an Vibrationen ermittelt, die der Schall für dieselbe Verdichtung wie die Normmessung benötigt. Es bietet sich für ersteres die Füllung des Normgefäßes der Schüttdichtemessung aus Aluminium mit

anschließendem Glattrakeln der Oberfläche an, was zu einer Füllhöhe von 40 mm führt. Bei unvollständiger Füllung auf ca. 18 mm ist Rakeln zur Herstellung einer glatten Pulveroberfläche keine Option, da die Oberfläche im Inneren des Zylinders liegt. Die Verdichtung findet anschließend für 10 Minuten im wassergefüllten Ultraschallbad Emmi20 (EMAG AG) statt, wie Abbildung 5.4 a) zeigt. Die Schalleistung beträgt maximal 250 W bei einer apparativ vorgegebenen Frequenz von 45 kHz. Die Leistung kann in drei Stufen 50%, 75% und 100%, also 125 W, 188 W und 250 W variiert werden, sodass die Parameterstudie sechs Zustände aus drei Leistungs- und zwei Füllhöhenstufen umfasst. Neben der Nominalfrequenz entstehen vielfältige hörbare Frequenzen bei Nutzung des Ultraschallbades, sodass es sich eher um ein breitbandiges Rauschen als um eine monofrequente Anregung handelt. Die eingekoppelte Leistung unterscheidet sich vermutlich deutlich von der nominellen Leistung zwischen 125 W und 250 W, da viel Energie insbesondere in die spürbare Erwärmung des Wasserbades und weitere Dissipationsprozesse fließt. Störeffekte von Artefakten wie Wasserspritzern auf der Pulveroberfläche können in der Darstellung der späteren Messbilder abgemildert werden. Das Digitalmikroskop VHX-7000 (Keyence Corp.) liefert im 3D-Panorama ein zusammengesetztes, tiefenscharfes Bild der Pulveroberfläche, das auf Wunsch entsprechend der z-Höhe eingefärbt und gemessen werden kann. Der Profil-Modus ermöglicht darüber hinaus die Messung des Krümmungsradius der Oberfläche aus Abbildung 5.4 b). Ein Matlab Live-Script dient anschließend der Reskalierung der Bilder auf vergleichbare Werte mittels der Division durch den Farbmittelwert des Einzelbildes und die anschließende Multiplikation mit dem Farbmittelwert aller Bilder. Höchstwahrscheinlich bilden sich konzentrische Verdichtungszone aus, da auch ein guter Dickenschwinger als Schallgeber immer Wellen mit einer endlichen Krümmung aussendet, sodass innerhalb einer Ebene mehrere Isobaren liegen können. Folglich können je nach Position verschiedene Schalldrücke zu verschiedenen starken Verdichtungserscheinungen führen, wodurch sich die Mitte stärker verdichtet als der Rand der untersuchten Pulversäule. Dazu passend ist aus der Theorie ein Dichte- und Verdichtungsverlauf nicht nur in der Höhe der Pulversäule sondern auch in ihrer Ebene herzuleiten. Die Verifikation übernehmen Hausner-Verhältnisse des Schalls für die Zentren und Ränder als auch die Messung der Krümmungsradien. Für das ortsabhängige Hausner-Verhältnis gilt:

$$H = H_{Sono} = \frac{m}{\pi r^2 \Delta d} \frac{1}{\rho_S} \quad (5.2)$$

In der Gleichung bezeichnet  $m$  die Einwaage des Pulvers,  $r$  den Radius des Gefäßes und  $\Delta d$  den Höhenunterschied entweder vom Gefäßrand zur Pulveroberfläche am Rand oder vom Rand zum Kern der verdichteten Pulversäule. So lassen sich mit der Wahl von  $\Delta d$  schallbedingte Hausner-Verhältnisse am Rand und im Zentrum einer

Pulverschüttung errechnen, die die theoretische Herleitung validieren. Bei der Durchführung der Experimente verdichten sich innerhalb einiger Sekunden die Pulversäulen so stark, dass die Oberfläche in der Regel gut sichtbar um einige Millimeter absackt. Ein solches Verhalten schließt zunächst die Beschallung für die Additive Fertigung aus, aber im Prozess würde der Schall keine ganze Säule verdichten sondern frische Schichten auf bereits verdichtetem Pulver. Um die Wirkung in diesem Fall der Nachverdichtung genauer zu untersuchen, wird eine bereits verdichtete Pulversäule wieder bis zum Rand mit schüttdichtem Pulver aufgefüllt und der vorherige Versuch wiederholt. Die Mindestanzahl an Vibrationen, die es zur Verdichtung auf die Klopfdichte braucht, lässt sich aus der Kinematik von EN ISO 3953 über eine Bilanz der potentiellen Energieänderungen (gemäß  $dE_{pot} = m g dh$ ) berechnen. Es folgt:

$$n_{Sono} dE_{pot,Sono} = n_{Norm} dE_{pot,Norm} \Leftrightarrow n_{Sono} = \frac{n_{Norm} m_{Norm} dh_{Norm}}{m_{Sono} dh_{Sono}} = \frac{0,9 \text{ m}}{u} \quad (5.3)$$

In Gleichung 5.3 beschreibt  $n_i$  die Anzahl an Vibrationen zur Verdichtung, wobei im Beschallungsfall die Anzahl an eingekoppelten Wellen gemeint ist,  $m_i$  die bewegten Massen,  $dh_i$  die Fallhöhen und  $u$  die Schallauslenkung, die der Fallhöhe im Beschallungsfall entspricht. Daraus ergibt sich die Verdichtungszeit als Quotient der Vibrationszahl und der Schallfrequenz  $f$  zu:

$$t_{verdicht} = \frac{n_{Sono}}{f} \quad (5.4)$$

Weiter stellt sich die Frage, inwieweit bereits gebaute Teile sich auf die Verdichtung des Pulvers auswirken. Dazu wird in denselben Aufbau wie zuvor beschrieben ein würfelförmiges L-PBF-Teil mit Kantenlänge 10 mm montiert und mit verschiedenen Pulverhöhen bedeckt. Zur Fixierung des Teils im Topf dient hier Knetmasse, die sich vollflächig unter dem Teil in einer Dicke von ca. 1,5 mm befindet. Mit Versuchen analog zu den vorangegangenen sollen Abweichungen in den Verformungsfiguren und in der Oberflächenbeschaffenheit dokumentiert werden. Der Fokus liegt dabei auf dem Einfluss der Schalleistung von 125 W und 250 W sowie dem Einfluss der Pulverfüllhöhe von ca. 13 mm sowie ca. 40 mm.

### Partikeldämpfungseigenschaften

Wie im Stand der Forschung beschrieben, können Pulverschüttungen temperaturunabhängig schwingungsdämpfend wirken. Das mag sie zwar für einige Anwendungen als robuste Dämpfer qualifizieren, steigert aber den Bedarf an akustischer Leistung im Sono-L-PBF. Dennoch muss eine Dissipation der Schallenergie stattfinden, damit sich Pulverpartikel zu einer größeren Packungsdichte umordnen können. In Koope-

ration mit dem am Campus der Universität des Saarlandes ansässigen Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZfP) werden die Dämpfungseigenschaften des AlSi10Mg-Pulvers untersucht. Dort steht ein Schwingprüfsystem TV51120-C (Tira GmbH) zur Verfügung, das über einen beschleunigungs- und einen kraftgeregelten Modus verfügt. Während der Versuche dient die jeweils unregelmäßige Größe als Messgröße. Experimente können eine Variation von Frequenz und Anregungsamplitude in Kraft oder Beschleunigung beinhalten, wobei die Phasenverschiebung zwischen Kraft und Beschleunigung die Dämpfung charakterisiert. Einzelne Frequenzen können ebenso den Aufbau anregen wie Frequenzspektren des Rauschens. Die wichtigsten Kenndaten fasst Tabelle 5.3 zusammen.

Tabelle 5.3: Wichtigste Kenndaten der Pulverdämpfungsprüfstandes Tira TV51120-C am Fraunhofer IZfP

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Eff. Nennkraft Sinus / Rauschen	200 N / 100 N
Frequenzbereich	10 Hz - 25000 Hz
Hauptresonanz	> 25000 Hz
Max. Schwingung	4 mm
Max. Beschleunigung Sinus / Rauschen	51g / 25g
Gesamtmasse	42 kg

Die Rohdaten der Messung beinhalten noch diverse Artefakte wie Resonanzen des Schwingensystems und Einflüsse der Probengeometrie. Eine gewisse Geometrieabhängigkeit bleibt im Zuge der Auswertung erhalten, um Partikeldämpfungssysteme auslegen zu können. Kopplungseffekte von Verbindungsstellen müssen aber herausgefiltert werden. Ein Differenzsignal zwischen einer Leermessung und einer Messung mit Probe gibt schon bereinigte Werte aus. Die Herstellung eines mit Pulver gefüllten Messkörpers gestaltet sich beim L-PBF vergleichsweise einfach, denn ein geschlossener Hohlraum im CAD-Modell hat automatisch einen schüttdichten Pulverspeicher im Bauteil zur Folge. Bei einem metallischen Behälter ist lediglich die Beobachtung der Pulverbewegung von außen unmöglich. Zur Montage auf dem Gewindedorn des Shakers wird nach der additiven Probenherstellung noch eine Gewindebohrung in die Stirnfläche des Probenkonus geschnitten. Abbildung 5.5 zeigt a) den Halbschnitt des konstruierten Pulverbehälters und b) den schematischen Messaufbau.

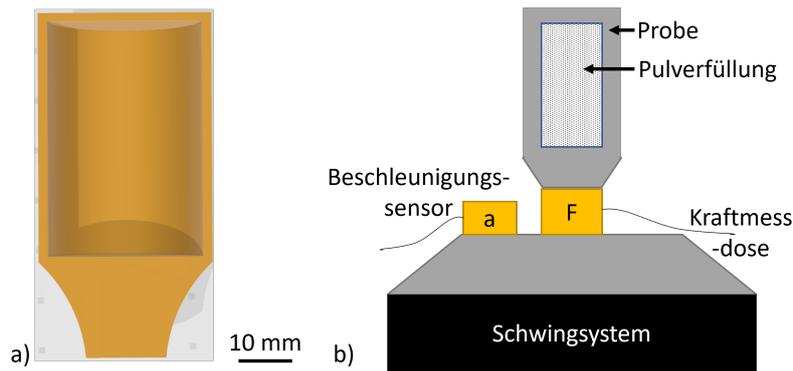


Abbildung 5.5: a) Pulverbehältergeometrie im Halbschnitt und b) schematischer Messaufbau der Pulverdämpfung am Fraunhofer IZfP

## 5.5 Testkörpergeometrien

Die Anzahl an Testkörpergeometrien sollte aus Gründen der Materialersparnis so gering wie möglich gehalten werden, ohne jedoch an Qualität der experimentellen Ergebnisse zu verlieren. Die Wahl fällt auf drei Prüfgeometrien, die es in den verschiedenen, im Folgenden beschriebenen Messungen zu charakterisieren gilt. Abbildung 5.6 zeigt Fotografien der Standard-Testgeometrien, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung finden. Tabelle 5.4 zeigt die zugehörigen bemaßten Darstellungen.

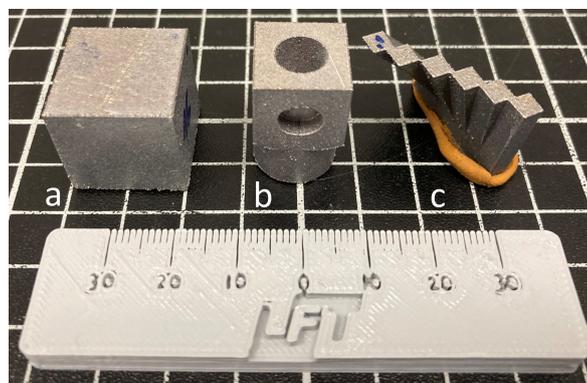


Abbildung 5.6: Standardtestgeometrien für a) die Rauheits- und Dichtemessung, b) die Messung der Form- und Maßhaltigkeit und c) die Rauheit in Abhängigkeit des Neigungswinkels

Tabelle 5.4: Bemaßte Darstellungen der Standard-Testgeometrien dieser Arbeit

Probe	Draufsicht	Seitenansicht
a) Würfel		
b) KMG-Test		
c) Fächer		

Die nachstehend erläuterten Messmethoden stellen verschiedene Anforderungen an die Probengeometrien. Die Würfelprobe (Abbildung 5.6 a)) dient der archimedischen Dichtemessung und ist gleichzeitig so groß, dass sowohl auf der Upskin-Fläche als auch auf den Seiten taktile Rauheitsmessungen in verschiedenen Richtungen durchgeführt werden können. Der KMG-Testkörper (Abbildung 5.6 b)) dient Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit hinsichtlich Form, Maß und Lage am Koordinatenmessgerät und teilt sich auf in einen zylindrischen Einspannbereich und einen würfelförmigen Messbereich mit zwei Sacklöchern auf. Die Sacklöcher mit den Durchmessern von 8 mm im Upskin und 7 mm in der Seite erhöhen die Zahl der möglichen untersuchten Geometrieigenschaften deutlich. Die Fächerprobe (Abbildung 5.6 c)) verfolgt das Ziel, die Rauheit von Upskin- und Downskin-Flächen in Abhängigkeit ihrer Neigung zu bestimmen, wobei alle Probenteile einen Winkel von  $> 38^\circ$  zur Substratplatte aufweisen, um die Notwendigkeit von Supports zu umgehen.

## 5.6 Rauheitsmessung

Die taktile Messung technischer Oberflächenrauheiten bedient sich des Tastschnittverfahrens nach DIN EN ISO 4287 [159] und findet statt mit Hilfe eines Perthometers PGK120 (Mahr GmbH), das im Turnus von 100 Tagen an einem Rauheitsnormal kalibriert wird. Die Norm schreibt außer dem Messablauf noch die mathematische Extraktion von Kenngrößen der Rauheit und Welligkeit fest. Vor der Messung ist eine Grenzwellenlänge zu definieren [160], unterhalb derer der Ausschlag des Messtasters als Signal und oberhalb derer der Ausschlag als Rauschen, Oberflächenkrümmung oder Schiefstand der Probe herausgefiltert wird. Oftmals nennt sich diese Funktion Welligkeitsfilter und es besteht Verwechslungsgefahr mit Kenngrößen der dominanten Welligkeit, die im Profil erhalten bleibt. Die Wahl der Grenzwellenlänge fällt je nach geschätzter mittlerer Rautiefe  $R_z$  auf 2,5 mm oder 8 mm für Rauheiten im Bereich von 10  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  oder 50  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$ . In allen Messungen dieser Arbeit beträgt die Grenzwellenlänge 2,5 mm. Falls die Rauheit  $R_z = 50 \mu\text{m}$  übersteigt, führt diese Wahl eher zu einer Unterschätzung des realen Wertes, disqualifiziert diese Oberfläche im Vergleich zu denen im passenden Intervall aber ohnehin. So kann die konstant gewählte Grenzwellenlänge die Eignung von Parametersätzen unterscheiden. Eine Taststrecke besteht aus fünf Messstrecken in der Länge der Grenzwellenlänge und je einer halben Grenzwellenlänge zum Ein- und Ausschwingen des Tasters. Daraus ergibt sich eine Taststreckenlänge von 15 mm für eine Grenzwellenlänge von 2,5 mm, sodass Bauteile oder Proben ebene Flächen mit mindestens dieser Dimension in der Messrichtung aufweisen müssen. Mit einem zusätzlichen Puffer von 5 mm Kantenlänge eignen sich die Würfelproben aus Abbildung 5.6 a) für die beschriebene Messung.

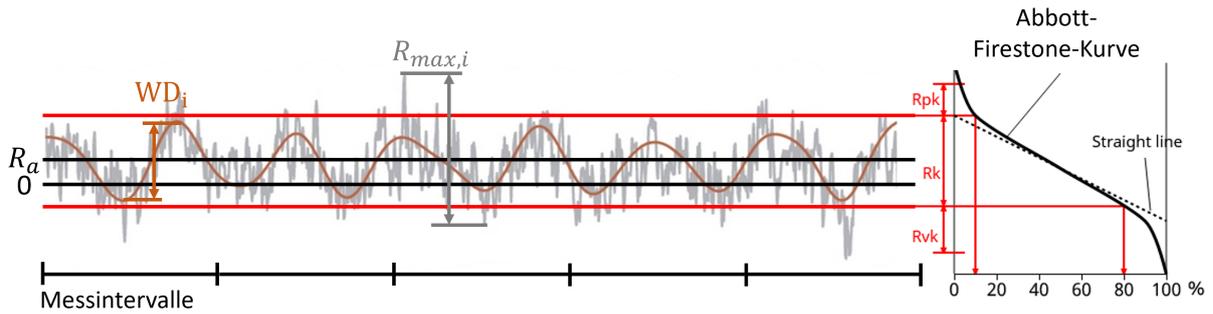


Abbildung 5.7: Extraktion von Kenngrößen aus einem schematischen Rauheitsprofil, gemäß [160, 161]

Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$ , der Gesamtmittelwert des gemessenen Messprofils  $z(x)$ , die maximale Rautiefe  $R_{max}$  und die mittlere Rautiefe  $R_z$  als Mittelwert der maximalen Spannweiten innerhalb der fünf Messstrecken im Profil sind klassische Rauheitskennwerte. Für L-PBF-Bauteile finden diese Größen zur besseren Vergleichbarkeit zwar Anwendung, aber sie lassen keine Rückschlüsse auf die Ursprünge der Rauheiten zu. Daher empfiehlt es sich, auf Größen der Kernrauheit zurückzugreifen. Dazu werden nach Abbott und Firestone die Daten des Profils in eine Summenhäufigkeitskurve der  $z(x)$ -Werte überführt. Daraus lassen sich gemäß Abbildung 5.7 die Kernrauhheitswerte  $R_{pk}$ ,  $R_k$  und  $R_{vk}$  bestimmen, wobei der Index  $k$  für Kernrauheit,  $p$  für Peak und  $v$  für Valley steht. Also geben diese drei Kenngrößen die Rauheit im Kern des Profils, auf den Berggipfeln und in den Tälern an. Je nach ihren Relationen kann auf die Ursprünge der zumeist großen Rauheiten geschlossen werden, z.B. auf Partikelanhaftung bei hohem  $R_{pk}$  oder Stöße von einzelnen Teilen im Scanmuster bei großem  $R_{vk}$ . Die graphische Darstellung der Extraktion dieser Kennwerte findet sich in Abbildung 5.7, während Abbildung 5.8 die Bezeichnungen von Messrichtungen auf Upskin- und Seitenflächen an Würfelproben aus Abbildung 5.6 a) definiert.

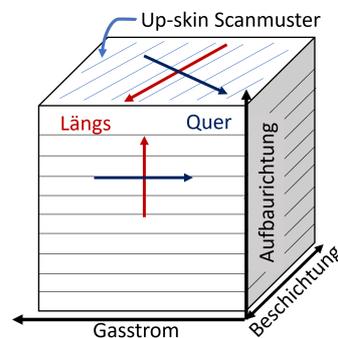


Abbildung 5.8: Definition der Bezeichnungen von Richtungen der taktilen Rauheitsmessung an Würfelproben

Der Einfluss der Flächenneigung zur Substratplatte oder auch komplementär dazu zur z-Richtung auf die Beschaffenheit von Upskin- und Downskin-Flächen wird in einer Messrichtung mit drei Messungen pro Fläche und Winkel an den Fächerproben aus Abbildung 5.6 c) untersucht. Aus den drei Messungen berechnete Mittelwerte und Standardabweichungen für Stichproben lassen sich Rückschlüsse auf die Homogenität und Entwicklung nicht gestützter Oberflächen in diskret gewählten sechs Neigungswinkeln ziehen. Die Winkelnotation bezieht sich auf die Neigung zur z-Achse, also zur Baurichtung. Dabei bezeichnen positive Winkel Upskin- und negative Winkel Downskin-Flächen.

## 5.7 Dichtemessung

### 5.7.1 Archimedische Dichtemessung

Die archimedische Dichtemessung nutzt die Entstehung von Auftriebskräften von Körpern in Flüssigkeiten im Vergleich zur Luft aus. Im Rahmen der Messungen bestimmt die Analysewaage AT200 (Mettler-Toledo GmbH) die Masse des Probekörpers zunächst an Luft in einer Schale auf dem Galgen und zusätzlich bei Immersion im Wasserbad in einem Korb am Galgen. Also eignen sich nur geschlossporige Körper wie beispielsweise L-PBF-Teile für eine Messung ohne Vorbehandlung wie z.B. die in Abbildung 5.6 dargestellten Würfelproben. Um große Messfehler zu vermeiden, wird das Wasserbad im Aufbau (siehe Abbildung 5.9) von der Waage entkoppelt und die Probe in einem Korb gewogen.

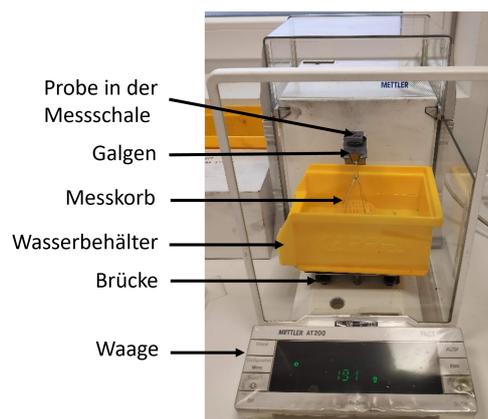


Abbildung 5.9: Aufbau zur archimedischen Dichtemessung

Vor der eigentlichen Wägung der Proben wird die Temperatur des Wassers mit einem Flüssigkeitsthermometer der Genauigkeit  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen und anhand einer Tabelle [162, 163] die Dichte  $\rho_{H_2O}$  bestimmt. Zusammen mit den Probenmassen an Luft und in Wasser  $m_L$  und  $m_{H_2O}$  sowie der theoretischen Massendichte des Werkstoffes

$\rho_{th} = 2,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  für AlSi10Mg [67] ergeben sich die absolute Dichte der Probe  $\rho$  in  $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und die relative Dichte  $\rho_r$  in % zu Gleichung 5.5.

$$\rho = \frac{m_L \rho_{H_2O}}{m_L - m_{H_2O}}; \rho_r = \frac{\rho}{\rho_{th}} \quad (5.5)$$

Zur statistischen Absicherung der Berechnungen werden alle Wägungen je drei Mal durchgeführt und die jeweiligen Mittelwerte in Gleichung 5.5 eingesetzt. Dabei kommt der gründlichen Trocknung der Proben zwischen den Wägungen im Wasserbad besondere Bedeutung zu. Bei angemessener Sorgfalt liegen die berechneten Dichtefehler nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung bei  $< 0,02 \%$ . Das trifft sowohl für eine Fehlerrechnung, in der die Messunsicherheit der Waage als auch wenn die Standardabweichung der Wägungen als Ursache angesehen wird. Über die statistische Absicherung und die verhältnismäßig geringen Messfehler hinaus bietet das archimedische Verfahren den Vorteil, die relative Dichte als Komplementärgröße zur Porosität integral über die gesamte Probe unabhängig von der Geometrie zu bestimmen. Konkurrierende Messmethoden wie z.B. die Analyse von Einzelschliffen mit optischer Mikroskopie können die Messung verfälschen, da ein einzelnes Bild offenkundig nicht repräsentativ sein kann.

### 5.7.2 Röntgen-CT

Räumliche Porenanordnungen kann Röntgen-CT mittels Durchstrahlung von Proben aus vielen Blickwinkeln aufnehmen. Einzelne Aufnahmen repräsentieren Karten des Massenschwächungskoeffizienten in der jeweiligen Projektion. Dadurch lassen sich Inhomogenitäten im Werkstück auflösen und mit Hilfe der kostenlosen Software 3D Slicer (The Slicer Community) darstellen. Am Fraunhofer IZfP steht ein CT-Gerät des Typs CT-alpha (Procon X-ray GmbH) zur Verfügung. Bei Untersuchungen an AlSi10Mg beträgt die maximale Kantenlänge einer damit untersuchten Würfelprobe ca. 8 mm, wenn ungefähr  $10 \mu\text{m}$  große Poren aufgelöst werden sollen.

## 5.8 Messung von Maßhaltigkeit, Form und Lage

Additive Fertigungsverfahren genießen wegen der Herstellbarkeit hochkomplexer Geometrien ein hohes Ansehen [2]. Jedoch reduziert sich mit steigender Komplexität auch die Möglichkeit, die Einhaltung von Form-, Lage- und Maßtoleranzen zu prüfen. Die Charakterisierung von L-PBF-Teilen bleibt also auf modellhafte Geometrien beschränkt, die nicht das volle Potential der Technologie ausschöpfen. Die Wahl der Probengeometrie fällt letztlich auf einen mit Sacklöchern versehenen Würfel als Prüfgeometrie auf ei-

nem leicht spannbaren Zylinder, siehe Abbildung 5.6. Der Verzicht auf Stützstrukturen begrenzt einerseits den maximalen Durchmesser des liegenden Loches auf  $< 8$  mm, verhindert aber andererseits die Verfälschung von Geometrieigenschaften durch erforderliche Nachbearbeitung. Der Durchmesser des Zylinders von 15 mm entspricht der Kantenlänge des Messwürfels, sodass die Ecken des Würfels frei im Pulverbett gebaut werden. Als Resultat daraus entsteht an diesen Stellen Warping, das heißt, die im Soll ebenen Ecken verziehen sich rund in Baurichtung. In der realen Anwendung wäre das ein mögliches Ausschlusskriterium, die Messstellen werden dadurch aber nicht beeinflusst. Für die Messungen steht das KMG Prismo 7/9/5 (Carl Zeiss AG) mit der Steuerungs- und Messsoftware Calypso 2014 (Carl Zeiss AG) zur Verfügung, das Form-, Maß- und Lageeigenschaften gemäß DIN ISO 1101 [164] misst. Das Gerät verfügt über eine mathematische Temperaturkompensation durch Berücksichtigung der thermischen Dehnung gemessener Teile und Normale. Pro Maschinenstart und bei jedem Tasterwechsel steht eine Kalibration an einem im KMG montierten Kugelnormale aus Keramik an. Zwei Stufen umfasst die Kalibration, wobei zuerst der maschinen-zugehörige Bezugstaster die Maschine kalibriert und anschließend die Referenz zum Messtaster bezogen wird. Für mehrarmige Taster wiederholt sich diese Kalibration für jeden Messarm im Einsatz. Mit einer vordefinierten Anpresskraft von 200 mN drückt der Taster sowohl beim Einmessen an das Normal als auch in der späteren Messung an die Probe, sodass auch die Steifigkeit des Messkopfes in der Berechnung von Kennwerten berücksichtigt werden muss. Bei der Festlegung des Messprogrammes in Calypso gilt es zunächst, über mindestens eine Ebene und eine Kante das Koordinatensystem der Probe zu definieren und gleichzeitig eventuelle Schiefstände der manuell positionierten Probe im Spannfutter zu korrigieren. Die Angabe aller Messwerte erfolgt innerhalb des so festgelegten Probenkoordinatensystems. Prozessbedingt weist ein L-PBF-Teil Unterschiede in der Ausbildung von Oberflächen auf, denn es existieren anisotrope Einflüsse in der Beschichtungsebene und in Aufbaurichtung, zum Beispiel Upskin- und Downskin-Flächen. Um zu überprüfen, ob sich die Anisotropie der Oberflächen auch in der geometrischen Performance von L-PBF widerspiegelt, gilt es Form-, Maß- und Lagegenauigkeiten in verschiedenen Richtungen miteinander zu vergleichen. Folgende Eigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit am KMG untersucht, wobei die Messstellen in Abbildung 5.10 dargestellt sind:

- *Koaxialität (A)*: Lageabweichung des Upskin-Sackloches von der Flächenmitte des Würfels
- *Rundheit (B)*: Formabweichung des Upskin-Sackloches vom idealen Kreis
- *Durchmesser (C)*: Maßabweichung der Sacklöcher vom vorgegebenen Soll

- *Kantenlängen (D)*: Maßabweichung der Kantenlängen vom vorgegebenen Soll
- *Parallelität (E)*: Lageabweichung zweier Kanten zueinander in Baurichtung sowie in der Beschichtungsebene

Das zylindrische Upskin-Sackloch, dessen Achse parallel zur z-Richtung steht, kann im Gegensatz zu dem ebenfalls zylindrischen Sackloch in der Seitenfläche mit dem Messtaster gescannt werden. Von dem seitlichen Loch geht insofern Gefahr für das Messgerät aus, als dass der starke Einfluss des Downskin-Effektes eine Art Grat am oberen Rand des Loches bildet, der den Taster beschädigen könnte. Deshalb reduziert sich die Messung hier auf vier Punkte in der unteren Hälfte der Kreisfläche, die keine Berechnung der Rundheitsabweichung zulässt. Die Parallelitäten geben die Lage von Würfelkanten zueinander an. Da die Würfecken Warping unterliegen, dient in z-Richtung der Boden des Upskin-Sackloches als Messfläche. Dabei stimmen die Richtungen x und y des Probenkoordinatensystems nicht mit denen der Maschine oder sonstiger Berechnungen überein, da die Proben 15° um die z-Achse gedreht gefertigt werden, um starken Verschleiß der Beschichterlippe zu vermeiden. In der Folge vermischen sich also gegebenenfalls Effekte aus Gasstrom und Beschichtung während des Bauvorganges, wobei sich etwaige Effekte des Gasstroms eher in x und die der Beschichtung eher in y niederschlagen müssten. Es besteht also bedingt die Möglichkeit, Einflüsse von einander zu trennen. Deshalb fokussiert sich die Auswertung auf geometrische Abweichungen in Baurichtung z und in der Beschichtungsebene (xy-Ebene).

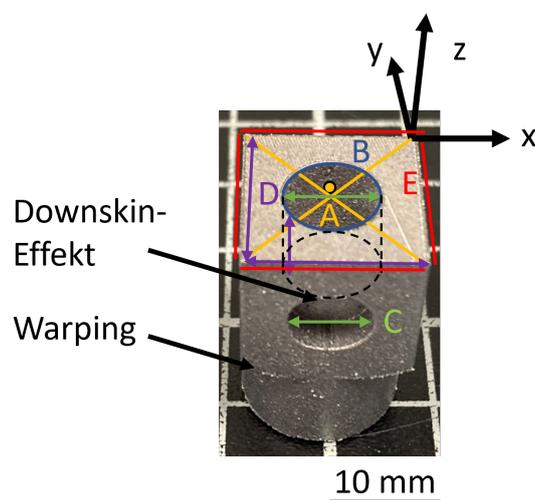


Abbildung 5.10: Verteilung der KMG-Messstellen an der Probengeometrie

## 5.9 Metallographische Präparation und Mikroskopie

Die metallographische Präparation dient der mikroskopischen Analyse von Werkstoffen. Oftmals steht dahinter das Ziel, Gefüge nach Schliff, Politur und Ätzung sichtbar zu machen. Die Existenz von Verunreinigungen wie nichtmetallischen Einschlüssen oder Porosität können ebenfalls betrachtet werden. Vorliegende Proben zur Präparation aus L-PBF- $\text{AlSi10Mg}$  müssen sich mehreren Schleifgängen auf SiC-Papieren mit immer feineren Körnungen in den Stufen 320, 500, 800 und 1200 (angegeben in Mesh) unterziehen. Am Schleif- und Poliergerät Saphir520 (ATM Qness GmbH) erfordert eine kratzerfreie Präparation dieses Werkstoffes manuelle Arbeit für jede Probe einzeln. Im Vorfeld müssen die Proben lediglich auf der Trennmaschine Labotom-3 (Struers GmbH) mittig aufgeschnitten werden. Auf die Abfolge von Schleifprozessen folgt die Politur auf Textiltüchern mit Diamantsuspension der mittleren Partikelgrößen  $6\ \mu\text{m}$  und  $3\ \mu\text{m}$  mit anschließender OPS-Politur. Aufgrund der Porosität von additiv gefertigten Proben bleiben oft Abtragspartikel und Diamantsuspension in den Poren hängen und verkratzen die Oberfläche im nächsten Arbeitsgang. Deshalb kommt der sorgfältigen Reinigung der Proben im Ultraschallbad zwischen zwei Arbeitsgängen mit Wasser, Isopropanol und anschließender Trocknung mit Druckluft besondere Bedeutung zu. Der beschriebene Effekt lässt sich dadurch abmildern, aber nicht beseitigen, sodass in den meisten Fällen Kratzer auf der polierten Oberfläche verbleiben. Kratzerfreie Schriffe, die in der späteren Mikroskopie genauere Analysen erlauben, entstehen durch lange Präparationsdauern in jedem Polierschritt. Gefügeanalysen bei Al-Legierungen stellen eine Herausforderung dar, da die meisten Ätzrezepte mit Flusssäure arbeiten. Davon geht jedoch ein erhebliches Gesundheitsrisiko aus, was zu immensen Arbeitsschutzvorkehrungen führen würde. Alternativ kommen zur Gefügeanalyse in dieser Arbeit elektronenmikroskopische Untersuchungen mit Elektronenrückstreubeugung (engl. electron backscatter diffraction, EBSD) zum Einsatz.

In den Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops Sigma VP (Carl Zeiss Jena AG) mit dem EBSD-Detektor Nordlys (Oxford Instruments PLC) am Lehrstuhl für Experimentelle Methodik der Materialwissenschaften (Prof. Dr. C. Motz, Universität des Saarlandes) lassen sich schließlich Kornorientierungen an Bildausschnitten der Fläche  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  und Genauigkeit  $1\ \mu\text{m}$  erkennen. Die Analyse der Korngröße findet in der Software EDAX OIM Analysis (AMETEK Inc.) statt. Polfiguren als Ergebnis einer automatisierten stereographischen Projektion erlauben Rückschlüsse auf die Existenz von Vorzugsorientierungen im betrachteten EBSD-Bildausschnitt und weisen auf Texturen hin. Aus den EBSD-Rohdaten erstellt die Software ATEX automatisch Polfiguren verschiedener Kristallachsen.

## 5.10 Statistische Datenbehandlung und Fehlerabschätzung

Je nach Art und Umfang von Messungen fällt eine Vielzahl an Rohdaten an, aus denen quantitativ Effekte abgelesen werden können. Unabhängig davon, ob im Ergebnis eine empirisch belegte Formel stehen soll, bedürfen die Daten in aller Regel einer statistische Absicherung, die Einblicke in die Reproduzierbarkeit eines Effektes gewährt und die Unterscheidung zwischen Ausreißern und validen Datenpunkten ermöglicht. Sofern also die Möglichkeit besteht, sind Messungen zu wiederholen, um haltbare Ergebnisse zu erzielen. Die Angabe von Fehlern erfolgt dabei auf verschiedene Art und Weise. Bei Rohdaten führen Wiederholungsmessungen dazu, dass der Mittelwert  $\bar{x}$  der  $n$  Messwerte  $x_i$  als angegebener Wert und die Standardabweichung als Fehler fungiert. Wenn lediglich eine Stichprobe in der Messung vorliegt und/oder die Art der statistischen Verteilung unklar ist, kommt eine andere Formel zum Einsatz als bei normalverteilten Daten einer Grundgesamtheit. Es gilt nach [165, 166] für die Standardabweichung einer Grundgesamtheit

$$s_G = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

und einer Stichprobe

$$s_P = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5.7)$$

In der Regel folgt auf die Bildung von Mittelwert und Standardabweichung bei Rohdaten eine weitere Verarbeitung, sodass die Standardabweichungen sich auch am Fehler der berechneten Größe beteiligen. Das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz gibt den Fehler einer berechneten Größe  $\Delta f$  an und berücksichtigt dabei die Fehler der in der Formel für  $f$  enthaltenen Größen  $\Delta x_i$ . Die Anzahl der fehlerbehafteten Größen betrage  $k \in \mathbb{N}$ . Es gilt [166]:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (5.8)$$

So lassen sich Messunsicherheiten in berechnete Größen überführen. Auch eine verkettete Anwendung dieses Formalismus ist möglich. Standardabweichungen und Fehler aus Gleichung 5.8 liegen in dieser Arbeit allen angegebenen Streuangaben zu Grunde. In einigen Fällen genügt jedoch hinreichende Rundung auf eine angemessene Zahl von Dezimalen, um die Fehlereinflüsse vernachlässigen zu können. In der Regel trifft das beispielsweise auf die relative Dichte von L-PBF-Bauteilen zu.

# 6 Theoretische Vorüberlegungen und Simulationen zur Schallunterstützung

## 6.1 Theoretische Vorüberlegungen zum Schalleinsatz beim L-PBF

Im Zuge der modellhaften Überlegungen zur Schallwirkung im Prozess werden zwei Koordinaten der Baurichtung  $z$  und  $z'$  eingeführt. Die Richtungen stehen zueinander parallel und weisen in die Aufbaurichtung, aber die  $z$ -Koordinate hat ihren Ursprung an der Unterseite der Substratplatte, während  $z'$  an der Oberseite startet, sodass  $z' = z + d_s$  gilt. Die relevanten Koordinaten sowie der schematische Aufbau des untersuchten Systems sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

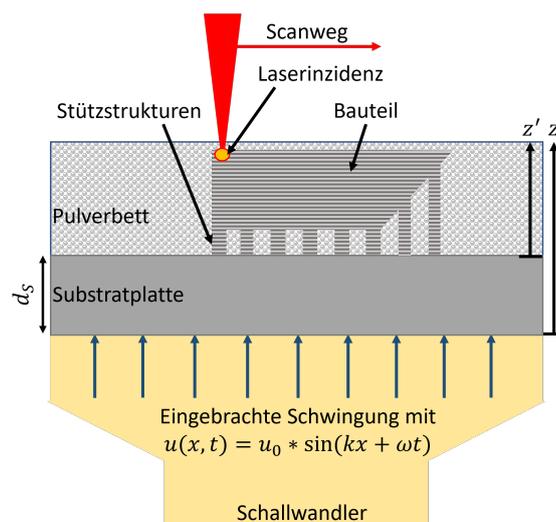


Abbildung 6.1: Schematische Skizze des Sono-L-PBF-Prozesses

Die Einkopplung des Schalls von unten durch die Bauplattform bewirkt eine definierte analytische Beschreibbarkeit des Systems und ermöglicht einen Einbau im Bauraum der Maschine. Dadurch wirkt der Schall vermutlich unmittelbarer auf das Pulverbett und das entstehende Bauteil als bei einer Beschallung von außen durch den Schacht, in dem das Substrat ohne klare Schallkopplung verfährt. Eine formschlüssige Verbindung besteht nur zwischen dem Pulverbett und der Schachtwand sowie zwischen der Dichtung der Basisplatte, auf die das Substrat geschraubt ist, und der Schachtwand. Durch Körperschall könnte sich eine äußere Beschallung durch die Verfahreinheit des Substrats übertragen, wobei eine Beschreibung der Schallwirkung kaum möglich wä-

re. Im Beschallungsfall durch das Substrat von unten gestaltet sich die Verbindung der Sonotrode mit Versorgungs- und Steuerungselektronik durch die Positionierung innerhalb des Bauraumes aber deutlich schwerer, da Kabel durch den Bauraum verlegt und heraus geführt werden müssen, ohne den Prozess z.B. beim Verfahren des Beschichters zu stören. Diese Herausforderungen sind konstruktiv lösbar, sodass die Wahl auf die definierten Kopplungsbedingungen der Beschallung von unten in Baurichtung fällt und im Folgenden ausschließlich behandelt wird. Der Schall wirkt im Prozess durch Prozesssignaturen, einerseits durch seine Energie, die einen Verlauf analog zum effektiven Schalldruck annimmt, und andererseits durch die eingebrachte mechanische Schwingung, die sich sowohl im Pulverbett als auch im Bauteil ausbreiten kann. Es gilt jedoch zu beachten, dass gerade das Pulverbett die Übertragung hemmt. Aus beiden Signaturen folgen letztlich die nachstehend beschriebenen Phänomene. Im Fokus stehen insbesondere die Bereiche, in denen während des Prozesses das Bauteil entsteht. Überhänge könnten dabei anderen Phänomenen unterliegen als Bereiche, die auf Vollmaterial aufbauen.

Die Übertragungswege des Schalls gestalten sich im Sono-L-PBF wahrscheinlich vielfältig. Der einfachste Fall ist die Einkopplung durch die Substratplatte und die Stützstrukturen ins Bauteil. Da hier artähnliche oder gar artgleiche Materialien in einer stoffschlüssigen Verbindung vorliegen, dürften Grenzflächeneffekte wie Reibungsverluste und Transmissionskoeffizienten deutlich unter eins nicht in bedeutendem Maße auftreten. Lediglich Porosität bietet Grenzflächen, an denen es zu Verlusten kommen kann. Erhebliche Anteile des Schalls koppeln in das Pulverbett ein. Zwischen einzelnen Partikeln entstehen zur Übertragung komplexe und statistisch verteilte Reibungs- und Kopplungszustände, um die über Phononen transportierten Schalloszillationen in die Bauhöhe zu transportieren. Durch den losen Zusammenhalt der einzelnen Pulverpartikel, deren komplexe Kontaktbedingungen, hohe Anzahl an Grenzflächen zwischen Partikeln sowie zwischen Partikeln und Inertgas schwächt sich wahrscheinlich die Schallintensität deutlich ab. In der Konsequenz muss es eine maximale Bauhöhe für jede Wandlerleistung geben, bis zu der die nachstehend erläuterten Effekte auftreten können. Analytische Abschätzungen wären zur Ermittlung dieser Grenze sicherlich zu grob, sodass eine experimentelle Überprüfung Aufschluss geben muss.

### **6.1.1 Folgen aus der Verdichtung des Pulverbetts**

Die eingebrachte Vibration des Schalls führt zu der Vermutung, dass sich das Pulverbett unter dieser Wirkung vom schüttdichten einem klopfdichten Zustand annähert. Inwieweit Schalleinwirkung leistungsabhängig eine Pulversäule verdichten kann und wie viele Vibrationen einen klopfdichten Zustand erwirken, wird in Anhang C erörtert.

### **Stützwirkung des verdichteten Pulverbetts**

Wie bereits im Stand der Forschung beschrieben, führt eine hohe Verdichtung, gekennzeichnet durch ein großes Hausner-Verhältnis zu einer Herabsetzung der Fließfähigkeit von Pulverwerkstoffen [69]. Die Immobilisierung von Pulverpartikeln bringt eine Reduktion der Bewegungsfreiheit mit sich, sodass Pulverpartikel deutlich schwerer gegeneinander abgleiten oder abrollen können und somit die Pulversäule eine stärkere Kohäsion ausbildet. Das wiederum erhöht die mechanischen Konstanten der Pulversäule, die allerdings schwierig bis unmöglich zu messen sind. Ein einfaches Experiment liefert jedoch den qualitativen Beweis für diese Aussage. Der zylinderförmige Messtopf der Schüttdichtemessung dient dabei im vollständig gefüllten Zustand als Versuchsobjekt. Ohne Verdichtung fließt das beinhaltete Pulver unter Einfluss der eigenen Schwerkraft aus dem Behälter aus. Nach einer Verdichtung wie in den Pulververdichtungsexperimenten im Ultraschallbad reicht die eigene Schwerkraft nicht mehr aus, um weder das Pulver ausfließen zu lassen noch einen Bruch der Pulversäule zu provozieren. Erst die mechanische Einwirkung eines Spatels löst unregelmäßige Pulverbruchstücke heraus. Das belegt einerseits die in der Literatur beschriebene, starke Reduktion des Fließverhaltens und andererseits die Notwendigkeit höherer mechanischer Spannungen, um die verdichtete Pulversäule zum Nachgeben zu bewegen. Eine herabgesetzte Nachgiebigkeit bedeutet allgemein einen erhöhten mechanischen Modul. In der Konsequenz erschwert sich dadurch die Maschinenrüstung, da das Pulverbett, das die Bauteile umgibt, nach Baujobende manuell entfernt wird. Viel schwerer wiegt jedoch der mögliche Vorteil, dass das Pulverbett selbst mehr zur Stützung von Überhängen am Bauteil beiträgt. Das kann Grenzwerte zum Einsatz von Stützstrukturen verschieben, wobei eine Verringerung des Grenzwinkels zwischen Substratplatte und Bauteil sowie eine Erhöhung des Grenzdurchmessers von liegenden Löchern erwartbar ist. Hier bleibt die Vermutung auf qualitative Trends beschränkt, da die Grenzwerte eher empirische Erfahrungen als quantifizierte Qualitätsanforderungen abbilden. Grenzkriterien könnten aus der speziellen Anwendung formulierte maximale Rauheiten für den Grenzwinkel und maximale Rundheitsabweichungen liegender Löcher, jeweils im As-built-Zustand, darstellen. Die Winkelabhängigkeit der Rauheit resultiert aus dem Treppenstufeneffekt sowie aus dem Anteil der Laserspurbreite, der im freien Pulverbett liegt und zur erheblichen Ausbildung des Downskin-Effektes führt.

### **Geometriegenauigkeit bei verdichtetem Pulverbett**

Es gibt Grund zur Annahme, die Geometriegenauigkeit könnte durch die Beschallung und Pulverbettverdichtung gesteigert werden. Mit steigender Verdichtung nähert sich das Pulverbett, das das entstehende Bauteil umgibt, in der Vorstellung einer Tiegel-

wand an, die das Wegfließen von Schmelze unmittelbar vor der Erstarrung verhindert. Es ist also mit steigendem Hausner-Verhältnis davon auszugehen, dass sich die Maßhaltigkeit erhöht. Weiter erfolgt die Pulverablage während der Beschichtung deutlich ortstreuer, da die Wahrscheinlichkeit für eine Kaskade von Partikelumlagerungen als Folge der Kinematik der Pulverdeposition und der Masse der abgelegten Schicht sinkt. Das resultiert aus der Immobilisierung von Pulverpartikeln und der damit einhergehenden Reduktion an Freiheitsgraden zur Bewegung. Diese Umstände können also eine gesteigerte geometrische Genauigkeit bewirken, sofern die schallbedingte Oszillation die Oberfläche des Pulverbetts nicht zu stark aus dem Laserfokus heraushebt und so breitere Schmelzspuren entstehen. Diese Verbesserungen spielen sich vermutlich innerhalb Grenzen der Genauigkeitssteigerung ab, da L-PBF-typische Quellen für Geometrieabweichungen wie diskrete Pulverlagen und sich materialabhängig bildende Schmelzbadbreiten ihren Einfluss behalten.

### 6.1.2 Folgen aus der Beschallung der Schmelzphase

Die erheblichste erwartbare Wirkung entfaltet der Schall auf die Schmelzphase. Es ist also wichtig, dass der Schall kontinuierlich im Prozess wirkt. Die Auslenkung des Schalls kann zwar gegebenenfalls die Lage der Belichtungsfläche im Lichtkegel des Lasers aus dem Fokus heben, aber die nachstehend erklärten Effekte auf den Werkstoff gleichen den Nachteil aller Voraussicht nach aus. Bei der Erstarrung steigt die Viskosität der Schmelzphase rapide an. Deshalb gelingt es Gasblasen, die aus verschiedenen Bildungsmechanismen entstehen, nicht mehr, den erstarrenden Körper zu verlassen. Die mechanische Wirkung der Schallenergie kann wahrscheinlich etwaige Aktivierungsenergien, die Gasblasen zum Verlassen der Schmelze aufweisen müssen, aufbringen. Damit lässt sich direkt eines der wichtigsten technischen Argumente gegen die Additive Fertigung adressieren. Mit der Herabsetzung der Porosität geht eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers einher, was die Kristallisationskinetik beeinflussen könnte. Darüber hinaus treten wahrscheinlich weitere Einflüsse des Schalls auf die Kristallisation auf. Entlang des Temperaturgradienten von Laserinzidenz zum Substrat in negativer z-Richtung bilden sich Stengelkristallite analog zum typischen Gussgefüge aus [167]. Schalleinwirkung verändert den Temperaturgradienten an sich natürlich nicht, kann aber Kristallite im Wachstum möglicherweise mit ihrer Achse aus dem Temperaturgradienten heraus rotieren, sodass sich die Kornform eher globulitisch statt stengelförmig ausbildet, da die Wachstumsrichtung parallel zum Temperaturgradienten bestehen bleibt. Möglicherweise sind Kristallite so zum Temperaturgradienten orientiert, dass sie nach einer Rotation nicht mehr weiter wachsen können. Unabhängig von der weiteren Wachstumsfähigkeit wird ein Stengelkristallwachstum mindestens

gehemmt, was zu globulitischeren Gefügen führt. Ein globulitischeres Gefüge unter Schalleinwirkung ist tatsächlich schon beim Laserauftragsschweißen dokumentiert [4], was die Modellvorstellung belegt.

Ein weiterer Grund könnte im Energiebeitrag des Schalls zur Keimbildung und damit zur Keimbildungsrate liegen. Die Bildung eines Kristallisationskeims erfordert eine äußere Triebkraft durch Unterkühlung einer Schmelze, was zu einer Reduktion der Gibbs'schen freien Enthalpie mit  $\Delta G < 0$  führt. Es konkurrieren im Mechanismus der homogenen Keimbildung die frei werdende Volumenenergie, die vom Volumen eines als kugelförmig angenommenen Keims mit Radius  $r$  beschrieben wird als  $\Delta G_V = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_V$  mit der aufzuwendenden Oberflächenenergie  $\Delta G_O = 4\pi r^2 \gamma$  [168].  $\Delta g_V$  beschreibt dabei die spezifische Volumenenergie und  $\gamma$  die spezifische Oberflächenenergie. Wenn die unterkühlte Schmelze nun zusätzlich mit einer Schallenergie  $E_{Sono} = \int p(z) dV$  in Abhängigkeit vom Volumenintegral des lokalen Schalldrucks beaufschlagt wird, ergibt sich die Energiebilanz zu:

$$\Delta G_{Sono,hom} = \Delta G_O - (\Delta G_V + E_{Sono}) < \Delta G_O - \Delta G_V = \Delta G_{hom} \quad (6.1)$$

Für den lokalen Schalldruck  $p(z)$  gilt gemäß der hyperbolischen Schallschwächung im Fernfeld [143] und der Annahme des Wertes  $p_0$  in  $z = 0$ :  $p(z) = \frac{p_0}{z+1}$ , wobei  $z$  und  $1$  in Millimetern angegeben werden. Damit ergibt sich der kritische Keimradius  $r_{Sono,hom}^*$ , der zum Kristallwachstum erforderlich ist, als:

$$\left. \frac{d\Delta G_{Sono,hom}}{dr} \right|_{r=r_{Sono,hom}^*} = 0 \Leftrightarrow r_{Sono,hom}^* = \frac{2\gamma}{\Delta g_V + \frac{p_0}{z+1}} < \frac{2\gamma}{\Delta g_V} = r_{hom}^* \quad (6.2)$$

Gleichung 6.2 beschreibt, wie sich der kritische Keimradius im Beschallungsfall im Vergleich zum konventionellen Fall  $r^*$  verkleinert und dabei einer Abhängigkeit vom Schalldruck folgt. Der kritische Keimradius zeigt zudem ein Maximum der Gibbs'schen freien Enthalpie an, das gleichzeitig eine Energiebarriere  $\Delta G_{max}$  für die Kristallisation darstellt. Die Potentialbarriere wird auch durch die Beschallung verringert, wie Gleichung 6.1 zeigt.

Die Einführung der heterogenen Keimbildung trägt Hilfseffekten, die die Keimbildung vereinfachen, Rechnung. Im konventionellen Fall kann die Benetzung eines Keims auf Fremdoberflächen wie einer Tiegelwand oder an Verunreinigungen in der Schmelze das Keimwachstum gegenüber dem Zerfall energetisch begünstigen. Nach [168] multipliziert sich der gesamte Term von  $\Delta G$  mit einem Vorfaktor  $k_{het} \in (0; 1)$ , der von den Benetzungseigenschaften des Keims auf einer fremden Oberfläche abhängt. Die eingekoppelte Schallenergie bleibt davon aber unberührt, da diese Energieform von

außen unverändert einwirkt und nicht durch den Keimbildungsmodus beeinflusst wird. Es gilt:

$$\Delta G_{\text{Sono,het}} = k_{\text{het}} \Delta G_O - (k_{\text{het}} \Delta G_V + E_{\text{Sono}}) < \Delta G_{\text{Sono,hom}} \quad (6.3)$$

$$\left. \frac{d\Delta G_{\text{Sono,het}}}{dr} \right|_{r=r_{\text{Sono,het}}^*} = 0 \Leftrightarrow r_{\text{Sono,het}}^* = \frac{2\gamma}{\Delta g_V + \frac{p_0}{k_{\text{het}}(z+1)}} < r_{\text{Sono,hom}}^* \quad (6.4)$$

$$r_{\text{Sono,het}}^* < r_{\text{Sono,hom}}^* < r_{\text{het}}^* = r_{\text{hom}}^* \wedge \Delta G_{\text{Sono,het}} < \Delta G_{\text{Sono,hom}} < \Delta G_{\text{hom}} \quad (6.5)$$

Diese Rechnungen beweisen, dass sich im Zuge der Beschallung sowohl die Energiebarriere als auch der kritische Keimradius durch Beschallung absenkt. Im konventionellen Fall senkt der Übergang von homogener zu heterogener Keimbildung nur die Energiebarriere ab. Die Beschallung kann nun zusätzlich den kritischen Keimradius reduzieren, sodass mehr kleine Keime wachsen können anstatt zu zerfallen. Die qualitativen Kurven für die konventionelle homogene Keimbildung und schallunterstützte homogene Keimbildung sind in Abbildung 6.2 gegeben. Das erklärt anschaulich, dass sich die Keimbildungsrate erhöhen muss. Der rechnerische Beleg folgt der Proportionalität der Keimbildungsrate  $\dot{N} \propto \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{max}}}{RT}\right)$  zur Exponentialfunktion der Energiebarriere, der Gaskonstanten  $R$  und der Temperatur  $T$ . Durch das negative Vorzeichen des Exponenten wächst die Keimbildung exponentiell, wenn die Energiebarriere sinkt.

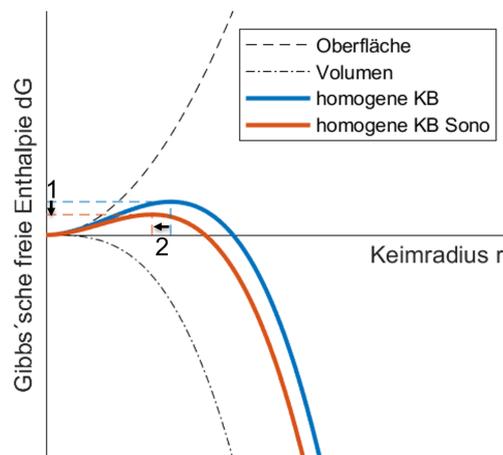


Abbildung 6.2: Qualitativer Plot der konventionellen heterogenen Keimbildung im Vergleich zur schallunterstützten und damit einher gehende Absenkung der Energiebarriere (1) und des kritischen Keimradius (2)

Durch eine energetisch vereinfachte Kristallisation bilden sich mehr Kristallite, an vielen Orten der Schmelze. Zusätzlich zur Rotation eines wachsenden Kristalliten unterbaut diese Erkenntnis die These, dass sich das Gefüge verfeinert und sich eher globulitische statt stengelförmige Körner bilden. Folglich lässt sich durch die Beschallung der erstarrenden Schmelze die Anisotropie herabsetzen und die Festigkeit gemäß der Hall-Petch-Beziehung steigern. Auch die Zähigkeit wird durch ein feineres Gefüge erhöht.

Es ist hinreichend bekannt, dass im L-PBF-Prozess die Wärme sehr schnell von der Stelle der Laserinzidenz abfließt. Daher stellt sich die Frage, inwieweit verschiedene Mikrostrukturphänomene überhaupt die Zeit haben, sich ausbilden zu können. Jenseits des Phasendiagrammes eines jeden Mehrstoffsystems steht zur Betrachtung der kinetischen Komponente ein ZTU-Diagramm. Die charakteristischen Nasen [57] für den Beginn und das Ende der Bildung von bestimmten Gefügetypen einer Legierung ergeben sich über das Superpositionsprinzip aus der Temperaturabhängigkeit von Keimbildungsrate und Diffusionsvermögen. Wie zuvor gezeigt, erhöht sich die Keimbildungsrate für alle endlichen Temperaturen. Das Verhalten des Diffusionsvermögens wird mit Hilfe der Änderung des Diffusionskoeffizienten  $D$  erfasst. Allgemein folgt die Diffusion einem Exponential-Ansatz mit dem Boltzmann-Faktor  $k_B$  und der Aktivierungsenergie  $Q$  [168]:

$$D(T) = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{k_B T}\right) \quad (6.6)$$

Die Vibration des Schalls vermag es wahrscheinlich, Platzwechsel von Atomen zu vereinfachen oder gar zu beschleunigen, also werden Diffusionsmechanismen gefördert. Ab einer gewissen Grenzviskosität der Schmelze kommt der Effekt jedoch zum Erliegen. Eine Ergänzung der Schallenergie in der Gleichung des Diffusionskoeffizienten liegt daher nahe, da der Mechanismus immernoch eine Grenze behält, diese aber verschoben wird. Dabei bleibt der Vorfaktor  $D_0$  unverändert, da es sich um eine richtungsabhängige Materialkonstante handelt.

$$D_{Sono}(T) = D_0 \exp\left(\frac{E_{Sono} - Q}{k_B T}\right) \quad (6.7)$$

Da wahrscheinlich beim L-PBF von AlSi10Mg die hohe Abkühlgeschwindigkeit von ca.  $\dot{T} = 2 * 10^6 \frac{K}{s}$  [94] Diffusionsprozesse unterbindet, gewinnen schallbedingte Verschiebungen im ZTU-Diagramm umso mehr an Bedeutung. Die genannten Einflüsse auf den Diffusionskoeffizienten im stationären Fall und auf die Keimbildungsrate führen zu den Verschiebungen der Kurven in Abbildung 6.3. Ein ZTU-Diagramm entsteht aus dieser Darstellung nach Rotation der gelben und grünen Summenkurve um  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn. Folglich können Gefügearten bei konstanten Abkühlbedingungen erzielt werden, deren Bildung ohne Schalleinwirkung nur mit geringeren Abkühlraten möglich wäre.

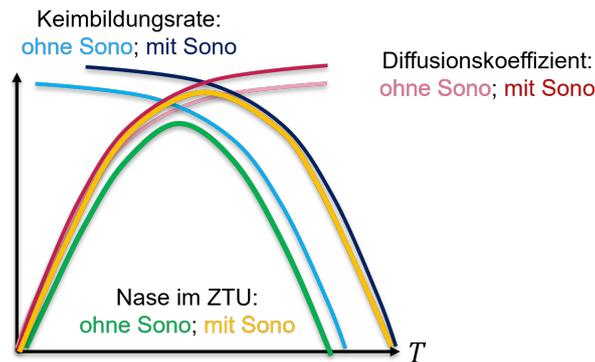


Abbildung 6.3: Bildung der Kurven des ZTU-Diagramms aus Keimbildungsrate und Diffusion für Standard-L-PBF und Sono-L-PBF (ohne und mit Sono)

Offenbar liegt nur für kurze Zeitspannen Material schmelzflüssig vor und kann daher nur kurzzeitig Schalleinfluss erfahren. Vermutlich führt eine kontinuierliche Beschallung des Prozesses dazu, dass jedes entstehende Bauteil mit Schwingungen geflutet wird und dadurch ebenso kontinuierlich schwingt. Folglich liegt zu jeder Zeit an jedem Ort der Bauteile ein Schwingungszustand vor, der an alle Orte Schallenergie zu jeder Zeit transportiert. Es kann somit keine Mindestfrequenz einer kontinuierlichen Beschallung geben, so lange überhaupt Schallwellen die Bauteile erreichen. Es gilt damit  $f > 0$ .

### 6.1.3 Potentielle Risiken für den Sono-L-PBF-Prozess

Trotz der vorgenannten Vorteile können für den Prozess und seinen Ablauf Risiken entstehen. Diese ziehen möglicherweise gesundheitliche Folgen für das Personal, Maschinenschäden und längere Prozesszyklen nach sich. Der Pegel des Schalls kann mit einzelnen Spitzen oder mit dauerhafter Exposition zu Gesundheitsschäden führen. Die technische Regel zur Arbeitssicherheit in lärmbelasteten Arbeitsbereichen TRLV Lärm Teil 1 [138] legt die Grenzwerte fest. Für Sono-L-PBF treffen die Grenzwerte für andauernde Lärmbelastung zu, wobei die Referenzzeit 8 h beträgt. Ab 80 dB am Arbeitsplatz treten erste Arbeitsschutzmaßnahmen in Kraft wie eine gesonderte Unterweisung von Mitarbeitenden und die Bereitstellung von Gehörschutz, ab 85 dB gilt eine Pflicht zum Tragen des Gehörschutzes und ein verpflichtendes Angebot von arbeitsmedizinischen Untersuchungen.

Durch die sukzessiv anwachsende Bauhöhe erhöht sich iterativ die beschallte Masse im gewählten Aufbau. Daraus resultiert die Verschiebung von Resonanzfrequenzen über signifikante Frequenzbereiche, sodass es bei der Wahl einer konstanten Beschallungsfrequenz während des Prozesses zur Resonanzkatastrophe kommen kann. In einem solchen Fall, in dem sehr hohe Auslenkungen auftreten, könnten Bauteile bereits geschädigt werden, bevor der Baujob fertig gestellt ist. Darüber hinaus könnte

sich das Pulverbett entsprechend der Ausbildung der aktiven Mode inhomogen umverteilen. Das führt zu einer ungleichmäßigen Oberfläche des Pulverbettes und damit zu ungenügenden Bauteileigenschaften, da keine einheitliche Pulverlagendicke mehr vorliegt und Anhäufungen die belichtete Pulveroberfläche aus der Fokusebene des Lasers hinaus heben.

## 6.2 Simulation der Schallausbreitung in Pulverbett und Bauteil

Vereinfachte Simulationen bilden die Realität zwar nicht akkurat ab, dienen aber dazu, ein Gefühl für die räumliche Verteilung physikalischer Eigenschaften und Felder zu erlangen. In diesem Fall steht die Ausbreitung des Schalls in einer angenäherten Form des Sono-L-PBF im Zentrum. In zwei Simulationsstudien soll die Schallverteilung, charakterisiert durch die resultierende mechanische Auslenkung  $u$ , für das Pulverbett und für ein einfaches Bauteil analysiert werden. Selbstverständlich finden AM-Verfahren bei einfachen Geometrien keine Anwendung, aber es geht hier darum, grundlegende Phänomene der Schallausbreitung zu beobachten und mit der Theorie zu verknüpfen. Die Betrachtung erfolgt in beiden Studien isoliert voneinander, sodass bei der Analyse des Pulverbettes kein Bauteil im Bauraum steht und bei der Analyse des Bauteils kein Pulverbett vorliegt. Jede Simulationsstudie beinhaltet Momentaufnahmen verschiedener Bauhöhen in fünf diskreten Bauhöhen. In der Studie zum Pulverbett werden Auftragsdicken von 0,3 mm, 10 mm, 25 mm, 40 mm und 50 mm betrachtet, wobei die Studie zum Bauteil bis auf 0,3 mm dieselben Höhen benutzt. Der erste Wert in der Bauteilstudie liegt bei 5,3 mm, da üblicherweise 5 mm hohe Stützstrukturen unter den Bauteilen sitzen. Bei 5,3 mm wird somit sichtbar, wie sich geometrisch vereinfachte Stützstrukturen auf die Schallausbreitung im Bauteil auswirken.

### 6.2.1 Aufbau und Validierung der Simulation

Die Simulation in Ansys Workbench 2022 R1 kombiniert eine Modalanalyse mit einer harmonischen Analyse, wobei zunächst die Resonanzfrequenzen berechnet und danach die Frequenzgänge für mechanische Spannungen, Verschiebungen und Pegel berechnet werden. Als Ergebnis liegen Animationen, Kurven und Kennzahlen vor, die quantitativ einer Validierung bedürfen. Dazu dient ein Stab, an dessen Stirnfläche Schalleinkopplung simuliert wird. Die gewählten Materialien und Eingangsparameter sind dieselben wie in den tatsächlichen Studien. Die Ergebnisse der Validierungssimulation stehen im Vergleich zu theoretischen Rechnungen. Zu erwartende Resonanzen dienen als Abgleichkriterium. Für einen schwingenden Stab gibt es in der Theorie unendlich viele Eigenfrequenzen, die gemäß [139] von der Massendichte  $\rho$  und einem

mechanischen Modul  $M$  abhängen. Für die Existenz einer Longitudinalwelle gilt  $M = E$  und für eine Transversalwelle gilt  $M = G$ . Unter Berücksichtigung des Vorfaktors  $n \in \mathbb{N}$ , der angibt, welche Eigenfrequenz vorliegt, gilt:

$$f_{0,n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (6.8)$$

Eine weitere Vergleichsgröße ist die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Resonators. Dieses Modell findet in der Raumakustik und bei Maschinenschwingungen Anwendung und berücksichtigt die räumliche Ausdehnung von Körpern sowie Hohlräumen. Es gilt für einen Körper mit dem Querschnitt  $A$ , einer Länge  $L$  und einem Volumen  $V$  nach [137, 139]:

$$f_0^H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{\rho}} \sqrt{\frac{A}{VL}} \quad (6.9)$$

Die Verläufe der Resonanzfrequenz eines Zylinders mit 20 mm Durchmesser und variierender Höhe werden in Abbildung 6.4 abhängig von der Bauhöhe und im direkten Vergleich von Rechnung und Simulation dargestellt. Ansys gibt nicht aus, ob sich eine Longitudinal- oder Transversalwelle ausbreitet. Deshalb werden beide Varianten herangezogen. Offenbar ähneln sich die Verläufe und liegen in derselben Größenordnung. Der Helmholtz-Resonator stellt den Verlauf gut nach, gibt aber niedrigere Resonanzfrequenzen als die Simulation aus. Am besten passt sich in Abbildung 6.4 a) die Stabresonanz der Longitudinalwelle an, falls mit einem Faktor von 0,5 reskaliert wird. Die Simulation gibt also ungefähr halb so hohe Werte aus wie die Theorie. Weitere Anpassungen der berechneten Daten an die Simulation kommen lediglich der Bestimmung eines geeigneten Vorfaktors gleich, tragen aber nicht zur physikalischen Interpretation bei. In Abbildung 6.4 b) läge eine vollkommene Übereinstimmung von Theorie und Simulation vor, wenn eine Kurve mit der Winkelhalbierenden übereinstimmte. Insbesondere für hohe Resonanzfrequenzen, die aufgrund geringer Massen bei niedrigen Zylinderhöhen auftreten, wächst die Abweichung erheblich an.

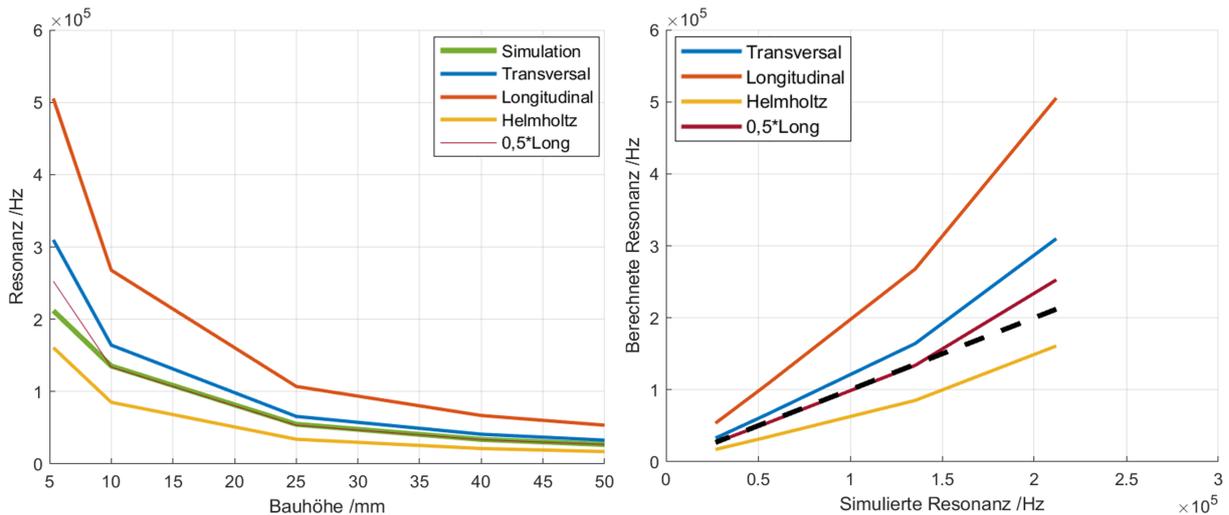


Abbildung 6.4: Validierung der Simulation a) Resonanzfrequenzen der einzelnen Modelle über der Zylinderhöhe und b) Direktvergleich von Simulation und Berechnung

Die Vergleiche der Simulation mit der Stabresonanz bei Longitudinalwellen scheint am ehesten zutreffend, weil Schall in der Regel als Longitudinalwelle auftritt und nur unter geeigneten Kopplungsbedingungen als Transversalwelle in einen Körper eingeleitet werden kann. Damit zeigt dieses Ergebnis aber auch, dass die quantitativen Angaben der Simulation nicht zuverlässig genug sind, um eine Übertragung in die Experimente zuzulassen. Die Simulationen befinden sich aber ohnehin auf einem sehr hohen Abstraktionslevel, da sie nicht die gesamte Prozesskomplexität integrieren können. Folglich hätten die Zahlenwerte nur grobe Schätzwerte dargestellt. Schon die notwendige Abstraktion des Pulverbetts auf ein Kontinuum an Stelle einer partikulären Schüttung stellt die quantitative Aussagekraft in Frage. Dessen mechanischen Eigenschaften leiten sich aus experimentellen Daten in [158] ab. Als Reskalierungsfaktor dient dabei der Quotient aus der Schüttdichte von  $1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  gemäß Pulverhersteller und der theoretischen Bauteildichte von  $2,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Tabelle 6.1 stellt die genutzten Kennwerte der Simulation dar, wobei die Daten für Werkstück und Substrat aus der Ansys-Datenbank stammen. Dabei entsteht ein geringfügiger Unterschied zwischen den Eigenschaften des Pulverbetts und denen des Substrates oder des Bauteils. Das kann jedoch wegen des starken Näherungscharakters und der qualitativen Analyse vernachlässigt werden.

Tabelle 6.1: Mechanische Eigenschaften für das Pulverbett nach Umrechnung mit Daten aus [158] und Bauteil oder Substrat aus Ansys

Eigenschaft	Pulverbett	Bauteil/Substrat
Dichte / $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1,40	2,67
E-Modul /GPa	35,3	76,6
Schubmodul /GPa	13,0	28,8

Als Resultat daraus muss eine qualitative Betrachtung der Simulationsergebnisse nur genügen. Das bietet eine hinreichende Grundlage zur Ableitung verschiedener Effekte und zum Abgleich mit experimentellen Arbeiten. Da in ersten Pulverbeschallungsexperimenten eine Frequenz von 45 kHz zum Einsatz kommt, stellen die akquirierten Bilder auch Verformungsfiguren bei derselben Frequenz dar.

### 6.2.2 Geometrieauswahl der Substrates

Nikon SLM Solutions nutzt in den Maschinen normalerweise quadratische Substrate mit abgerundeten Ecken, siehe Abbildung 6.5. Dadurch, dass der erste Sono-L-PBF-Aufbau auf einem Umbau der Bauraumverkleinerung basiert, eröffnen sich Gestaltungsfreiheiten der Substratgeometrie. Qualitative Ergebnisse der Simulationen helfen dabei, geeignete Schallfeldverteilungen zu identifizieren. Daneben muss das Substrat ausreichend Fläche für die Verteilung von Bauteilen bieten.

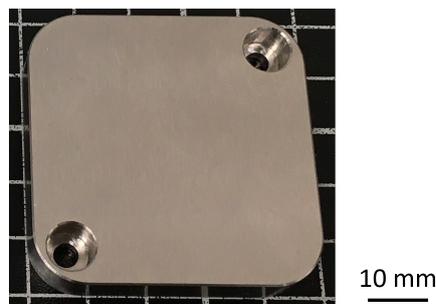


Abbildung 6.5: Substrat des Standard-Aufbaus der Bauraumverkleinerung von Nikon SLM Solutions

Die eckige Geometrie mit zusätzlichen Schraubenlöchern, die auf einer der beiden Diagonalen liegen, könnte je nach Schwingungsmoden zu einem Aufschaukeln der Ecken führen. Dabei unterscheiden sich die beiden Diagonalen voneinander, weil sie unterschiedliche Masseverteilungen und damit unterschiedliche Eigenfrequenzen aufweisen. Einerseits erschwert das die Wanderauslegung bezüglich der Frequenz und andererseits ruft das womöglich unerwünschte Schwingungseffekte hervor. Anschaulich wird schnell klar, dass sich eine runde Substratplatte besser eignet. Gemäß des Huygens'schen Prinzips überlagern sich viele kugelförmige Elementarwellen zu einer Wellenfront. Diese nimmt wiederum selbst eine Kugelform an [142], sofern keine Gegenmaßnahmen getroffen werden. Eine Folge daraus ist eine Verteilung der Schallintensität in konzentrischen Zonen um die Ausbreitungsrichtung in  $z$ , da die kugelförmige Wellenfront von einer planaren Ebene geschnitten wird. Abbildung 6.6 zeigt dazu im zweidimensionalen Schema, wie sich die konzentrischen Zonen ausbilden.

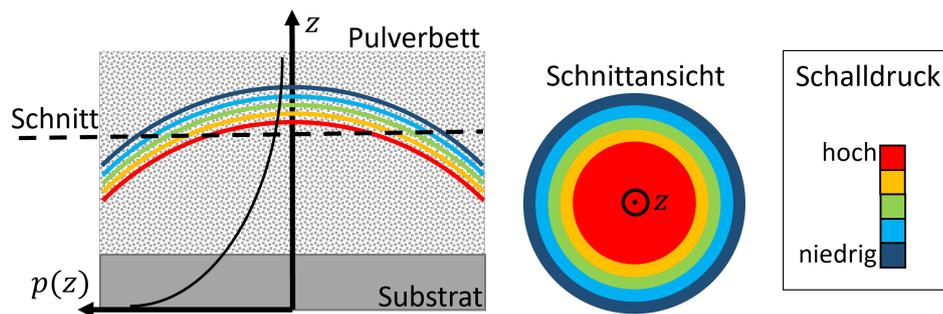


Abbildung 6.6: Ausbildung konzentrischer Schalldruckzonen im Querschnitt des Pulverbetts beim Sono-L-PBF

Diese qualitativen Überlegungen stimmen mit den Ergebnissen der Simulation überein, wie Abbildung 6.7 beweist. Unabhängig von der anregenden Beschleunigung und der zugehörigen Frequenz lässt sich das Phänomen beobachten. Abbildung 6.7 veranschaulicht hierzu die Ergebnisse der Simulationen für ein eckiges und ein rundes Substrat mit Schraubenlöchern und einem aufgesetzten Bulk-Körper, der mit entsprechenden Eigenschaften das Pulverbett repräsentiert.

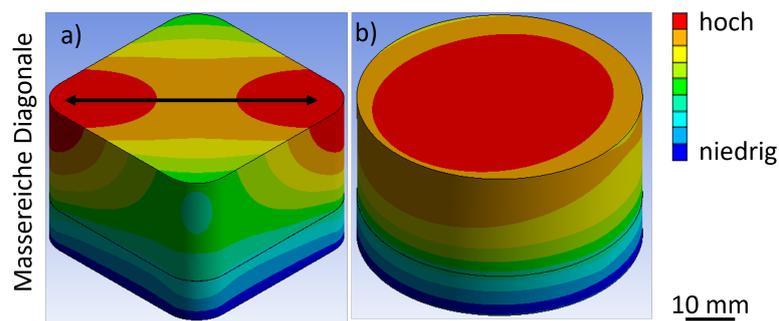


Abbildung 6.7: Qualitative Gesamtauslenkung bei a) quadratischem und b) rundem Substrat; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar

Die Farbskalen der simulierten Auslenkungsverteilungen sind aufgrund von limitierter Skalierbarkeit in Ansys nicht miteinander vergleichbar. Das gilt für alle weiteren Simulationen gleichermaßen. Dennoch untermauern die Simulationen die theoretischen Ideen und plausibilisieren die Wahl eines runden Substrates für eine einheitlichere Schallverteilung. Die Verformungsfigur bei einem eckigen Substrat erstreckt sich entlang der massereichen Diagonalen, also der Diagonalen ohne Schraubenlöcher. Sie trägt durch diese Anisotropie in der Ebene mehr zu Eigenschaftsgradienten innerhalb der späteren Bauteile bei als die Verteilung in konzentrischen Kreisen. Dennoch können Eigenschaftsgradienten auftreten. Inwieweit sich Dichte- und Verdichtungsgradienten im Pulverbett bilden, geben die Pulverbeschallungsexperimente aus Kapitel 8 Aufschluss.

### 6.2.3 Ergebnisse aus der Simulation des Pulverbetts

Als zentrale Größe dient die mechanische Verschiebung  $u$  des Pulverbett-Festkörpers, die lokal die Verdichtung repräsentiert. Dort, wo sich der Körper stark in Bauichtung  $z$  verformt, reagiert ein reales, partikuläres Pulverbett mit einer starken Verdichtung.

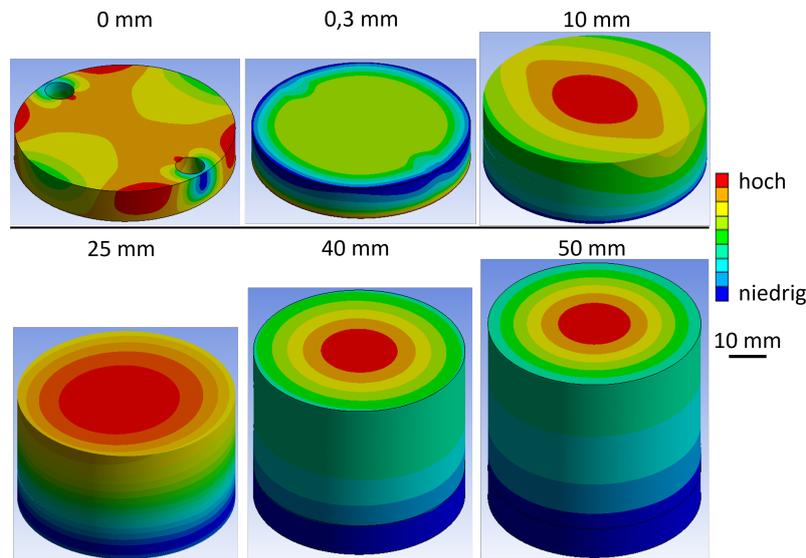


Abbildung 6.8: Qualitative Auslenkung des Pulverbetts in  $z$ -Richtung in Abhängigkeit von der Bauhöhe; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar

Wie Abbildung 6.8 zeigt, wächst die Verschiebung mit der Bauhöhe an. Das liegt daran, dass die Verdichtung von vorangegangenen Pulverschichten nicht berücksichtigt wird. Folglich entsteht eine kaskadenartige Kompaktierung im Realfall, die sich in der Simulation als starke Verschiebung ausdrückt. Trotzdem zeigt sich, dass sich die Schallwirkung mit zunehmender Bauhöhe homogenisiert. Damit einher geht selbstverständlich auch Schallschwächung. Am Beginn eines Baujobs haben die Schraubenlöcher einen erheblichen Einfluss. Da diese aber ohnehin nicht bebaut werden können und auch die nächste Umgebung frei von Bauteilen bleiben muss, um das Substrat wieder der Maschine entnehmen zu können, schlagen sich diese Effekte wohl kaum auf das Bauteil nieder. Dennoch tritt wahrscheinlich eine stärkere Positionabhängigkeit der Bauteileigenschaften beim Sono-L-PBF als beim Standard-L-PBF. Auch wenn die Zahlenwerte der berechneten Schallleistungspegel ebenso wenig belastbar sind wie die Lage der Resonanzfrequenzen besteht doch die Möglichkeit, die Notwendigkeit von Arbeitssicherheitsmaßnahmen abzuschätzen. Insbesondere in den Resonanzfällen ergeben sich große Pegelspitzen. Zum wiederholten Male disqualifizieren sich somit die Resonanzfrequenzen für die Nutzung im Sono-L-PBF. Messungen am Arbeitsplatz werden zeigen müssen, ob ein Verzicht auf Resonanzen ausreicht, um Sicherheit für das Personal zu gewährleisten.

### 6.2.4 Ergebnisse aus der Simulation des Bauteils

In der Simulationsstudie eines zylindrischen Bauteils stellt sich ein klarer Einfluss der Stützstrukturen auf die Schallverteilung in den ersten Schichten des Bauteils heraus, siehe Abbildung 6.9 bei 5,3 mm. Dieser Einfluss scheint, sich mit steigender Bauhöhe wieder zu verlieren und vermutlich auch abzuschwächen. Das verdeutlicht jedoch, dass die Geometrie von Stützstrukturen auch eine wichtige Rolle übernimmt.

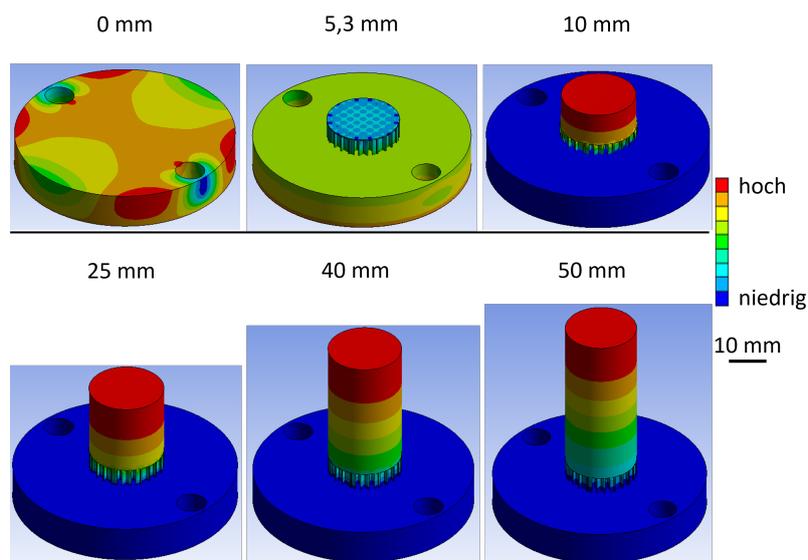


Abbildung 6.9: Qualitative Verschiebung eines Zylinders in z-Richtung in Abhängigkeit von der Bauhöhe; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar

Der Einfluss der Stützgeometrie lässt sich erneut mit dem Huygens'schen Prinzip erklären. Schall kann sich wegen der Vielzahl an Grenzflächen und Reibungsverlusten durch das Pulverbett schwerer ausbreiten als durch den Festkörper, sodass Stützstrukturen einen bedeutend größeren Anteil an der Schalleitung übernehmen. Hat eine Schallwelle einen Steg einer Stützstruktur durchquert, beginnen sich insbesondere an den Ecken des Übergangs zum Bauteil wieder Elementarwellen zu bilden, die sich kugelförmig ausbreiten. Wegen des endlichen Abstandes zweier solcher Entstehungsorte von Kugelwellen bildet sich erst in einer größeren z-Höhe eine einheitliche Wellenfront aus. Zusätzlich erfährt der Schall durch die Stützstrukturen eine Richtung parallel z, sodass Bereiche der ersten Schichten, die nicht genau über einem Teil der Stützstruktur sitzen, sich in einer Art Schatten befinden. Auch hier müssen praktische Experimente diese Vermutung überprüfen.

## 6.3 Fazit aus den theoretischen Vorüberlegungen und Simulationen

Aus den bisherigen mathematischen Betrachtungen, Simulationen und Gedankenexperimenten geht hervor, dass Schall durch seine Energie und seine mechanische Schwingung im L-PBF-Prozess vielfältige Effekte entfalten kann. Es besteht sogar die Möglichkeit, die Prozesstechnik bezüglich der resultierenden Bauteilqualität zu verbessern und die aktuellen Hauptdefizite wie mechanische Anisotropie und Porosität zu verringern. Wegen der ständig zunehmenden Masse des schwingenden Systems im Prozess verschieben sich immer wieder Resonanzfrequenzen, die die Qualitätsfähigkeit des Sono-L-PBF aller Voraussicht nach disqualifizieren. Es gilt also in einem Baujob mit sich ständig ändernder Pulvermasse, Resonanzfälle zu vermeiden. Das Substrat sollte auf jeden Fall einen runden Querschnitt aufweisen, damit sich der Schall möglichst homogen ausbreiten kann. Es gilt maschinenspezifisch zu überprüfen, welche Bauflächen noch realisierbar sind. Prototypisch beschränkt sich diese Arbeit auf kleine Flächen, denn für große Beschallungsflächen könnten bereits Aufbauten mit mehreren Schallwandlern in einem matrixförmigen Aufbau ähnlich eines Phased Array der Ultraschallprüfung nötig sein. Damit nicht nur die Bauteilqualität und die Materialeffizienz durch Einsparungen bei Stützstrukturen steigt, sondern auch Beschäftigte sicher an den Maschinen arbeiten können, bedarf die Umrüstung einer L-PBF-Maschine auf Sono-L-PBF einer arbeitssicherheitstechnischen Analyse, in der Schallemissionen gemessen und Schutzmaßnahmen gemäß des STOP-Prinzips in einer Gefährungsbeurteilung festgehalten werden.

# 7 Experimentelle Analyse von Prozesselementen des L-PBF

Die Prozesselemente dienen nach den theoretischen Vorüberlegungen der Annäherung der Theorie an die Praxis. Ein reales Pulver weicht mit seinen statistisch verteilten Eigenschaften sicherlich von den idealisierten Annahmen ab. Angaben des Hausner-Verhältnisses aus der Literatur geben nicht ausreichend Aufschluss über die Verdichtbarkeit, da in der normgetreuen Messung kein Schall die Verdichtung hervorruft sondern ein Klopfen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Einfluss der Substratheizung. Im Aufbau der Bauraumverkleinerung ist die Heizung nicht nutzbar. Der Standardaufbau eignet sich jedoch nicht für die Umrüstung, da sehr große Eingriffe in die Maschine nötig wären. Es stellt sich also die Frage, ob Sono-L-PBF die Nachteile einer abwesenden Substratheizung ausgleicht oder ob sich tatsächliche Vorteile ergeben. Trotzdem heizt sich das Substrat in der Konsequenz zahlreicher Laserüberfahrten auf. Diesen Temperaturanstieg muss ein Schallwandler schadensfrei überstehen.

## 7.1 Pulvercharakterisierung

### 7.1.1 Morphologie

Der erste mikroskopische Eindruck einer Pulverschüttung erscheint homogen mit sphärischen Partikeln. Gelegentlich haften Satelliten, also Unterkorn, an Partikeln. Über diese qualitativen Beobachtungen hinaus kann die softwaregestützte Auswertung von digitalmikroskopischen Bildern quantifizierte Angaben über die Sphärizität liefern. Die Sphärizität gibt an, wie stark eine Form einer räumlichen Kugel oder einem flächigen Kreis entspricht. Größen zu deren Quantifizierung können vielfältig berechnet werden. Hier kommt das Aspektverhältnis aus Minimal- zu Maximaldurchmesser jedes Partikels

$a_p = \frac{d_{min}}{d_{max}}$  zum Tragen.

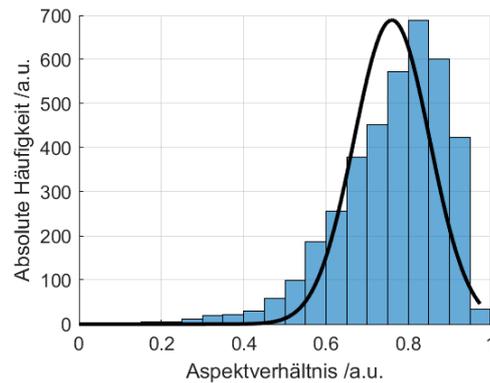


Abbildung 7.1: Häufigkeitsverteilung des Aspektverhältnisses für eine Stichprobe von 3844 Partikeln aus Charge 2021000766 mit Realdaten im Histogramm und einer Normalverteilung auf Grundlage der Rohdaten

Wie die meisten anderen Pulvercharakteristika auch unterliegt das Aspektverhältnis offenbar einer statistischen Verteilung, wie Abbildung 7.1 beweist. Mit den Zahlenwerten aus Mittelwert und Standardabweichung lässt sich zusätzlich eine ideale Gauß-Funktion der Normalverteilung plotten, um auftretende Unterschiede zu verdeutlichen. Anhand der Streubreite wird klar, wie stark Partikel von der mittleren Form abweichen, und anhand des Mittelwertes, wie stark die mittlere Form von der ideal sphärischen abweicht. Das zeigt einerseits, dass die Partikel tendenziell sphärisch sind, und andererseits, dass der Pulverherstellungsprozess keine zufällig um einen Mittelwert verteilte Sphärizität hervorbringt. Weil die Aspektverhältnisse unterhalb von eins liegen, gibt es keine ideale Sphärizität sondern eher leicht verzerrte Formen. Die geben jedoch nur einen ersten Hinweis auf die tatsächliche Morphologieverteilung, denn die Stichprobengröße von 3844 Partikeln ist sehr klein gegenüber einer vollständigen Füllung des verkleinerten Bauraumes mit ca.  $2,2 \cdot 10^{10}$  Partikeln. Auf diese Art könnte auch eine Partikelgrößenverteilung angenähert werden, aber diese Messung findet mit einer deutlich größeren Pulverstichprobe in zuverlässigeren Messgeräten statt.

### 7.1.2 Partikelgrößenverteilung

Laut Hersteller bewegt sich die Partikelgröße in einem Intervall zwischen  $20 \mu\text{m}$  und  $63 \mu\text{m}$  [67]. In der Realität treten möglicherweise chargengbedingte Schwankungen auf und die Verteilung erstreckt sich über weitere Bereiche als angegeben. Überkorn mit einem Partikeldurchmesser  $>75 \mu\text{m}$  mag im Anlieferungszustand oder nach Agglomeration im L-PBF-Prozess vorliegen, wird aber im Rahmen der routinemäßigen Siebung entfernt. Abbildung 7.2 stellt die kumulierte Häufigkeit der Partikelgrößenverteilung dar, da sich in diesem Plot die Unterschiede zwischen Chargen sowie zwischen frischem Pulver und Schmauch, einem als Prozessabfall angesehenen Pulverstoff, am deutlichsten offenbaren. Die beiden Frischpulverchargen unterscheiden sich unwe-

sentlich voneinander. Charge 2021000766 scheint sich geringfügig gröber zu verteilen als Charge 2019000400, es liegen aber auch weniger Datenpunkte der Verteilung vor, was exakte Aussagen erschwert. Deutlich gröbere Partikel weist im Vergleich dazu der Schmauch auf, der in der Regel nach einem Baujob gesammelt und direkt entsorgt wird.

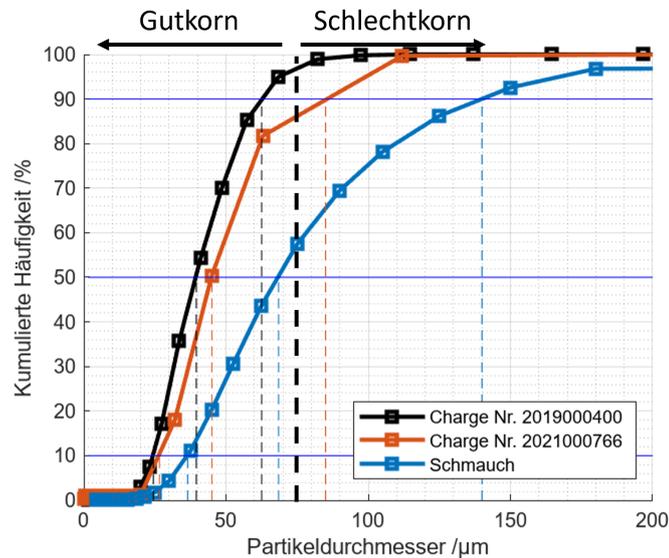


Abbildung 7.2: Partikeldurchmesserverteilung für zwei Chargen Frischpulver AlSi10Mg und eine Probe Schmauch

In den jeweiligen Polygonzügen markiert, stehen die charakteristischen Durchmesser  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{90}$ . Ausgehend vom jeweiligen Quantil auf der Ordinate trifft das Lot vom Schnittpunkt einer Horizontalen mit der Kurve auf die Abszisse den zugehörigen Partikeldurchmesser. Tabelle 7.1 fasst die ermittelten Daten zusammen.

Tabelle 7.1: Charakteristische Quantildurchmesser für AlSi10Mg-Frischpulver und Schmauch

	Charge 2019000400 (schwarze Kurve)	Charge 2021000766 (orange Kurve)	Schmauch (blaue Kurve)
$d_{10}$ / $\mu\text{m}$	26,28	28,20	36,33
$d_{50}$ / $\mu\text{m}$	43,29	44,83	68,24
$d_{90}$ / $\mu\text{m}$	68,59	72,48	139,90

Es ist unklar, welche Quantile der Pulverhersteller als Grenzwerte der Verteilung heranzieht. Offenbar liegen die gemessenen  $d_{10}$  und  $d_{90}$  in ähnlichen Bereichen wie die Herstellerangabe, aber das Intervall muss laut dieser Messungen weiter gefasst werden. Üblicherweise trägt der Beschichter im L-PBF-Prozess Pulverlagendicken  $< 60 \mu\text{m}$  auf, im Falle von AlSi10Mg tritt eine vergleichsweise hohe Bauteilqualität für  $h = 30 \mu\text{m}$  ein. Bei beiden Frischpulverchargen liegen sowohl  $d_{50}$  als auch  $d_{90}$  darüber. Trotzdem

lassen sich dünnere Schichten auftragen, da zum einen die Partikel nicht exakt sphärisch sind und sich zum anderen in einer Pulverschicht zwischen den Partikeln Zwickel bilden, in der sich ein neu aufgetragenes Partikel anlagern kann. Um bedeutend geringere Schichtdicken zu erreichen, müsste das Pulver feiner aufgemahlen werden. Der identische Herstellungsprozess und die geringen Abweichungen zwischen den beiden Frischpulverchargen trotz verschiedener Messmethoden lässt die Vermutung zu, dass chargenbedingte Unterschiede zu vernachlässigen sind.

### 7.1.3 Fließfähigkeit

Je höher der Massefluss aus dem Hall-Trichter nach DIN EN ISO 4490 ausfällt, desto eher gilt das Pulver als fließfähig. Das vorliegende AlSi10Mg-Pulver verhält sich eher kohäsiv, neigt also dazu, zu stocken und nur unter externer Anregung aus dem Trichter zu fließen. Aus diesem Grund hat es mehrere Versuche gebraucht, um die Fließeigenschaften quantitativ zu bestimmen. Es liegen offenbar geringfügige Chargenunterschiede vor, wie die Masseflüsse in Tabelle 7.2 belegen. Trotzdem können einerseits diese Schwankungen vernachlässigt und andererseits beide betrachtete Pulverchargen als eher kohäsiv angesehen werden. Häufig gilt die Feuchtigkeit als Hemmnis der Fließfähigkeit [74], aber in diesem Fall zeigt das trockenere Pulver die schlechteren Eigenschaften. Wahrscheinlich bildet sich in Intervallen relativer Feuchtigkeit eine ähnliche Menge an Feuchtigkeitsbrücken zwischen Partikeln aus, sodass der Feuchteunterschied nicht gravierend genug ausfällt, um die Fließfähigkeit bedeutend zu beeinflussen. Zum evidenten Unterschied führen wahrscheinlich Streuungen in anderen Pulvereigenschaften wie Schüttwinkel, Partikelform und Partikelgrößenverteilung, die sich zusätzlich noch gegenseitig beeinflussen. Der Schüttwinkel beträgt für AlSi10Mg-Pulver ca.  $34^\circ$  [81] und gibt an, inwieweit eine Pulverschüttung in die Breite fließen kann und somit auch inwieweit sich Pulverpartikel gegen das Fließen untereinander verhaken können.

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Fließfähigkeitsmessungen für verschiedene Pulverchargen

Charge	Relative Feuchte /%	Mittlere Masse /g	Mittlere Fließzeit /s	Massefluss / $\frac{g}{s}$
2019000400	11,03	50,16 $\pm$ 0,04	70,96 $\pm$ 1,44	0,71 $\pm$ 0,01
2021000766	8,87	50,01 $\pm$ 0,00	82,97 $\pm$ 1,05	0,60 $\pm$ 0,01

Selbst wenn die Fließfähigkeit recht schlecht erscheint, trifft die Prüfkinematik nicht auf die Randbedingungen der Beschichtung im L-PBF-Prozess zu. Der normgetreue Versuch gibt einen ersten Hinweis auf das Prozessverhalten, aber es erfordert dennoch

Beschichtungsversuche, insbesondere im noch unerprobten Sono-L-PBF-Aufbau. Darüber hinaus verspricht eine schlechte Fließfähigkeit eine für Sono-L-PBF vorteilhaft hohe Verdichtbarkeit, da nach [69, 74] die Fließfähigkeit direkt mit dem Hausner-Verhältnis korreliert.

#### 7.1.4 Schüttdichte

Die normgetreue Messung gemäß ISO 3923 liefert mittlere Nettomassen des Pulvers, bereinigt um die aus drei Wägungen gemittelte Masse des Behälters mit einem Volumen von  $25,03 \text{ cm}^3$ . Tabelle 7.3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Schüttdichtemessungen für verschiedene Frischpulverchargen

Charge	Relative Feuchte /%	Mittlere Masse /g	Schüttdichte / $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
2019000400	11,03	$33,62 \pm 0,17$	$1,34 \pm 0,01$
2021000766	8,87	$32,24 \pm 0,16$	$1,29 \pm 0,01$

Die Literatur nennt Schüttdichten von  $1,46 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  [169] und  $1,43 \pm 0,07 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  [73] für AlSi10Mg-Pulver ähnlicher Körnung wie in dieser Arbeit. Es liegen also die Messwerte in derselben Größenordnung wie Literaturdaten leicht abweichender Pulver. Auch hier können die chargenbedingten Unterschiede vernachlässigt werden. Im Folgenden besteht deshalb die Annahme, dass die Pulvereigenschaften zwar statistisch verteilt aber nicht chargenabhängig vorliegen.

#### 7.1.5 Pulverdämpfung

Die Eigenschaften des AlSi10Mg-Pulvers zur Dämpfung von Schwingungen und zur Dissipation der Schwingungsenergie korrelieren direkt mit den beobachteten Bewegungsmoden sowie dem Verdichtungsverhalten und lassen Rückschlüsse auf die benötigte Schalleistung im Sono-L-PBF-Prozess zu. Als wichtige mechanische Größen dienen die Anregungskraft und -beschleunigung des Messaufbaus, von denen je eine Größe geregelt und die andere gemessen wird. Der Tangens des Phasenwinkels zwischen beiden Größen beschreibt die dissipierte Energie. Da jedoch bei den Messungen eher kleine Phasenwinkel auftreten und der Tangens für kleine Winkel wenig sensitiv ist, erlaubt die Betrachtung des Phasenwinkels selbst eine passendere Analyse.

Bei verschiedenen Frequenzen zeigt ein Sweep über der Anregungsbeschleunigung des Systems nach einer Inkubationsphase einen scharf ansteigenden Peak mit unter-

schiedlichem Abklingverhalten, wie in Abbildung 7.3 a) dargestellt. In den Peaklagen stehen vergleichsweise hohe Phasenwinkel für hohe Energiedissipation und erwecken den Eindruck, ein Maß für die Verdichtung darzustellen. Bei konstanter Beschleunigung ergeben sich für den Phasenwinkel über der Zeit ähnliche Kurven mit Peaks und unterschiedlichen Abklingverhalten. Es scheint also frequenzabhängig eine gewisse Zeitspanne zu dauern, bis eine Verdichtung des Pulvers gekennzeichnet durch hohe Phasenwinkel eintritt. Das spielt insbesondere zum Beginn eines Sono-L-PBF-Baujobs eine Rolle, um eine initiale Verdichtung zu gewährleisten. Im weiteren Verlauf wirkt permanent Schall auf eine neu aufgetragene Pulverschicht durch bereits verdichtete ein und führt dadurch wohl schneller zur Verdichtung. Je nach Frequenz sollte der Schall also ca. zwei Minuten vor Baujobstart, z.B. beim Einregeln des Prozessdruckes wirken, um die Initialverdichtung herzustellen.

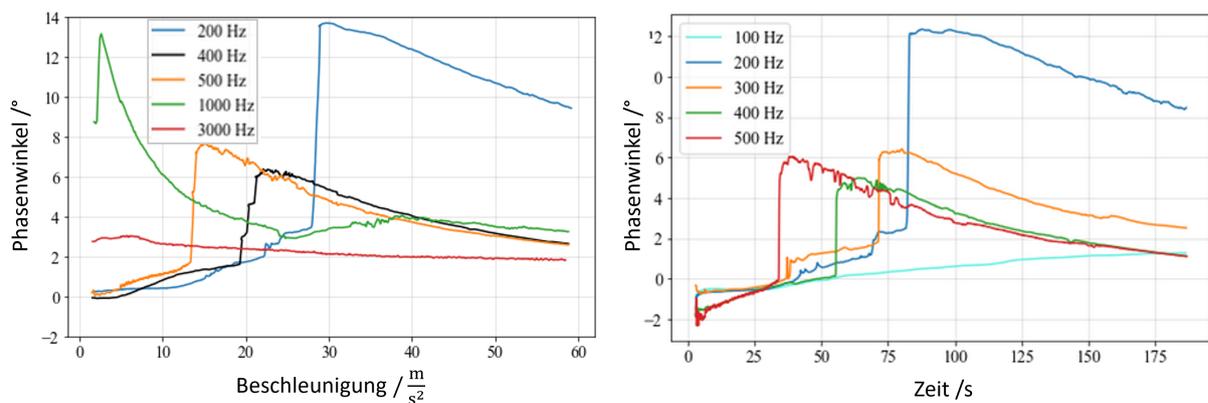


Abbildung 7.3: a) Frequenzabhängiger Phasenwinkel über der Anregungsbeschleunigung und b) zeitaufgelöstes Antwortverhalten für AISi10Mg-Pulver

Engermaschige Sweeps über Anregungsbeschleunigung und Frequenz erlauben die Kartierung des Phasenwinkels in Abbildung 7.4 und helfen bei der Identifikation sinnvoller Beschallungsbereiche. Im Bereich bis 1000 Hz hat die Schrittweite 100 Hz und ab 1000 Hz hat die Schrittweite 500 Hz betragen. Dazwischen vervollständigen lineare Interpolationen das Bild. Die Beschleunigung kann kontinuierlich variiert werden.

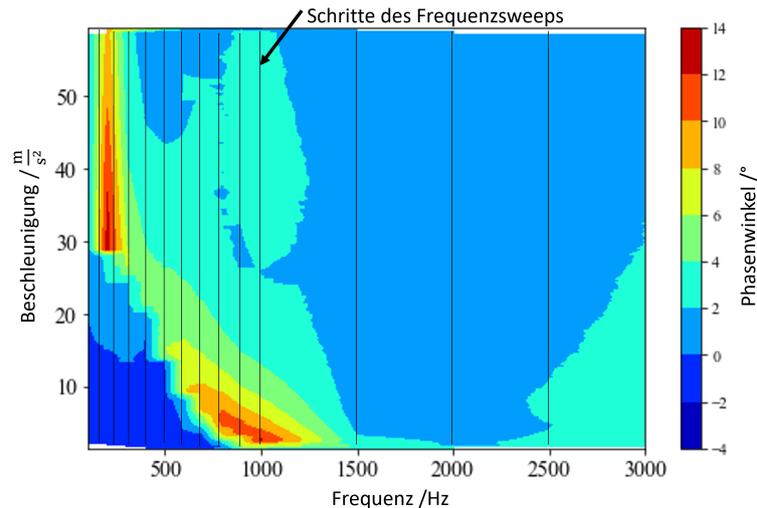


Abbildung 7.4: Kartierung des Phasenwinkels über anregender Beschleunigung und Frequenz, Bereiche zwischen den Messzuständen der Frequenz entstehen durch lineare Interpolation

Anhand der beiden Hotspots in Abbildung 7.4 stechen also die beiden Frequenzen 200 Hz und 1000 Hz besonders hervor. Diese beiden Frequenzen versprechen das höchste Potential, die gewünschten Effekte im Sono-L-PBF hervorzurufen. Nach einer Dämpfungsmessung zeigt das Pulver jedoch verschiedene Mobilitäten. Bei 200 Hz scheint die Fließfähigkeit kaum verändert, während bei 1000 Hz die Pulverprobe deutlich immobilisiert ist. Eine normgetreue Messung der Fließfähigkeit kommt aber durch den geschlossenen Pulverbehälter bei der Pulverdämpfungsmessung nicht in Betracht. Stattdessen sollen mehrfache Durchläufe desselben Beschleunigungssweeps klären, wie sich das Verhalten des Pulvers von Durchlauf zu Durchlauf ändert. Bereits drei Wiederholungen zeigen deutliche Unterschiede, wie Abbildung 7.5 bestätigt. Durch die Ähnlichkeit der Kurven des Phasenwinkels bei 200 Hz Anregungsfrequenz, siehe Abbildung 7.5 a), zeigt sich die qualitative Beobachtung bestätigt. Es gibt hier folglich keine nennenswerte Verdichtung des Pulvers. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Kurven bei 1000 Hz Anregungsfrequenz, siehe Abbildung 7.5 b), nach zwei bis drei Durchläufen deutlich von der des ersten Durchlaufs, was auf eine Verdichtung schließen lässt. Der Umstand, dass die Peaks erst bei höheren Beschleunigungen auftreten und trotzdem niedriger ausfallen, bestätigt die Vermutung. Rückgespiegelt auf Abbildung 7.3 liegt nahe, dass vor allem scharfe Peaks mit schnellem Abklingverhalten im Beschleunigungssweep pulververdichtende Eigenschaften haben.

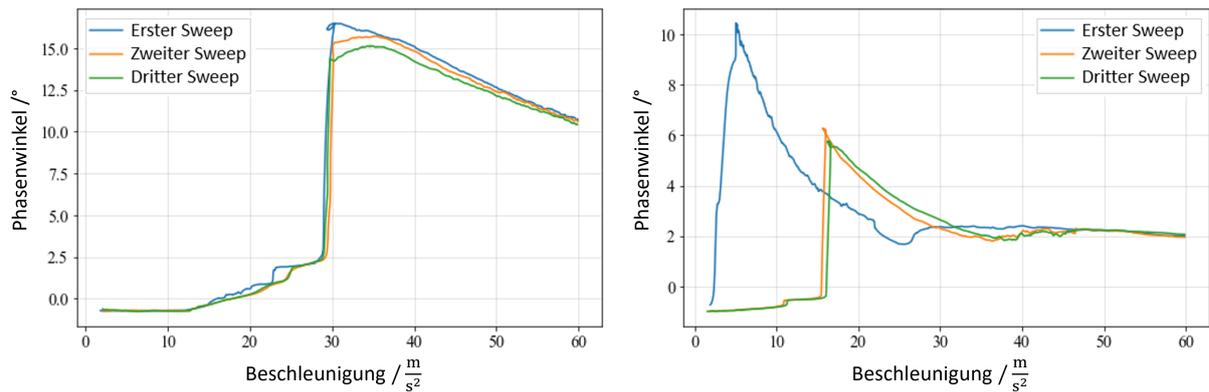


Abbildung 7.5: Mehrfachdurchläufe von Beschleunigungssweeps an AlSi10Mg-Pulver bei a) 200 Hz und b) 1000 Hz

## 7.2 Einfluss der Substratplattenheizung

In welchem Umfang sich die Bauteilqualität verändert, wenn das Substrat nicht geheizt wird, entscheidet über die Erfolgsaussichten von Sono-L-PBF, da nach der Maschinenumrüstung in dieser Arbeit keine Substratheizung mehr möglich ist. Der Standardwert bei der Verarbeitung von AlSi10Mg liegt bei 150 °C. Mit Hilfe eines flächenzentrierten Central Composite Design Plans aus der statistischen Versuchsplanung, der im Versuchsraum aus Laserleistung  $P$ , Scangeschwindigkeit  $v$  und Spurabstand  $d$  einen Würfel beschreibt und die Würfecken, die Flächenmitten und die Raummitte abdeckt, gilt es, im direkten Vergleich mit und ohne Substratheizung Unterschiede aufzudecken. Für eine bessere statistische Signifikanz werden drei Proben des Parametersatzes der Raummitte hergestellt, sodass der Versuchsplan insgesamt 17 Proben beinhaltet. In Summe bilden 68 Proben die Grundlage zur Ermittlung des Einflusses der Substratheizung, je ein Satz mit (MSH) und ohne (OSH) Heizung und je ein Satz zur Messung von Dichte und Rauheit sowie zur geometrischen Messung. Tabelle 7.4 ordnet die Parametersätze ihren Faktorstufen zu. Zur Erfassung der Rauheitsentwicklung in Abhängigkeit von der Flächenneigung dienen Fächerproben des Parametersatzes 8 mit und ohne Substratheizung. Die Probengeometrien entsprechen denen aus Abbildung 5.6.

Tabelle 7.4: Parametersätze der Experimente zum Einfluss der Substratheizung bei konstanter Pulverlagendicke von  $h = 30 \mu\text{m}$ 

Parameter- satz	Laser- leistung /W	Scan- geschwindigkeit / $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Spur- abstand /mm
1	300	1325	0,10
2	250	1000	0,06
3	350	1000	0,06
4	250	1650	0,06
5	350	1650	0,13
6	250	1000	0,13
7	350	1000	0,13
8	250	1650	0,13
9	350	1650	0,13
10	250	1325	0,10
11	350	1325	0,10
12	300	1000	0,10
13	300	1650	0,10
14	300	1325	0,06
15	300	1325	0,13

Resultierende Parametersätze bringen unterschiedliche Eigenschaften hervor, die sich auf den ersten Blick erkennen lassen. Insbesondere auf Upskin- und Downskin-Flächen fallen verschieden starke Partikelanhaftungen auf. Trotz des Einsatzes von Upskin-Remelting zeigen sich auf den Upskin-Flächen je nach Parametersatz die laserbedingten Scanmuster in verschiedenen Ausprägungen. Diese Effekte treten bei beiderlei Bauteilen auf, mit und ohne Heizung. Die Partikelanhaftung gibt an geneigten Seitenflächen wahrscheinlich den Ausschlag für die Entwicklung von Downskin-Rauheit, die mit steigendem Winkel zur z-Richtung stark anwächst. Auch bei Upskin-Flächen wächst die Rauheit mit steigendem Winkel zur z-Richtung leicht. Hierfür ist der Treppenstufeneffekt verantwortlich. In Abbildung 7.6 stehen die Kernrauheitswerte  $R_k$  und  $R_{pk}$  für die beiden Heizmodi gegenüber. Nur im Downskin-Bereich gibt es deutliche Unterschiede. OSH liefert rauere Oberflächen als MSH. Der Stand der Forschung bietet hierfür noch keine Erklärung. Möglicherweise bildet sich im Bereich, wo der Laser Pulverpartikel zwar anschmilzt aber nicht vollständig aufschmilzt durch die schnelle Abkühlung des Festkörpers, den sie benetzen, schnell eine Art Schreckschale. Dieses Phänomen tritt ausschließlich an Stellen auf, an denen sich Pulverpartikel befinden, erhöht so die Rauheit und fällt bei beheiztem Substrat wegen geringerer Temperatur-

gradienten weniger ins Gewicht.

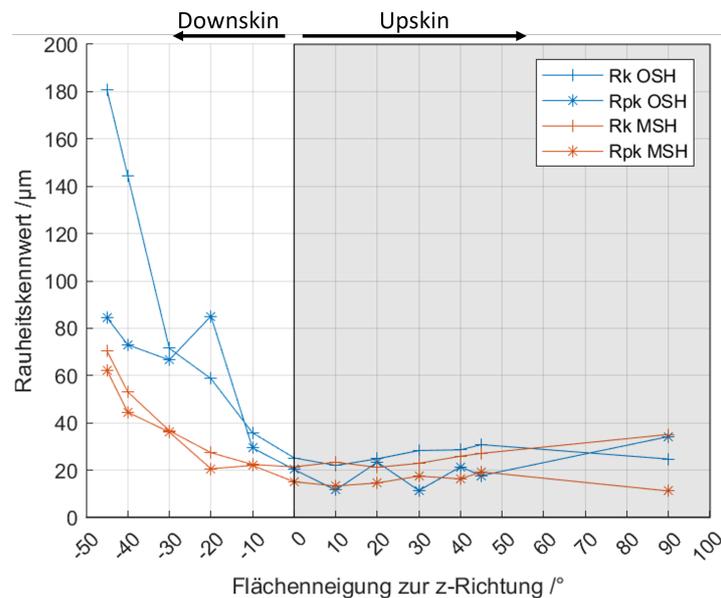


Abbildung 7.6: Kernrauheitsentwicklung an Upskin- und Downskin-Flächen von Fächerproben aus AISi10Mg bei geheiztem (MSH, orange) und ungeheiztem (OSH, blau) Substrat

Tabelle 7.5 gibt die Ergebnisse an, auf denen die Auswertung des Faktoreffektes Substratheizung fußen. Neben der relativen Dichte  $\rho_r$  werden aufgrund der Vielzahl an gemessenen Kenngrößen repräsentativ für die Rauheit die Längsmessung auf dem Upskin  $R_z$  und für die Geometrie die Abweichung von Kreisdurchmesser  $\Delta d_r$  und Kantenmaß lateral  $\Delta d_{xy}$ , also in der Beschichtungsebene, ausgewählt. Aus der klassischen DoE-Auswertung können Effektdiagramme am besten die Unterschiede der Modi OSH und MSH abbilden. In den Diagrammen in Abbildung 7.7 stehen die Gesamtmittelwerte aller Parametersätze aus den Tabellen 7.4 und 7.5. Es folgt aus Tabelle 7.5 und Abbildung 7.7, dass der Wegfall der Substratheizung zum Teil die Eigenschaften sogar verbessert. Die relative Dichte liegt für OSH höher als bei MSH, im Mittel gesehen steigt dagegen die Rauheit und die Geometriekenngrößen geben ein eher geteiltes Bild ab. Es gibt jedoch mit 1, 9, 11 und 14 vier Parametersätze, die im Modus OSH in allen Eigenschaften bessere Ergebnisse liefern als das Pendant von MSH. Ein Hauptargument für die Substratheizung liegt in der Reduktion von thermisch bedingten (Zug-)Eigenspannungen [170, 171]. Wie die bisherige Erfahrung mit AISi10Mg zeigt, neigt der Werkstoff deutlich weniger zur Eigenspannungsbildung als der Edelstahl X2CrNiMo17-12-2. Weitere gängige L-PBF-Werkstoffe wie IN718 und Ti6Al4V neigen nochmal mehr dazu als X2CrNiMo17-12-2 [172], sodass für Sono-L-PBF von diesen Legierungen die Eigenspannungen betrachtet werden müssten.

Tabelle 7.5: Ergebnisse der Experimente zum Einfluss der Substratheizung bei konstanter Pulverlagendicke von  $h = 30 \mu\text{m}$ , Daten für OSH und MSH

Parameter- satz	$\rho_r$ /%	$R_z$ / $\mu\text{m}$	$\Delta d_r$ /mm	$\Delta d_{xy}$ /mm
1	99,7	21,1	-0,028	-0,008
	99,7	22,1	-0,032	-0,038
2	98,8	66,4	-0,0101	-0,0031
	98,5	54,2	-0,0191	-0,0255
3	96,4	59,8	0,0091	-0,0887
	96,3	15,8	0,0258	-0,1340
4	100	31,4	-0,0882	0,0422
	99,7	50,1	-0,0595	0,0104
5	99,7	22	-0,0153	-0,0205
	99,5	22,8	-0,0030	-0,0561
6	98,9	63,4	-0,0438	0,0055
	98,7	35,1	-0,0059	-0,0405
7	96,5	19,4	0,0536	-0,0847
	96,4	17,9	0,0617	-0,1227
8	99,8	39,6	-0,0872	-0,0186
	99,7	37,3	-0,0782	0,0028
9	99,8	30,1	-0,0115	-0,0202
	99,6	34	-0,0218	-0,0454
10	99,9	42,5	-0,057	0,0187
	99,7	36,7	-0,0788	-0,0196
11	99,3	26,1	0,0034	-0,0225
	99,4	37,5	0,0171	-0,0722
12	97,0	18,0	0,0023	-0,0582
	96,7	14,9	0,0239	-0,0822
13	100	22	-0,0716	0,0143
	99,8	22,7	-0,0511	-0,0129
14	99,6	33	-0,0077	-0,0134
	99,4	34,4	0,0028	-0,0362
15	99,8	22,7	-0,0279	-0,0144
	99,6	33,1	-0,0039	-0,0415

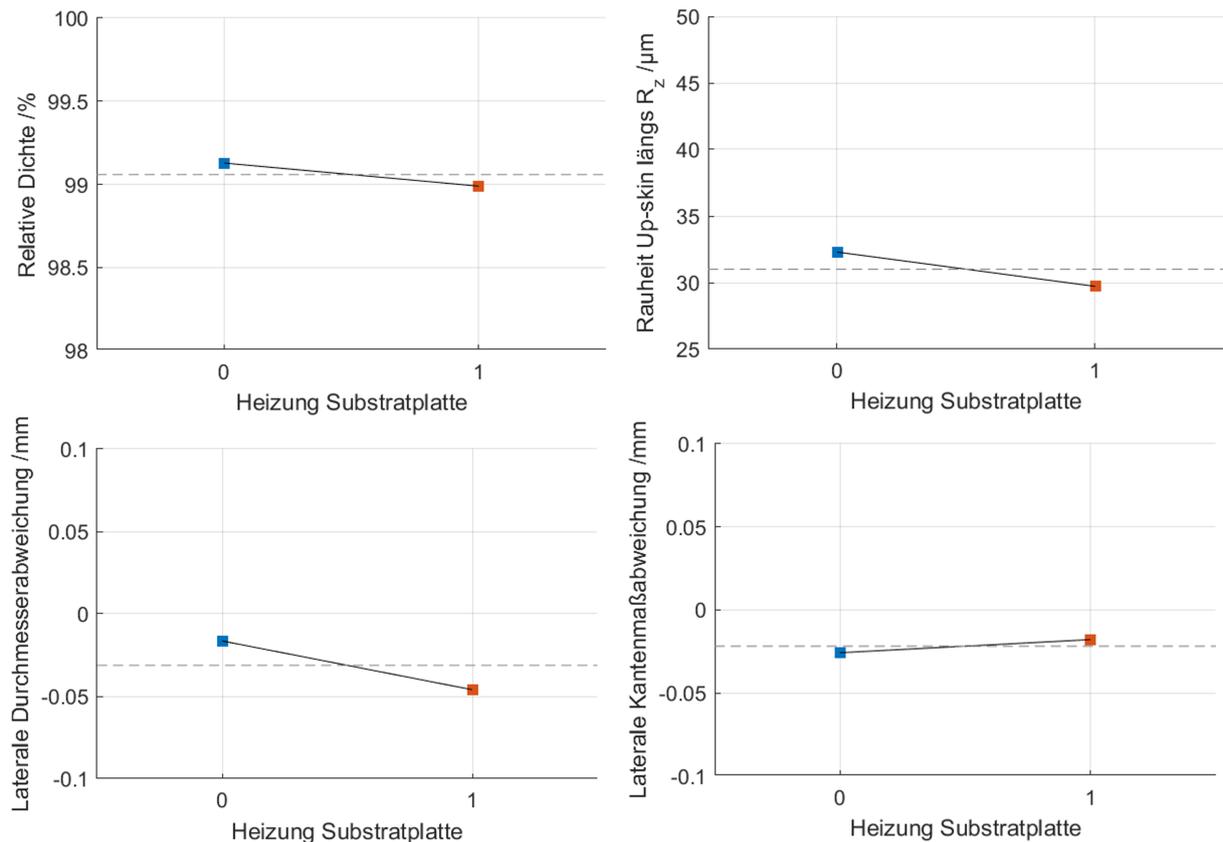


Abbildung 7.7: Faktoreffektdiagramme für den Einfluss der Substratheizung auf die relative Dichte und Repräsentanten von Rauheit und Maßabweichung

### 7.3 Zusammenfassende Betrachtung der Prozesselemente

Statistisch verteilte Pulvereigenschaften liegen mit schwach ausgeprägten und daher im Folgenden vernachlässigten Chargenunterschieden vor. Das genutzte Pulver entspricht dem aktuellen Industriestandard, sodass die Einflüsse des Schalls in Abhängigkeit gängiger Charakteristika repräsentativ für eine praktische Anwendung sind. Insbesondere dürften die Dämpfungseigenschaften einer Pulverschüttung gemeinsam mit der Verdichtbarkeit, die ihrerseits von vielfältigen Faktoren wie Partikelmorphologie und -größenverteilung abhängt, die Prozessierbarkeit im Sono-L-PBF bestimmen. Deshalb bildet sich ein neuer Satz an notwendigen Messmethoden, um die sinnvollen Beschallungsmodi für neue Werkstoffe zu identifizieren. Als minimales Charakterisierungsprogramm eines Pulvers, das nur geringfügig über die routinemäßige Qualitätskontrolle hinausgeht, wird für Sono-L-PBF folgende Reihe empfohlen:

1. *Kohäsion im Pulverbett:* Pulverfeuchte und -fließfähigkeit
2. *Geeignete Frequenz, Beschleunigung und Pulverbewegung:* Partikeldämpfung
3. *Charakterisierung des unverdichteten Zustands:* Schüttdichte

#### 4. *Verdichtungsverhalten*: Pulverbeschallung nach Kapitel 8.6

Ein Verlust der Substrateizung durch die Umrüstung auf Sono-L-PBF im Kernbereich des Prozessfensters nach Hyer et al. [92] erscheint anhand der Effektdiagramme über alle Parametersätze hinweg hinnehmbar. Die Betrachtung vernachlässigt noch mikrostrukturelle Auswirkungen, zeigt aber schon deutlich auf, dass die Oberfläche ohne Substrateizung rauer ausfällt. Sono-L-PBF-Teile müssen zeigen, ob sie diesen nachteiligen Effekt durch Beschallung ausgleichen können.

# 8 Validierung der Vorüberlegungen und Umrüstung auf Sono-L-PBF

## 8.1 Grundlegende Pulverbeschallungsexperimente

### 8.1.1 Beschallung mit hochintensivem Ultraschall

In diesem Versuch in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für biomedizinische Technik (IBMT) in Sulzbach (Saar) gilt es herauszufinden, wie ein händisch mit einem Spachtel aufgestrichenes Pulver sich auf einer Substratplatte und einem Leistungsschallwandler verhält. Der Wandler bietet die Möglichkeit, sowohl die eingekoppelte Leistung als auch die Frequenz im Ultraschallbereich zu variieren. Eine Klebung stellt dabei die Verbindung zwischen Wandler und Substrat her, es gibt also einen Übergang von schallhart nach schallweich und wieder zu schallhart, was zu Schalldämmung führen kann. Aus diesem Grund werden die Resonanzfrequenzen als nicht repräsentativ angesehen. Theoretisch hat ein schwingendes System unendlich viele Resonanzfrequenzen, bei denen mit minimalem Energieaufwand maximale Auslenkungen erzielbar sind [143]. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass in jedem Schallbereich, der für Sono-L-PBF in Frage kommt, Resonanzen existieren, deren Lage bekannt sein muss. Es stellt sich die Frage, ob ein resonant arbeitender Schallwandler energieeffizient Schwingungen einkoppelt oder ob die unklare Form auftretender Eigenmoden den Prozessablauf stört. Das Experiment zeigt erhebliche Umlagerungen von Pulver, wenn sich der Frequenzsweep einer Resonanzfrequenz nähert. Bei einem quadratischen Substrat lagert sich das Pulver auf einer Diagonalen an und fließt von der Fläche ab, während bei einem runden Substrat ein Kreisring von Pulver entsteht, der sich konzentrisch zur Wandlermitte orientiert, siehe Abbildung 8.1. Diese Beobachtungen decken sich mit den simulierten Verschiebungsverteilungen, die bei einem quadratischen Substrat eher entlang einer Diagonale und bei einem runden Substrat in konzentrischen Ringen berechnet worden sind, siehe Abbildung 6.7. Nach dem Überschreiten des Resonanzbereiches löst sich die Pulverumordnung zum Teil wieder auf. Trotzdem bleiben die Randbereiche des Substrates unbedeckt. Gleichzeitig entsteht die Oberfläche des Pulvers sichtbar verworfener und rauer als zuvor.

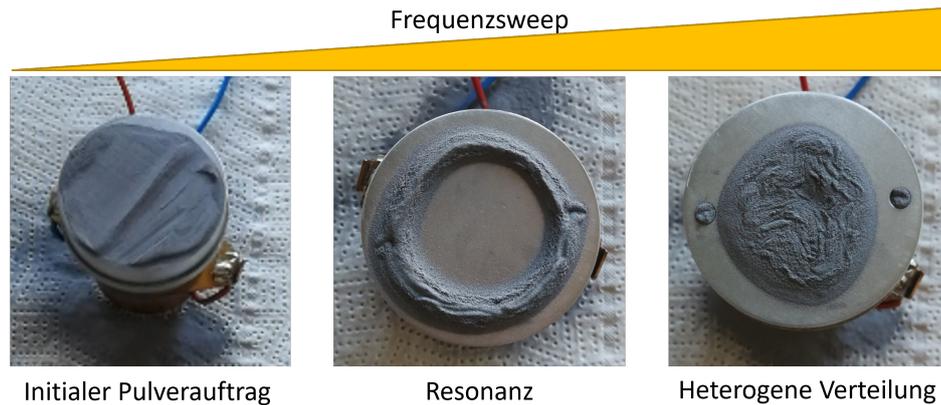


Abbildung 8.1: Verhalten einer manuell aufgetragenen Pulverschicht bei steigender Frequenz über eine Resonanz hinweg

Für die Anwendung beim Sono-L-PBF empfiehlt sich also auch im Experiment ein rundes Substrat gegenüber einem quadratischen. Die Betrachtungen zu den Resonanzen belegen zwar, dass ein resonantes Arbeiten beim Sono-L-PBF nicht zu empfehlen ist, jedoch führt die ständige Änderung der Masse zur Steuerungsaufgabe der Resonanzvermeidung im Prozess. Kontinuierlich die Frequenz anzupassen, behindert eine gleichmäßige Energiedissipation im Pulverbett, wie die Partikeldämpfungsergebnisse zeigen. Sinnvoller erscheint daher, eine Grenzbauhöhe festzulegen, ab der die eingeleiteten Schallfrequenzen wechseln müssen. Das lässt sich in die Maschinensteuerung integrieren, da die Pulverlagendicke und die Schichtanzahl standardmäßig hinterlegt sind.

### 8.1.2 Beschallung im Ultraschallbad

Beobachtbare Pulververdichtungsphänomene im Ultraschallbad liefern erste Erkenntnisse und Modellansätze für das Verhalten im Sono-L-PBF-Prozess. Die Einkopplung in den Pulverbehälter findet auch von der Seite und nicht nur gerichtet von unten statt, wie durch Interferenz entstandene Wellenmuster an der Wasseroberfläche des Bades veranschaulichen. Um dennoch eine gute Annäherung an die Beschallungsbedingungen des Sono-L-PBF zu erreichen, wird der Pulverbehälter zentrisch im Bad positioniert. Bei der Nennfrequenz von 45 kHz verdichten sich verschieden hohe Pulversäulen bei verschiedenen starken Leistungen zu verschiedenen Graden, sodass schallbedingte Hausnerverhältnisse berechenbar sind. Deren Aussagekraft in Hinblick auf Sono-L-PBF überwiegt vermutlich gegenüber der normtreuen Klopfdichtemessung zur Bestimmung des Hausner-Verhältnisses, weil eine konkrete Schallwirkung den Effekt hervorruft statt einem wiederholten Klopfen anderer Auslenkungen. In den Messungen kommt AlSi10Mg-Pulver der Charge 2021000766 zum Einsatz mit einer vergleichbaren

Feuchte wie in den Experimenten zur Schüttdichte und zu den Fließeigenschaften.

Die Verdichtung des Pulvers zeigt sich anhand der Dickenreduktion der Pulversäule binnen weniger Sekunden im Bereich von mehreren Millimetern. Die Verdichtung in so kurzen Zeitintervallen lässt die Annahme zu, dass das Pulver beim Sono-L-PBF schon verdichtet, während der Beschichter das Bett noch überfährt, und stellt so die Inkubationszeit aus der Partikeldämpfung in Frage. Es handelt sich hier um die Beschallung einer vollständig schüttdichten Pulversäule, sodass die Verdichtung in allen Volumenbereichen wirkt. Im Falle der dauerhaften Beschallung im Prozess, erfährt jede Schicht aber einzeln den Schalleinfluss und die Lage der Pulveroberfläche sackt nicht sichtbar in z-Richtung ab. Um diese Vermutung zu bestätigen, findet ein Versuch zur Nachverdichtung statt. Durch die Verdichtung immobilisiert das Pulver erheblich, verliert also drastisch an Fließfähigkeit. Das geschieht in so großem Umfang, dass eine Fließfähigkeitsmessung nicht mehr stattfinden kann und das Pulver nach Versuchsende mit einem Spatel aus dem Behälter stückweise herausgebrochen werden muss.

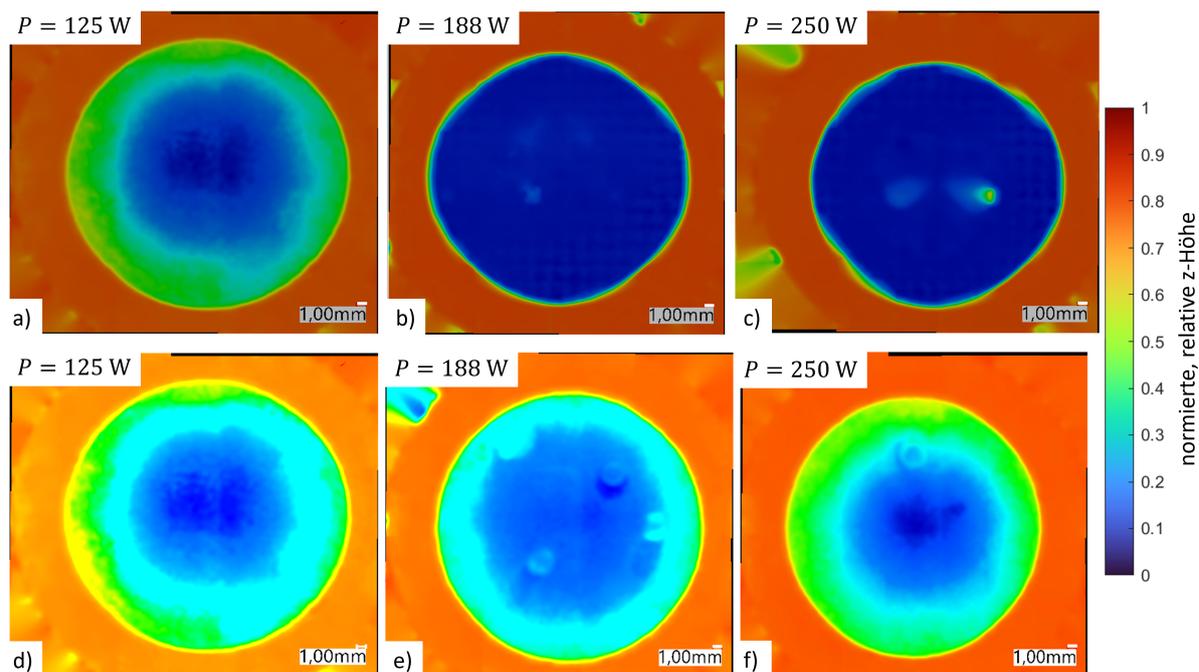


Abbildung 8.2: 3D-Panorama-Aufnahmen des Digitalmikroskops verschieden beschallter Pulversäulen a)-c) halbe Füllung des Behälters und d)-f) vollständige Füllung des Behälters

Zuvor theoretisch begründete und in Simulationen gefundene konzentrische Verdichtungsringe zeigen auch die 3D-Panoramen in Falschfarben der im Ultraschallbad beschallten Pulver in Abbildung 8.2. Als Referenzhöhe dient hier der in den Bildern rot eingefärbte Behälterrand. Offenbar liegen die Mittengebiete tiefer als die Randbereiche, was sich ebenfalls mit der Simulation deckt. Blasenartige Artefakte treten in den

Bildern auf. Hierbei handelt es sich um Wassertropfen, die während der Beschallung aus dem Wasserbad in den Pulverbehälter geschleudert worden sind. Mit steigender Schalleistung in Abbildung 8.2 von a) nach c) und von d) nach f) nimmt der Kontrast ab. Grund dafür ist die stärkere Verdichtung bei höherer Leistung und das damit einhergehende stärkere Absacken der gesamten Pulveroberfläche in tiefere Bereiche. In allen Fällen lassen sich aber in guter Näherung Krümmungsradien der Oberflächen messen. Mit Hilfe der Höhenverhältnisse der verdichteten Pulveroberfläche, dem gemittelten Füllvolumen und der Einwaage des Pulvers ergeben sich Intervalle von Hausner-Verhältnissen. Die Untergrenze eines solchen Intervalls  $H_{min}$  liegt am Rand des Behälters vor, das Maximum  $H_{max}$  im Zentrum. Tabelle 8.1 fasst die Ergebnisse dazu zusammen.

Tabelle 8.1: Schallbedingte Hausnerverhältnisse für verschiedene Behälterfüllvolumina ( $d = 28$  mm,  $h_{max} = 40,6$  mm) und Schalleistungen, Primärverdichtung

Nenn- leistung /W	Mittlere Füllhöhe /mm	Einwaage Pulver /g	Schütt- dichte / $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$H_{min}$ /a.u.	$H_{max}$ /a.u.
250	40,6	33,587	1,34	1,26	1,52
250	23,2	20,006	1,4	1,01	1,13
188	40,6	33,450	1,34	1,14	1,26
188	22,8	20,045	1,43	1,03	1,2
125	40,6	34,487	1,38	1,1	1,22
125	22,4	20,073	1,46	1,01	1,12

Die in dieser Versuchsreihe gemessenen Schüttdichten entsprechen zwar keiner Norm, die Werte liegen aber dennoch nahe an den normgetreu gemessenen aus eigenen Versuchen sowie aus der Literatur. Wegen der genaueren Bestimmung der Füllhöhe treffen die Schüttdichten bei vollem Behälter am ehesten zu. Die Hausner-Verhältnisse bewegen sich in weiten Bereichen von 1,01 bis 1,26 am Rand und von 1,12 bis 1,52 im Zentrum, wegen der groben Messung der Füllhöhe nach Verdichtung. Dennoch ist deutlich erkennbar, dass eine erhebliche Verdichtung schallbedingt eintritt und sich in Zonen unterteilt, die wegen einer dichtesten Kugelpackung von 74% [168] auf ein Maximum von  $H_{max,th} = \frac{0,74 \cdot \rho_{th}}{\rho_S} \approx 1,53$  bei AlSi10Mg begrenzt ist. Dennoch findet die Verdichtung kaskadenartig statt und trifft nicht den prozesstechnisch relevanten Fall der schichtweisen Verdichtung. Folglich kann eine Sekundärverdichtung repräsentativ für alle Verdichtungen  $n$ -ter Stufe, wobei  $n$  die Pulverlagennummer bezeichnet, ein Intervall von Hausner-Verhältnissen hervorbringen, welches Sono-L-PBF besser abbildet. In diesem Versuch wird der Pulverbehälter vollständig gefüllt, im Ultraschallbad verdichtet, erneut voll befüllt und wiederholt beschallt, siehe Tabelle 8.2.

Tabelle 8.2: Schallbedingte Hausnerverhältnisse für verschiedene Behälterfüllvolumina ( $d = 28$  mm,  $h_{max} = 40,6$  mm) und Schalleistungen, Sekundärverdichtung

<b>Modus</b>	<b>Nennleistung /W</b>	<b>Mittlere Füllhöhe /mm</b>	<b>Einwaage Pulver /g</b>	$H_{min}$ /a.u.	$H_{max}$ /a.u.
Primär	188	40,6	33,450	1,14	1,26
Sekundär	188	40,6	5,066	1,14	1,2

Offensichtlich sind die minimalen Hausner-Verhältnisse identisch. Weil jedoch das Maximum in einen Bereich sinkt, den die Literatur als Hausner-Verhältnis von AlSi10Mg nennt [69], reduziert sich die Verdichtungsvariation. Das hat zur Folge, dass sich die sehr hohen Primärverdichtungen bei einem schichtweisen Auftrag von Pulver von oben asymptotisch einem moderaten Hausner-Verhältnis annähern und stark erscheinende Höhenunterschiede vom Zentrum zum Rand der Pulveroberfläche schwächer ausfallen, als Abbildung 8.2 vermuten lässt.

In Bezug auf ein reales Pulverbett im L-PBF helfen die bislang gewonnen Erkenntnisse dabei, den Verlauf des Hausner-Verhältnisses über der Bauhöhe und der Radialposition im Pulverbett gemäß Anhang B in Polarkoordinaten mathematisch herzuleiten. Es zeigt sich anhand von Abbildung 8.3 a), dass ein ausgeprägter Kernbereich mit Radien bis ca. 15 mm über die gesamte Bauhöhe homogen verdichtet. Die Randbereiche verdichten zwar wie simuliert schwächer als das Zentrum des Pulverbetts, aber sie weisen dennoch Hausner-Verhältnisse  $>1$  auf. Vermutlich nähert sich bei Vergrößerung des Substratdurchmessers die Verdichtung am Rand von oben der 1 an, sodass bei einer Skalierung zu größeren Bauräumen mehrere Schallwandler nötig wären. In den Randbereichen ist wegen geringerer Verdichtung jedoch je nach Orientierung mit Eigenschaftsgradienten im Bauteil zu rechnen. Besonders starke Verdichtungen treten in den ersten Pulverschichten nahe des Substrates auf. Normalerweise trennen Stützstrukturen Bauteile vom Substrat bis in eine Höhe von 5 mm, um die Bauteile später unbeschadet abtrennen zu können. Deshalb sind in  $z'$ -Richtung laut diesem Formalismus nur geringe Eigenschaftsgradienten zu erwarten.

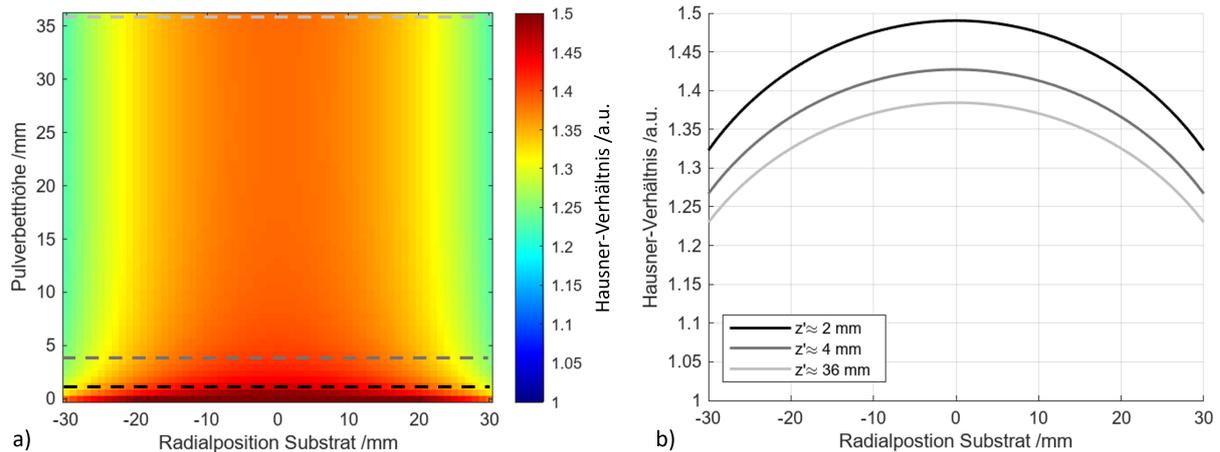


Abbildung 8.3: a) Ortsverteilung der Pulververdichtung im Bauraum über Radialposition auf dem Substrat und Pulverbetthöhe und b) Verdichtungskurven über der Radialposition bei ausgewählten Pulverbetthöhen

Die Modellgleichungen sowie die Verteilung der Verdichtung treffen auf die Primärverdichtung und geben Hausner-Verhältnisse aus, die auch in den anderen Verdichtungsversuchen im Ultraschallbad gemessen worden sind. Dass bereits die Funktion  $H(r)$  aus Gleichung 11.11 (siehe Anhang B) von der Pulverbetthöhe  $z'$  abhängt, verleiht der Kaskadenverdichtung Ausdruck, da eine hohe Pulversäule in diesem Modus stärker an Höhe verliert als eine niedrige.

Bislang behandeln die Verdichtungsüberlegungen nur homogene, zylindrische Pulverschüttungen. Im Realfall entsteht schichtweise zusätzlich ein Bauteil, das im Pulver eingebettet steht. Wegen der immensen Vielfalt an möglichen Geometrien, die ebenso vielfältige Einflüsse auf das Schallfeld nehmen können, ist es unmöglich diese Wirkungen vollständig analytisch zu erfassen. Hier soll ein grundlegender Modellversuch als Vorlauf genügen. Ein bereits additiv hergestellter Würfel aus AlSi10Mg dient als Modellbauteil und wird zur Wiederholung des Beschallungsversuchs im Ultraschallbad auf Knetmasse im Versuchsbehälter fixiert und in Pulver eingedeckt. In einem ca. 13 mm hohen Pulverbett zeichnen sich durch die Beschallung die Konturen des Würfels in der Pulverfläche in Form von Rissen ab, siehe Abbildung 8.4. In den Ecken der Bauteilkontur bilden sich kleine Verwerfungen in der Pulveroberfläche, die zum Teil den Riss füllen und optisch der Pulvergestalt nach Überschreiten einer Resonanz ähneln. Durch scharfe Kanten könnten tatsächlich Schwingungen ins Pulverbett eingekoppeln, die eine Resonanz des Pulvers treffen. Mit steigender Pulverbetthöhe heilt dieser Effekt aber aus, sodass dieser im Pulverbett verschwindet, wenn flache Bauteile abgeschlossen sind und hohe in demselben Baujob weiter gebaut werden.

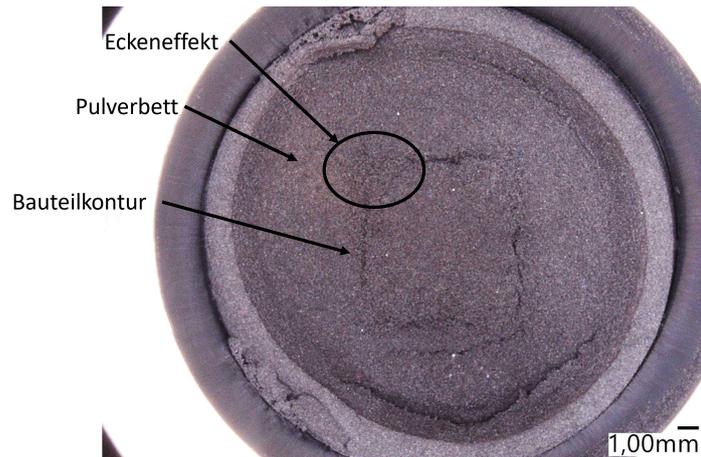


Abbildung 8.4: Panorama-Aufnahme der Oberfläche einer im Ultraschallbad verdichteten Pulverschüttung, die ein würfelförmiges Bauteil umgibt

Augenscheinlich wirkt sich zusätzlich zum Abzeichnen der Bauteilkontur mehr Pulver am Rand des Behälters auf. An die Stelle der kugelförmigen Wölbung der Pulveroberfläche tritt also eher eine flachere Verteilung im Kern und ein höheres Auftürmen am Rand. Inwieweit der Effekt im Prozess bei beliebigen Geometrien und in der Beschichtungsebene fehlenden Behälterwänden auftritt, müssen Experimente zeigen. Grundsätzlich sollte das aber kein Hindernis für einen erfolgreichen Baujob darstellen, denn der Beschichter streift Pulverüberhöhungen ab.

## 8.2 Wandlerauslegung

Die im Folgenden vorgestellten Kriterien und Auslegungen folgen einer linearen Darstellung ganz so, als wäre ein mathematischer Formalismus zu Grunde gelegt. Tatsächlich ist eher das Gegenteil der Fall. Einzelne Bedingungen hängen von einander ab und ein Ergebnis, das eher spät in dieser Auslegungskette auftritt, führt zu einer neuen Rekursionsschleife des kompletten Ablaufs. Es handelt sich also hier um die Ergebnisse eines iterativen Vorgehens, in dem sich viele Umstände gegenseitig bedingen.

### 8.2.1 Auslenkung und Frequenzbereich

Aus Kapitel 6.1.2 geht hervor, dass, sobald eine Schallschwingung im Bauteil existiert, das Bauteil und die angrenzende Schmelze damit geflutet werden und deshalb  $f > 0$  gilt. Als Obergrenze muss es jedoch eine maximale Frequenz geben, deren Überschreitung es aus Prozesssicht zu vermeiden gilt. Diese Maximalfrequenz liegt voraussichtlich im Ultraschallbereich. Wie der Stand der Forschung beschreibt, gibt

es ein Nahfeld des Schalls, dessen Beschreibung sich schwer gestaltet, da vielfältige Interferenzen auftreten. Deshalb empfiehlt es sich, die Nahfeldlänge  $L$  so auszulegen, dass die Dicke des Substrats in jedem Zustand die Nahfeldlänge abdeckt. Eine minimale Substratdicke  $d_S$  beträgt 8 mm, denn Substratplatten werden zur Aufbereitung zwischen zwei Baujobs abgeschliffen, sodass sich die Dicke verändert. Mit einem Wandlerdurchmesser von  $D = 60$  mm und einer longitudinalen Schallgeschwindigkeit von  $v_L = 5356 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (siehe Kapitel 3.2.2) folgt mit der Gleichung für die Nahfeldlänge aus [145] für die Wandlerfrequenz  $f$ :

$$L = \frac{f D^2}{4 v_L} \leq d_S \Leftrightarrow f \leq \frac{4 L v_L}{D^2} = 47609 \text{ Hz} \approx 47,6 \text{ kHz} \quad (8.1)$$

Daraus resultiert ein mögliches Frequenzband im Intervall (0 kHz; 47,6 kHz]. Durch dessen Breite muss sich eine Kernfrage der Wandlerauslegung damit beschäftigen, ob die Frequenz im Hör- oder Ultraschallbereich liegen soll. Ein mögliches Kriterium stellt die schallbedingte Auslenkung dar, die sowohl ein Minimum als auch ein Maximum aufweist, um im Sono-L-PBF-Prozess akzeptable Arbeitsergebnisse zu liefern. Das Minimum ergibt sich aus der Betrachtung zweier Pulverpartikel, die im statischen Schüttwinkel des Pulvers von  $34^\circ$  nach [81] aneinander grenzen. Im statischen Schüttwinkel liegen die Partikel deshalb aufeinander, weil dieses Pulvercharakteristikum integral angibt, wie Pulverpartikel mit ihren Oberflächen wechselwirken und in welchem Maße sie sich bei Aufschüttung auf einer Fläche verteilen. Je größer der Schüttwinkel desto steiler ist der Schüttkegel und desto geringer ist die spontane Verteilung des Pulvers auf einer Fläche. Es ergibt sich aus dieser geometrischen Konstellation also ein Maß  $x$  und ein Maß  $u$  gemäß Abbildung 8.5, wie sich ein Partikel bewegen müsste, damit ein höher gelegenes in einen Hohlraum hinabfallen kann. Wahrscheinlich liegt ein weichender Partikel aber selbst in einem Zwickel zwischen zwei darunter liegenden Partikeln, sodass ein Ausweichen um  $x$  blockiert ist. Folglich muss es eine Auslenkung  $u$  in  $z$ -Richtung geben, die das ausweichende Partikel an dem fallenden vorbei hebt. Im Anschluss kann das angehobene Partikel selbst herabfallen und einen anderen Hohlraum belegen. Die dazu nötige Auslenkung  $u$  ist schwer berechenbar und wird graphisch bestimmt. Eine am PC angefertigte Zeichnung und eine händische Zeichnung auf Millimeterpapier jeweils im Maßstab 1000:1 liefern mit  $u = 19 \mu\text{m}$  dasselbe Ergebnis. Hierbei handelt es sich jedoch um eine sehr konservative Abschätzung, da nur das Zusammenspiel zweier Partikel Berücksichtigung findet. Im Pulverbett bewegen sich viele Partikel um kleine Beträge von  $u$ , sodass deutlich kleinere Auslenkungen ausreichen, um eine Verdichtung zu erzielen. Um welchen Faktor es sich dabei handelt, hängt von der Anzahl der bewegten Partikel und damit von der Anzahl der vorangegangenen Schichten ab. Unter der Annahme, dass die im L-PBF-Prozess ma-

nuell eingestellte erste Pulverschicht aus vier Partikellagen besteht, reduziert sich bei gleicher Verteilung der Beiträge auf mehrere Schichten der Betrag von  $u$  auf ein Drittel von ca.  $6 \mu\text{m}$ .

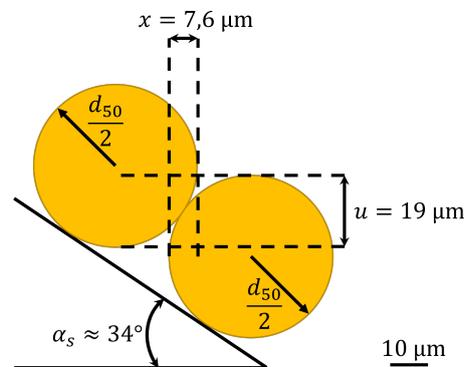


Abbildung 8.5: Grafische Bestimmung der Mindestauslenkung  $u$  in der Anordnung mit  $\alpha_s \approx 34^\circ$  und  $d_{50} \approx 43 \mu\text{m}$

Die Fokusebene des Laserstrahls liegt in der jeweils aktuellen Pulverbettoberfläche. Eine Auslenkung in  $z$  hebt diese Oberfläche aus dem Fokus heraus, was je nach Strahldivergenz zu Abweichungen im Strahldurchmesser und in der Bildung von Maßhaltigkeit und sonstigen Bauteileigenschaften führen kann. Deshalb begrenzt die Vergrößerung des Strahldurchmessers die Auslenkung in  $z$  nach oben. Das Lasersystem der verwendeten Maschine ist im Neuzustand charakterisiert worden. Aus dem Messprotokoll der Firma Cinogy Technologies GmbH [173] gehen relevante Größen für die Laserdivergenz hervor. Abbildung 8.6 stellt die gemessene Form des Laserstrahls inklusive der Intensitätsprofile jeder Ebene und der geometrischen Größen dar.

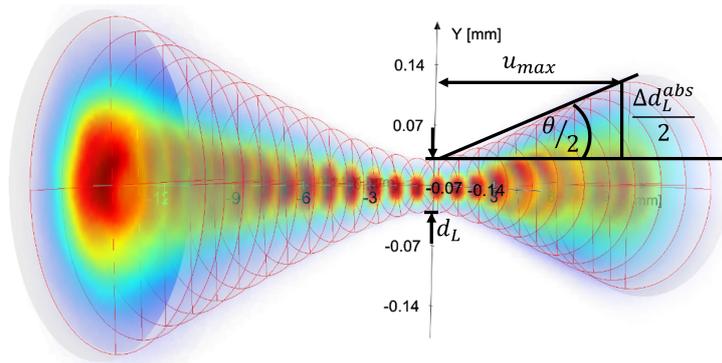


Abbildung 8.6: Form des Laserstrahls der genutzten Maschine SLM125 nach [173] mit Divergenzwinkel  $\Theta$ , Strahldurchmesser im Fokus  $d_L$ , Auslenkung  $u_{max}$  und absoluter Durchmesserabweichung  $\Delta d_L^{abs}$

Aus geometrischer Betrachtung folgt:

$$\tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) = \frac{\Delta d_L^{abs}}{2 u_{max}} \quad (8.2)$$

Der Strahldivergenzwinkel  $\Theta$  im Bogenmaß berechnet sich nach [174] aus der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda_L = 1,07 \mu\text{m}$ , dem Strahlqualitätsfaktor  $M^2 = 1,111$  und dem Laserstrahldurchmesser im Fokus  $d_L = 61,7 \mu\text{m}$  zu:

$$\Theta = M^2 \frac{4 \lambda_L}{\pi d_L} \quad (8.3)$$

Wird nun eine relative Abweichung von  $\Delta d_L^{rel} = 2\%$  des Strahldurchmessers vom Minimum toleriert, ergibt sich aus den Gleichungen 8.2 und 8.3 mit  $\Delta d_L^{abs} = \Delta d_L^{rel} d_L$ :

$$u_{max} = \frac{\Delta d_L^{rel} d_L}{2 \tan\left(M^2 \frac{2 \lambda_L}{\pi d_L}\right)} = 50,3 \mu\text{m} \quad (8.4)$$

Somit gibt es ein Auslenkungs- und ein Frequenzfenster, die in einem gemeinsamen Diagramm mit der Auslenkung bei einer Schallbeschleunigung von  $50 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  zur Wandlerauswahl aufgetragen werden können. Unbeachtet bleibt an dieser Stelle der Transport der Schallenergie in die Bauhöhe, denn das bestimmt die eingebrachte Schalleistung.

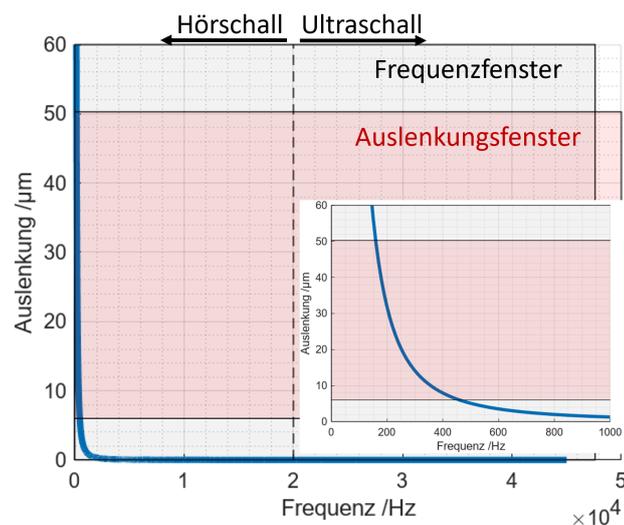


Abbildung 8.7: Auslenkung des Schallwandlers über der Frequenz mit auslegungsrelevanten Fenstern für Frequenz und Auslenkung

Abbildung 8.7 verdeutlicht, wie schnell die eingebrachte Schallauslenkung bei steigender Frequenz gegen 0 konvergiert. Dieser Umstand legt Frequenzen im Hörschallbereich nahe. Dennoch haben die zuvor vorgestellten Experimente im Ultraschall bei einer nominellen Frequenz von 45 kHz eine Verdichtung hervorgebracht. Über die nominelle Frequenz hinaus erzeugt ein Ultraschallbad aber eine breitbandige Anregung. Beweis dafür sind mehrere hörbare Frequenzen, die folglich tiefer als 20 kHz, also deutlich tiefer als 45 kHz liegen müssen. Es handelt sich so um eine Art der Rauschanregung, die offenbar einen wünschenswerten Effekt bewirkt. Das Auslenkungsfenster

zeigt klar auf, dass der Ultraschallbereich ungeeignet für Sono-L-PBF ist. Möglicherweise ließe sich eine Eignung durch extrem hohen Leistungseintrag herstellen, aber der Hörschall erscheint dennoch passender und durch geringere Schalleistung noch effizienter. Durch die Abkehr vom Ultraschallbereich rückt insbesondere der Teil des Frequenzfensters in den Fokus, der unterhalb von 20 kHz liegt. Unabhängig von der Zuverlässigkeit der Auslenkungsuntergrenze zeigt sich, dass die Schnittmenge beider Fenster mit der Auslenkungskurve klein ausfällt. Es ist also zu prüfen, ob die Beschallung mit einer einzelnen Frequenz ausreicht oder ob sich mindestens zwei Frequenzen überlagern müssen, um einen Effekt auf Schmelze und Pulverbett auszuüben. Die erfolgreiche Verdichtung im Ultraschallbad hat schon bewiesen, dass eine breitbandige Anregung durch Rauschen funktionieren kann, sodass dieser Ansatz weiter verfolgt werden sollte. Im Falle einer Superposition von mindestens zwei definierten, endlichen Frequenzen ist zu klären, ob sich diese Frequenzen additiv oder multiplikativ, also mathematisch gesehen zu  $\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)$  oder  $\sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)$ , überlagern. Exemplarisch zeigt Abbildung 8.8, wie solche überlagerten Schwingungen aussehen. Es wird deutlich, dass eine additive Überlagerung eher den Zweck erfüllt, denn beide Schwingungen bleiben erkennbar. Bei multiplikativer Verknüpfung der Sinus-Funktionen ergeben sich eher Wellenpakete, die einzelnen Pulsen ähneln. Das heißt, diese Art der Verknüpfung ist eher ungeeignet für Sono-L-PBF. Konkrete Vorgaben bezüglich Frequenzen oder deren Verhältnis zueinander sind hierin noch nicht enthalten und bedürfen experimenteller Ermittlung.

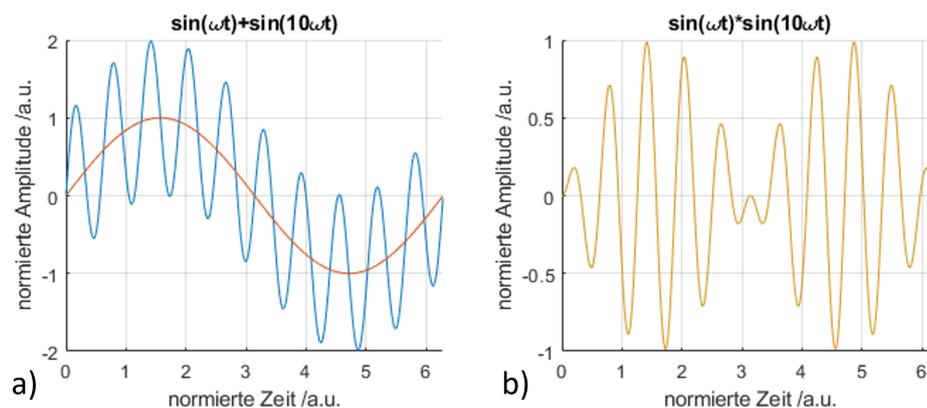


Abbildung 8.8: a) additive und b) multiplikative Überlagerung zweier Sinus-Schwingungen zweier Frequenzen mit einem Unterschied von Faktor 10

Für die Rauschanregung stellen sich Fragen der Rauschfarbe, siehe Kapitel 3.2.2, also wie die Intensitätsverteilungen der kontinuierlichen Frequenzspektren zu gestalten sind. Auch hier bedarf es einer experimentellen Untersuchung, die mit schallbedingten Pulverfließeffekten etc. in Einklang gebracht werden muss.

### 8.2.2 Schalleistung

Die Pulververdichtungsexperimente im Ultraschallbad haben vermutlich nicht nur wegen der breitbandigen Anregung zum Erfolg geführt sondern auch wegen der hohen Leistungen. Nominell liegen die Schalleistungen hier im Bereich zwischen 125 W und 250 W. Nun stellt ein Ultraschallbad weder einen Einmassenschwinger noch ein ideales System dar, sodass Schwingungskopplungen, Grenzflächeneffekte bei Medienübergängen, Schallschwächung in verschiedenen Medien insbesondere im Wasserbad sowie die Wärmeentwicklung eindeutig dafür sprechen, dass nur ein kleiner Teil der nominellen Schalleistung im untersuchten Pulver ankommt. Der geplante Aufbau für Sono-L-PBF kommt mit deutlich weniger Grenzflächen und kürzeren Laufstrecken für den Schall aus, insofern genügt eine Leistung von <100 W, um die gewünschten Effekte zu erzielen. Dadurch erhöht sich einerseits die Energieeffizienz und andererseits verringern sich die Anforderungen an die ansonsten kostspielige Steuerungselektronik. Als Beweis für diese These genügt eine rudimentäre akustische Betrachtung des Ultraschallbades. Im Zentrum steht der Transmissionskoeffizient von der Stahlwanne in das Wasserbad bei der Beschallung. Stahl hat nach [175] eine akustische Impedanz von ca.  $Z_S = 46,4 \text{ MRayl}$ , während die von Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  nach [137] bei lediglich  $Z_W = 1,48 \text{ MRayl}$  liegt. Es folgt der Transmissionskoeffizient vom Stahl ins Wasser zu

$$t_{SW} = \frac{4 Z_W Z_S}{(Z_W + Z_S)^2} \approx 0,12 \quad (8.5)$$

Damit betrüge die ins Wasser übertragene Leistung 30 W, falls die volle Nennleistung des Gerätes von 250 W in den Stahl eingekoppelt worden wäre. Bei der halben Nennleistung, die ebenfalls Pulververdichtung bewirkt, wären es sogar nur 15 W. Tatsächlich verringert sich die Leistungseinkopplung im Rahmen der Pulververdichtungsexperimente bei den Übergängen vom Wasser in den Pulverbehälter aus Aluminium und von diesem wiederum ins Pulver nochmals deutlich. Es liegen also tatsächlich Werte vor, die sogar bei einer sehr konservativen Abschätzung bedeutend unterhalb von 100 W liegen. Kommerziell erhältliche Körperschallwandler kommen daher auch für Sono-L-PBF in Frage.

### 8.2.3 Temperaturbeständigkeit

Darüberhinaus muss der Schallwandler über eine gewisse Temperaturreistenz verfügen, da die Wärme der Laserbelichtung ins Substrat und dessen Unterbau abgeleitet wird. Im Rahmen der Experimente ohne Substratheizung gibt die gemessene Plattformtemperatur an, wie stark sich ein Wandler unter der Substratplatte aufheizen kann. Jedoch haben die Experimente ohne Bauraumverkleinerung auf einer deutlich größe-

ren Substratfläche stattgefunden. Es bietet sich deshalb an, eine relative Flächenbelegung des Substrates  $b$  in % der Substratfläche zu definieren, die eine Übertragung auf den Sono-L-PBF-Aufbau mit Bauraumverkleinerung zulässt. Der Flächenbelegung ist gegenüber einer Volumenbelegung Vorrang zu gewähren, denn die Fläche  $A$  steuert den Wärmetransport innerhalb eines Mediums [140]. Mit den Daten aus zwei Baujobs bei verschiedenen Flächenbelegungen zu 20,6% bei den KMG-Testkörpern und zu 47,7% bei den Rauheits- und Dichtemesswürfeln kann eine lineare Anpassung eine Funktion der maximalen Substrattemperatur über dem Belegungsgrad ausgeben. Daraus wiederum lassen sich Reskalierungsfaktoren berechnen, die mit den ursprünglichen Temperaturverläufen über der Zeit multipliziert abgeschätzte Temperaturverläufe für verschiedene Flächenbelegungen ergeben, siehe Abbildung 8.9. Die linear angefitete Gleichung lautet für die erreichte Maximaltemperatur:

$$\vartheta_{max}(b) = 0,06 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%} b + 99,38 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (8.6)$$

Daraus folgen die Reskalierungsfaktoren zu  $\frac{\vartheta_{max}(b)}{\vartheta_{max,real}}$ . Somit können sowohl die maximal erreichbare Temperatur als auch die ungefähre Wirkzeit derer an den Diagrammen abgelesen werden. Bei einer hohen Flächenbelegung von 90% liegt die Maximaltemperatur bei ca. 105 °C, sodass ein Wandler in einem Bereich von ca. 85 °C zwischen Raum- und Maximaltemperatur funktionieren muss. Der Fit vernachlässigt den Einfluss von Energiedichten an verschiedenartigen Bauteilen. Die Daten entstammen Baujobs aus der Parameterstudie bezüglich des Einflusses der Substratheizung und beinhalten deshalb vielfältige Parametersätze, die in der Gesamtheit einen mittleren Energieeintrag abbilden.

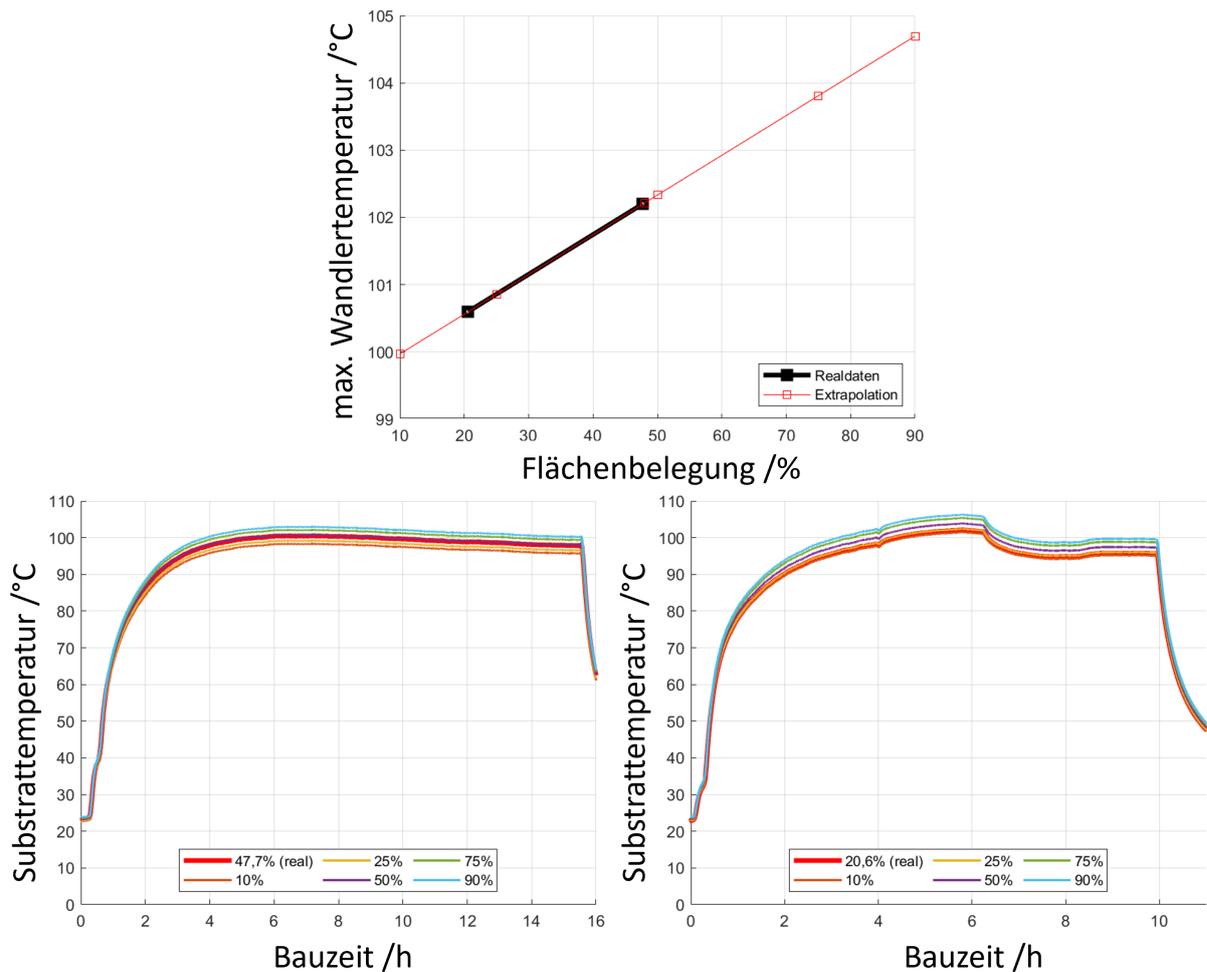


Abbildung 8.9: Extrapolation der maximalen Substrattemperatur und angepasste Temperatur-Zeit-Verläufe je nach Flächenbelegung

### 8.2.4 Finale Wandlerauswahl

Die Wahl fällt auf den in Abbildung 8.10 dargestellten Körperschallwandler Eliga 85977 von Elsässer GmbH mit einem Gesamtdurchmesser von ca. 60 mm und einer Dicke von ca. 25 mm ohne Fußplatte. Seine Nennimpedanz beträgt  $8 \Omega$  bei einer Leistungsaufnahme von maximal 20 W. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten trichterförmigen Lautsprechern bietet ein Körperschallwandler eine ebene Fläche, die hier zur Ankopplung eines Substrates dient. Dieser Wandler arbeitet im Hörschallbereich von 175 Hz bis 20000 Hz und findet normalerweise in der Raumbeschallung Anwendung. Folglich sind die als relevant identifizierten Bereiche des Frequenzfensters abgedeckt. Eine breitbandige Rauschanregung stellt kein Hindernis dar, da sich das Gerät auch zur Wiedergabe von ebenfalls breitbandiger Musik eignet.

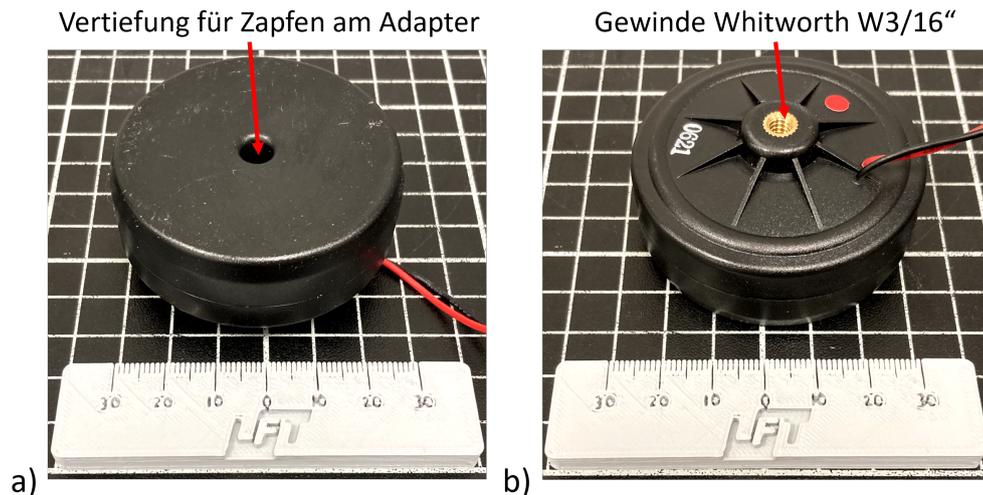


Abbildung 8.10: Schallwandler für Sono-L-PBF mit der Bauraumverkleinerung einer SLM125  
 a) Oberseite zur Montage eines Substrates und b) Unterseite zur Montage in der Maschine

Zur Anbindung eines Substrates soll eine Adapterplatte aus Stahl dienen, die mit dem Wandler verklebt wird und mit Hilfe zweier M5-Gewindebohrungen eine Verschraubung mit dem Substrat ermöglicht.

### 8.3 Konstruktive Anpassung der Maschinentechnik

Eine sorgfältige Auslegung der Maschinenumrüstung reduziert das Risiko kapitaler Schäden im Sono-L-PBF-Betrieb. Im Zentrum der Ausführungen steht nun die Schnittstelle zwischen dem gewählten Wandler und der gegebenen Maschine SLM125. Das Ziel einer funktionsfähigen Sono-L-PBF-Maschine beinhaltet die technische Herstellung von Funktionalität sowie einen für Mensch und Maschine ungefährlichen Betrieb. Sicherheitsaspekte finden sich vor allem in den Betrachtungen zur Leistungsübertragung wieder. Alle Änderungen im Maschinenumfeld beschränken sich auf den Bauraum der L-PBF-Maschine, insbesondere auf die separat erhältliche Bauraumverkleinerung. Die Maschine verfügt nämlich über eine vom Hersteller eingemessene Grundplatte auf der Verfahrenseinheit, auf der zwar andere Komponenten aufsitzen können, unterhalb davon aber sensible Sensor- und Heizelektronik sitzt. Ohne Anpassung der Bauraumverkleinerung wären also tiefe Eingriffe in die Elektronik sowie die Integrität der Maschine erforderlich. Davon ist in einem frühen, experimentellen Stadium abzu-sehen. So entfällt jedoch die Möglichkeit, die Substratplatte während eines Baujobs zu heizen. Die Bauraumverkleinerung besteht aus einem Stempel mit kleinem Querschnitt, der auf der Grundplatte im Bauraum über Stifte und Schrauben arretiert wird und mit der Grundplatte verfahren kann. Ein verkleinerter Schacht umschließt den be-

weglichen Stempel, wobei eine mit FFF additiv gefertigte TPU-Dichtung die beiden Teile voneinander trennt und Pulverdichtigkeit herstellt. Dank des verkleinerten Schachtes ergeben sich in den Zwischenbereichen von Standard- und BV-Schacht Räume zur Kabelführung des Wandlers, wie Abbildung 8.11 exemplarisch in rot zeigt.

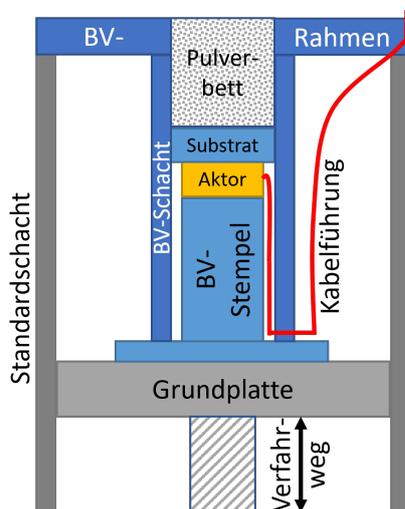


Abbildung 8.11: Schematische Schnittansicht der Bauraumverkleinerung in der L-PBF-Maschine mit exemplarischer Kabelführung

Aus den zuvor genannten Umständen der Grundplatte besteht keine Möglichkeit, Kabel des Schallwandlers nach unten wegzuführen. Stattdessen müssen Kabel durch den Bauraum laufen und gasdicht nach außen geführt werden.

### 8.3.1 Wandlersteuerung und -überwachung

Damit im laufenden Prozess ein definiertes, stabiles Leistungsniveau erreicht und gehalten werden kann, muss der Schallwandler zuverlässig zu steuern sein. Diese Forderung hängt jedoch nicht von der Beschallungsart ab. Nahezu beliebige Beschallungsmodi mit Einzelfrequenzen, additiv superponierten Frequenzen oder Rauschen kann die Freeware Audacity, verfügbar für alle gängigen Computerbetriebssysteme, realisieren. Dazu steht ein nicht in die L-PBF-Maschine integrierter Steuerungs-PC mit Linux Mint bereit. Über einen aus der Beschallungstechnik üblichen AUX-Anschluss am PC übermittelt die Software das Schallsignal an eine Endstufe des Typs the t.amp E400 (Thomann GmbH) zur Verstärkung, die das Signal mit entsprechender Leistung per kommerzieller Lautsprecherkabel an den Wandler weiterleitet. Damit die Steuerungs- und Überwachungsschaltung dem Dauerbetrieb standhalten kann, muss die Endstufe eine deutlich höhere Maximalleistung aufweisen als der Betrieb verlangt. The t.amp E400 kann maximal 120 W an Schallwandler mit  $8 \Omega$  leiten, was um einen Faktor sechs über der Maximalleistung des hier genutzten Wandlers liegt.

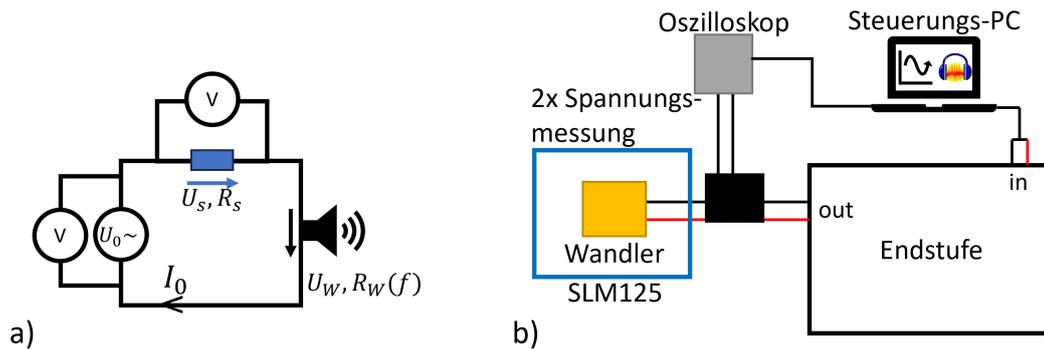


Abbildung 8.12: a) Schaltbild zur Leistungsmessung und b) externe Wandlersteuerung zur Schallunterstützung im Sono-L-PBF

Abbildung 8.12 zeigt die Ansteuerung und Leistungsmessung, die sich im ersten Schritt vollständig außerhalb der Maschine befindet. Nach einer ausreichenden Qualifikation kann der in der Maschine integrierte Steuerungs-PC auch die Aufgaben übernehmen, die zunächst dem externen PC zukommen. Eine direkte Messung der Leistung ist nicht möglich. Stattdessen kommen zwei Spannungsmessungen über einem Shuntwiderstand von  $R_S = 0,1 \Omega$  mit Messgröße  $U_S$  und über der Quelle mit Messgröße  $U_0$  zum Tragen. Da  $P = U I$  gilt, folgt in Kombination mit der Maschenregel und dem Ohmschen Gesetz [176]:

$$P = (U_0 - U_S) \frac{U_S}{R_S} \quad (8.7)$$

Diese Leistungsberechnung aus Gleichung 8.7 stützt sich lediglich auf Effektivwerte zweier Messkanäle und kann so mit dem Digitaloszilloskop PicoScope 2204 (Pico Technology Ltd.) und der Auslesesoftware PicoScope 7 T&M ohne Sonderfunktionen bewerkstelligt werden. Zusätzlich umgeht diese Form den frequenzabhängigen Wirkwiderstand des Schallwandlers, dessen Impedanz zwar nominell  $8 \Omega$  beträgt, sich aber noch in Real- und Imaginärteil je nach Signalfrequenz aufteilt. So entsteht eine robuste Messung der Schallleistung.

Im fertigen Aufbau findet die Leistungsmessung in Abhängigkeit von der Potentiometerposition an der Endstufe statt. Insgesamt verfügt die Potentiometerstellung der Endstufe über 21 Skalenteile. Ab Skalenteil 15 nimmt der Wandler im niedrigen Frequenzbereich Schaden und produziert keine klaren Töne mehr. Zur Bewertung der Wandlerleistung dient zusätzlich der Frequenzgang, der den emittierten Schallpegel der Frequenz gegenüberstellt und damit ein Maß für die mögliche Ausbeute bei bestimmten Frequenzen darstellt. Abbildung 8.13 a) zeigt auf, dass der Wandler im sicheren Bereich der Ansteuerung durch die Endstufe eine maximale Leistung von ca. 13 W aufnimmt. Die Endstufe gibt ungefähr so viel Leistung ab, wie der Wandler bei 200 Hz aufnimmt. In höheren Leistungsbereichen treten dennoch Unterschiede auf, vermutlich da die

Shuntspannung zunehmend ansteigt. Diese geht bei der Leistung am Wandler quadratisch ein, bei der Leistung der Endstufe hingegen nur linear. Beim weißen Rauschen erschwert die Signalform die Messung effektiver Spannungen, sodass das Ablesen eines Messwertes während einer Schwankung um ca. 100 mV geschieht. Das erklärt jedoch noch nicht die ungefähr halb so große Leistung am Wandler im Vergleich zu den Einzelfrequenzen. Mit Hilfe des Frequenzgangs des Eliga-Schallwandlers aus Abbildung 8.13 b) lässt sich aber erkennen, dass verschiedene Frequenzen verschieden intensiv vom Wandler wiedergegeben werden. Dadurch kann im weißen Frequenzspektrum mit linearem Pegelanstieg über der Frequenz [143] gerade in Frequenzbereichen unter 2000 Hz durch die Wandlercharakteristik Leistungsaufnahme verloren gehen. Es bleibt so zu klären, ob in den Leistungsbereichen bis 3 W überhaupt erwünschte Effekte beim Sono-L-PBF auftreten können.

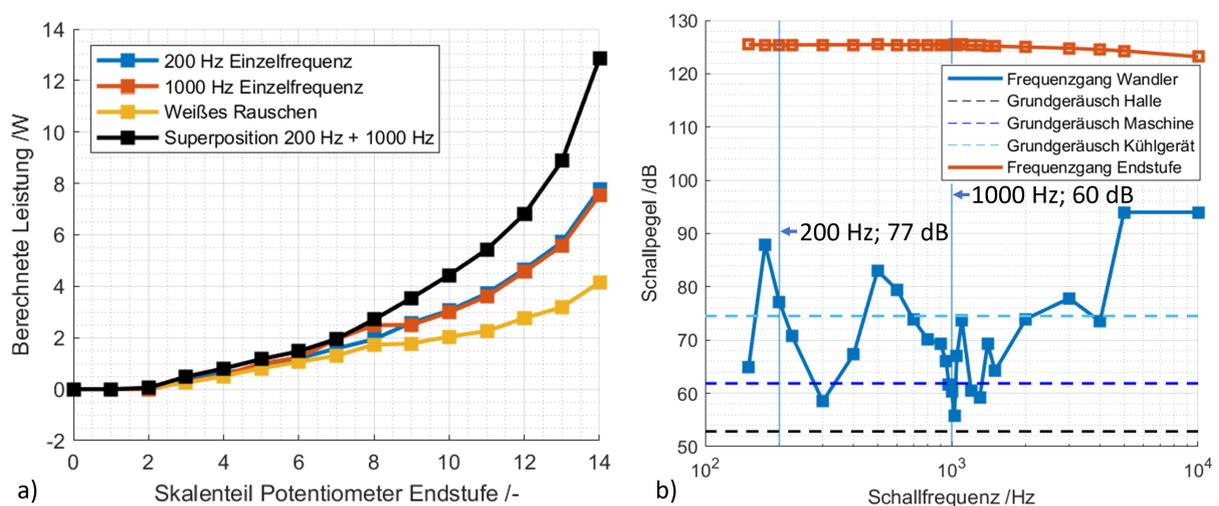


Abbildung 8.13: a) Wandlerleistung für verschiedene Beschallungsmodi in Abhängigkeit von der Potentiometerposition und b) emittierter Schallpegel über der Frequenz am fertigen Aufbau im Vergleich zu relevanten Referenzwerten

Außerdem zeigt Abbildung 8.13, dass es sich bei dem hier genutzten Schallwandler wegen der größeren Pegelausbeute bei hohen Frequenzen um einen Hochtöner handelt. Da der Frequenzgang der Endstufe mit zunehmender Frequenz abfällt, fehlt dem Wandler eingehende Leistung in diesem Frequenzbereich. Die Charakteristiken von Wandler und Endstufe stehen sich also entgegen, gleichen hier aber bei den interessanten, niedrigen Frequenzen kleine Pegel am Wandler aus. Alternativ könnte ein Mittel- oder Tieftöner die vermutlich zielführenden Frequenzen besser ausgeben. Es gibt jedoch am Markt keine Modelle in einer passenden Bauform mit einer angemessenen Temperaturbeständigkeit. Folglich muss nach einer ersten Qualifizierung von Sono-L-PBF an geeigneteren Anregungsmöglichkeiten gearbeitet werden.

### 8.3.2 Leistungsübertragung an die Maschine

Aus anderen Fertigungsklassen, z.B. vom Trennen durch Zerspanung, sind Schwingungen von Werkstücken und Maschinen als Fehlerquelle bekannt [170]. In welchem Maße Schwingungen durch den Schallwandler in die Maschine einkoppeln, bestimmt also voraussichtlich neben der Unversehrtheit der Maschine auch, ob zusätzliche Lärmquellen entstehen können. Zusätzlich stellt sich die Frage, welche Anteile des Schalls, der maschinenseitig den Wandler verlässt, durch Reflexion und erneute Einkopplung in den Wandler zu unerwünschten Überlagerungen von Wellen führt. Eine seitliche Schallabstrahlung in die Schachtwand der Bauraumverkleinerung wird vernachlässigt, da es sich bei dem gewählten Schallwandler um einen Dickenschwinger handelt.

Eine schalldämpfende und -dämmende Schicht vermag, den Maschinenanteil und den rückgekoppelten Anteil des Schalls zu reduzieren, da der Transmissionskoeffizient an der Grenzfläche zwischen einem schallharten und einem schallweichen Werkstoff unabhängig von der Kopplungsreihenfolge klein ist. Der Stempel besteht aus schallhartem Stahl, sodass die Dämmschicht aus schallweicheren Materialien bestehen sollte. Als Vergleich dienen berechnete Werte ohne Dämmschicht, die sich aus der Betrachtung von transmittierten Leistungen und gedämmten Pegeln ergeben, wobei hier Schalleistungspegel genutzt werden. Vor allem beim Hörempfinden und in der Arbeitssicherheit kommt der Schalldruckpegel zum Einsatz, aber bei der Spitzenleistung des Wandlers von 20 W liegt der Schalleistungspegel mit  $L_W \approx 133,0$  dB sehr nahe am Schalldruckpegel von  $L_p \approx 133,6$  dB. Die Umrechnung der akustischen Leistung in einen akustischen Druck  $p$  folgt nach [137] zu  $p = \sqrt{\frac{P \cdot Z}{A}}$  mit der akustischen Impedanz  $Z$  und der durchschallten Fläche  $A$ . Durch die Ähnlichkeit der maximalen Pegelwerte genügt hier der Fokus auf dem Schalleistungspegel  $L_W$ . Das Gehäuse des Schallwandlers besteht aus einem Polymer, das als Polypropylen (PP,  $Z_{PP} = 1,3$  MRayl [177]) angenommen wird. Maschinenseitig ergibt sich ohne Dämmschicht so ein Transmissionskoeffizient von  $t_S \approx 0,11$  sowie ein Reflexionskoeffizient von  $r_S \approx 0,89$ . Also gehen ca. 11% der Schalleistung in den Stempel der Bauraumverkleinerung über, während ca. 89% im Aktor verbleiben. Es gilt hier die Annahme, dass der Schallwandler als Dickenschwinger maschinen- und bauraumseitig dieselbe Leistung emittiert.

Je nach Anordnung der verschiedenen Schichten variiert die Schalldämmung erheblich. Abbildung 8.14 stellt die beiden Möglichkeiten zum Anbringen einer Dämmschicht gegenüber.

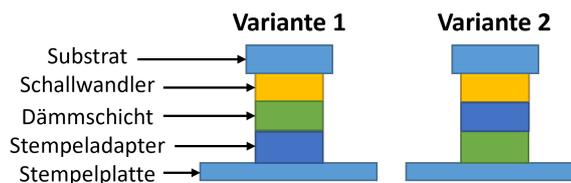


Abbildung 8.14: Variantenbildung zum Einbau der Dämmschicht in den BV-Stempel zur Entkopplung des Schallwandler von der Maschine

Bei Vernachlässigung von Dämpfungsphänomenen in den jeweiligen Werkstoffen treten bei jedem Medienübergang bis zu zwei Effekte auf. Zum einen bestimmen die Transmissionskoeffizienten einzeln die Leistungsübertragung ins angrenzende Medium und zusammen in der multiplikativen Verkettung, wie viel Leistung insgesamt in die Maschine fließt. Zum anderen sorgen Querschnittsprünge bei durchschallten Flächen von  $A_1$  auf  $A_2$  für eine Dämmung  $R_{Dämm}$  nach [50].

$$R_{Dämm} = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} + \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \right) \right) \quad (8.8)$$

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \Leftrightarrow P = P_0 10^{\frac{L_W}{10} - 12} \quad (8.9)$$

Die Form von Gleichung 8.8 zeigt die Unabhängigkeit davon, ob sich der Querschnitt verringert oder vergrößert. Zusammen mit Gleichung 8.9 für den Schallleistungspegel gemäß [137] lassen sich für die beiden Aufbauvarianten iterativ die Maschinen und Wandleranteile in Abhängigkeit von der akustischen Impedanz der Dämmschicht berechnen. Der Wandleranteil setzt sich dabei aus mehreren Summanden zusammen, die aus den beteiligten Transmissionskoeffizienten im Quadrat und einem Reflexionskoeffizienten, von der zurückwerfenden Grenzfläche. Die Quadrate der Transmissionskoeffizienten folgen aus  $t_{12} = t_{21}$  für beliebige Medienwechsel und der zweimaligen Durchdringung des Schalls, einmal zur Reflexion hin und einmal von der Reflexion weg. Wie Abbildung 8.15 verdeutlicht, kann Variante 2 die Schallanteile in der Maschine und im Wandler gegenüber Variante 1 und gegenüber der Variante ohne Dämmschicht deutlich reduzieren. Besonders für geringe Schallimpedanzen der Dämmschicht, also einer alternierenden Stapelung von schallharten und schallweichen Materialien in Variante 2, fällt die Schalldämmung stark aus. Zu schallweichen Materialien zählen insbesondere Polymere und organische Naturstoffe, die näherungsweise im Diagramm eingezeichnet sind.

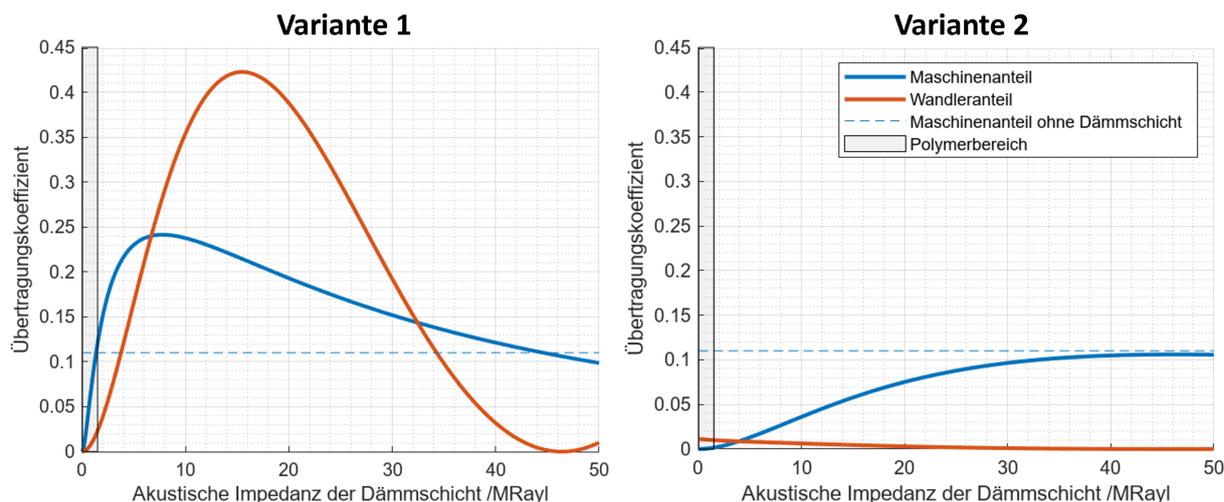


Abbildung 8.15: Anteile der Wandlerprimärleistung, die in die Maschine und rückwärtig in den Wandler eingekoppelt werden

Eine Werkstoffauswahl muss unter der Prämisse erfolgen, dass die Dämmschicht dieselben Temperaturen ertragen muss wie der Aktor auch, also ca. 106 °C. Diese Temperatur zum dauerhaften Einsatz im Idealfall ohne Umwandlungen wie Glasübergänge schließt die meisten gängigen Polymerwerkstoffe aus. Es verbleiben mit ausreichender Temperaturstabilität Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI), Polyethersulfon (PES) und aus der Klasse der organischen Naturstoffe Kork.

Tabelle 8.3: Eigenschaften geeigneter Dämmstoffe für den Einsatz im BV-Stempel

Werkstoff	PEEK	PEI	PES	Kork
Datenquellen	[178, 179]	[178, 180]	[178, 181]	[50, 175]
Dichte / $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1320	1270	1370	185
E-Modul /GPa	3,7	2,95	2,7	0,025
Verlustfaktor /a.u.	0,0135	0,0100	0,0250	0,1500
Temperaturstabilität /°C	140	160	180	150
Min. Pegelabnahme zu $P = 20 \text{ W}$ /dB	-35,05	-36,11	-36,16	-64,61
Max. Leistung an Maschine /mW	6,245	4,900	4,843	0,007

Tabelle 8.3 fasst die relevanten Eigenschaften dieser Werkstoffe zusammen. Dennoch können sie nur dann zur Dämmung beitragen, wenn die Art der Fügung mit den anderen Werkstoffen das zulässt. Schraubverbindungen durch eine solche Dämmschicht hindurch eliminieren den Dämmungseffekt nahezu vollständig [50]. Deshalb empfeh-

len sich Klebeverbindungen mit ausreichender Temperaturstabilität wie beispielsweise mittels Hochtemperatursilikon. Alle ausgewählten Materialien können im Aufbau des Stempels der Bauraumverkleinerung zu erheblichen Dämmungen führen. Dabei zeigen die technischen Polymere ein sehr ähnliches Verhalten, während der verarbeitete Naturstoff Kork bei ähnlicher Temperaturbeständigkeit stärker dämmt. Wahrscheinlich liegt das an der heterogenen, partikulären Struktur von Korkkörpern, die zwar hier nicht direkt berücksichtigt wird, sich dennoch in den makroskopischen Kennwerten Dichte, E-Modul und Verlustfaktor niederschlägt. Die hohen Dämmwerte beinhalten noch keine Frequenzabhängigkeiten. Die werkstoffbedingte Dämmung der Dämmschicht  $D_{WS}$  hängt neben dem in Tabelle 8.3 aufgeführten Verlustfaktor  $\eta$  von der medienabhängigen Schallgeschwindigkeit  $v_L$  sowie von den Auslegungsparametern Frequenz  $f$  und Dämmschichtdicke  $L_z$  ab. Es gilt nach [50]:

$$D_{WS} = \frac{8,7 \pi \eta}{v_L} f L_z \quad (8.10)$$

Abbildung 8.16 kartiert für die vier Werkstoffe  $D_{WS}$  in Abhängigkeit von der Frequenz und der Dämmschichtdicke. PEEK und PEI fallen aufgrund der niedrigen Verlustfaktoren hinter PES und Kork zurück. Trotzdem dämmt Kork in bedeutend größerem Maße als PES, sodass eine Dämmschicht aus Kork für dieselbe Wirkung deutlich dünner ausgeführt werden kann als eine aus PES. Das verdeutlichen die großen Anteile roter Färbung in der Karte von Kork, was eine Dämmung von mindestens 50 dB repräsentiert. Diese Dämmwirkung ist in den vorangegangenen Rechnungen sogar noch vernachlässigt worden. Für die Verwendung von Kork als Dämmschicht sprechen die Werkstoffeigenschaften in dieser Anwendung wie auch die Verfügbarkeit in einer geeigneten Geometrie am Markt zu einem günstigen Preis. Es ist also für diese Anwendung sinnvoll, Kork als Dämmschicht zu verwenden.

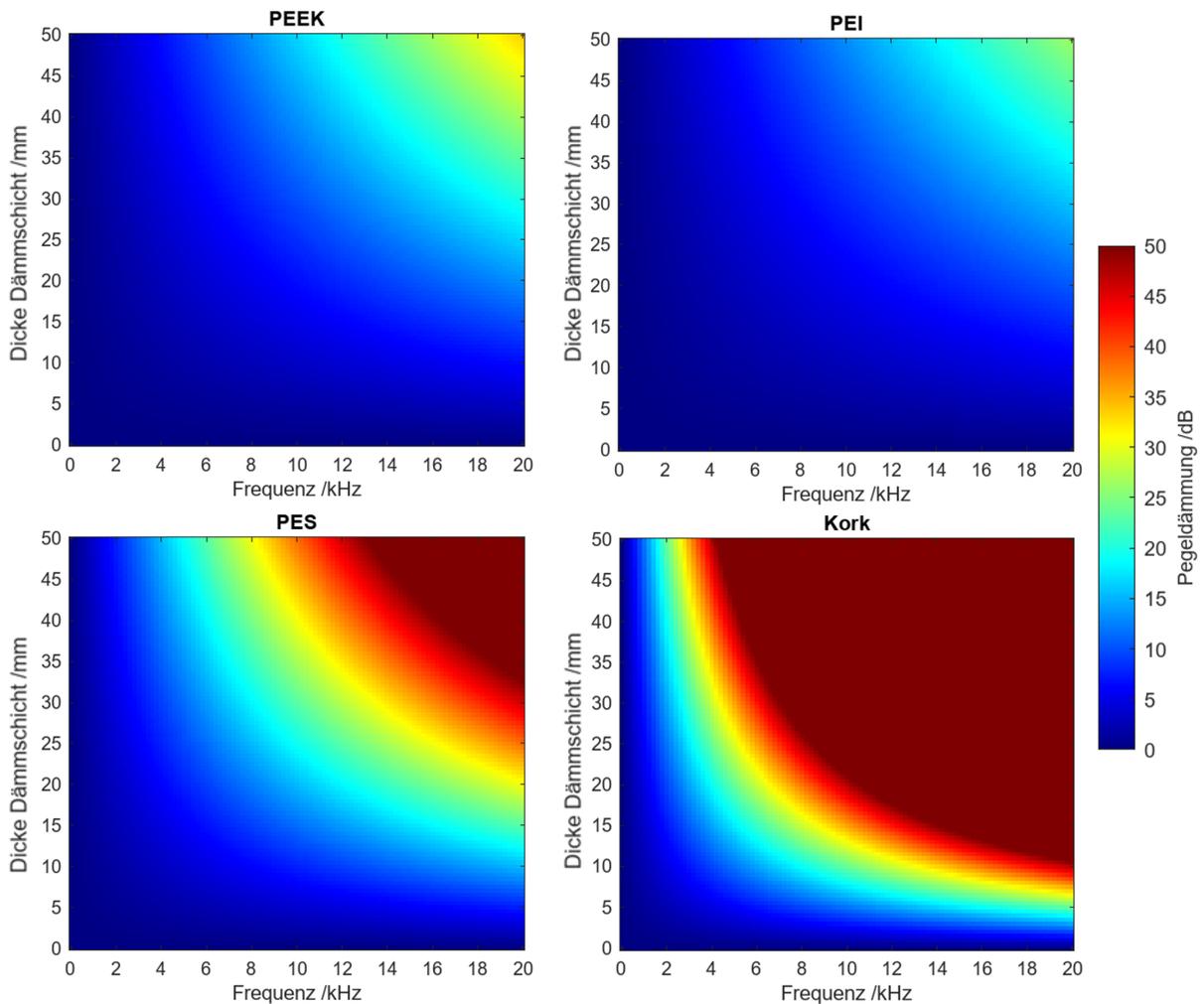


Abbildung 8.16: Werkstoffbedingte Dämmung als Funktion von Schallfrequenz und Schichtdicke für PEEK, PEI, PES und Kork

Obwohl die L-PBF-Maschine einen Verfahrensweg in z-Richtung von maximal 136 mm zurücklegen kann, bleiben für die Dämmschicht nur geringe Dicken übrig, da in diesen 136 mm noch folgende Komponenten Berücksichtigung finden müssen:

- 36 mm Bauhöhe
- 10 mm Substratdicke
- 10 mm Adapterdicke
- 25 mm Wandlerdicke
- 20 mm Stempeladapterdicke zur Montage einer Filzdichtung
- 5 mm Dicke für alle Klebungen des BV-Stempels

Somit bleiben für die Dämmschicht noch ca. 30 mm übrig, die bei Frequenzen ab ca. 2 kHz über 15 dB gedämmt werden.

### 8.3.3 Leistungsübertragung an den Bauraum

Die Betrachtung zur Leistungsübertragung an den Bauraum verläuft analog wie die zur Leistungsübertragung in die Maschine und behandelt arbeitssicherheitsrelevante Aspekte. Einerseits gestaltet sich die Rechnung wegen weniger Medienübergängen deutlich einfacher, andererseits gibt es Restriktionen, die die Schalldämmung an dieser Stelle erschweren. Die vom Wandler ausgehende Schallleistung koppelt im einfachsten Fall zuerst in die Substratplatte und anschließend in den argongefluteten Bauraum ein. Die akustische Impedanz von Argon beträgt  $Z_{Ar} = 5,38 \cdot 10^{-4}$  MRayl, wobei Daten aus [137, 182, 183] als Berechnungsgrundlage dienen. Der Transmissionskoeffizient zwischen dem Al-Substrat und Ar ergibt sich in der Folge zu  $t_{Al,Ar} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ . Es entsteht in diesem Ansatz der maximale Schallleistungspegel im Bauraum, da Dissipation in einem später aufgetragenen Pulverbett die Lärmbelastung senkt. Es ist mathematisch nicht sinnvoll erfassbar, wie weitere Komponenten, die sich im Bauraum befinden inklusive der Einhausung, verhalten, da vielfältige Reflexionen, Streuungen und Überlagerungen von Schallwellen bei nicht-senkrechten Inzidenzen auf Grenzflächen auftreten. Teile der Bauraumwandung bestehen aus einer Aluminium-Legierung, sodass der Schall nahezu vollständig im Bauraum bleibt, da  $r_{Al,Ar} = 1 - t_{Al,Ar} = 0,99985$  gilt.

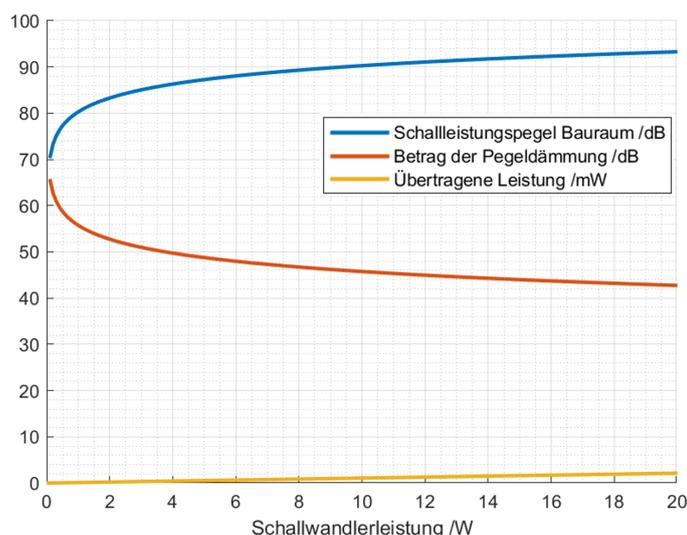


Abbildung 8.17: Akustischer Zustand des Bauraumes in Abhängigkeit von der Wandlerleistung

Als vergleichbarer und arbeitssicherheitsrelevanter Kennwert dient der Schallleistungspegel im Bauraum bezogen auf  $P_0 = 10^{-12}$  W in Abbildung 8.17 in einem Intervall von ca. 70 dB bis ca. 96 dB. Die Empfehlung zur freiwilligen Nutzung von Gehörschutz liegt bei 80 dB und wird hier ab 1 W Wandlerleistung überschritten. Ab 85 dB muss es Arbeitsschutzmaßnahmen geben [138]. Neben dieser theoretischen Betrachtung hat die Wandlercharakteristik aus Abbildung 8.13 einen Einfluss auf die Notwendigkeit zusätzlicher Arbeitsschutzmaßnahmen. Wie die Pegel des Maschinenumfeldes zeigen,

liegt die Beschallung in ähnlichen Bereichen. In der Praxis ist von den gewählten Beschallungsmodi nur die Einzelfrequenz von 200 Hz schwach hörbar. Eine Funktion des Wandlers kann bei den übrigen Modi und gleichzeitig geschlossener Bauraumtür nur durch die Leistungsmessung überprüft werden. Dennoch erscheinen die Ergebnisse plausibel, da der Betrag der Pegeldämmung durch die Medienwechsel in Bezug zur Maximalleistung des Wandlers von 20 W mit zunehmender Leistung abnimmt und gleichzeitig die Leistungsübertragung in der Größenordnung  $< 5 \text{ mW}$  zunimmt. Da das Schallsignal jedoch in allen Beschallungsmodi entweder im Umweltgeräusch untergeht oder nur als leises Brummen hörbar ist, gilt Teil a) des *Sicherheitsentwicklungszieles* als erreicht.

### 8.3.4 Anpassungen zur Kabelführung

Wie in Abbildung 8.11 bereits angedeutet, erfordern die Randbedingungen der Beschallung und der Maschine eine umständliche Kabelführung aus dem Schacht der Bauraumverkleinerung heraus, durch den Standardschacht der Maschine und letztlich den durch Bauraum nach außen. Bei dem zu verlegenden Kabel handelt es sich um ein kommerziell erhältliches, zweiadriges Lautsprecherkabel aus der Beschallungstechnik mit einem Querschnitt von 2,4 mm x 5 mm.

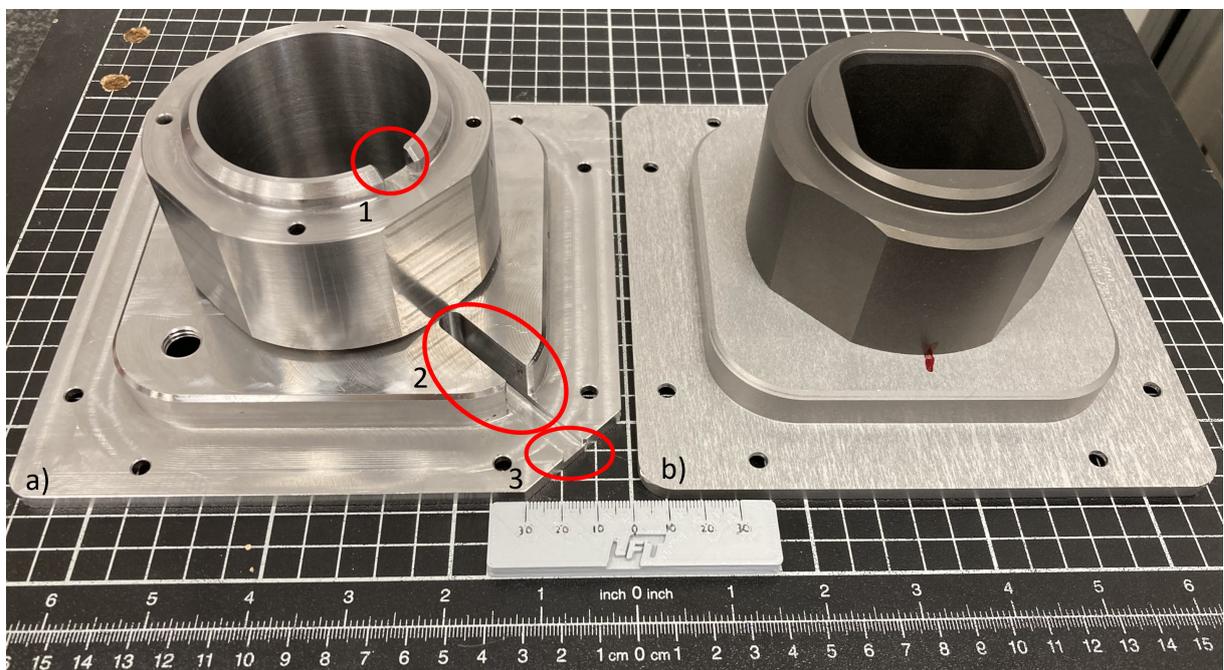


Abbildung 8.18: a) Anpassung des Schachtes der Bauraumverkleinerung mit 1) Kabeldurchführung aus dem verkleinerten Schacht heraus, 2) Kabelschlitz hinführend zum Bauraum und 3) Kabeldurchführung zum Bauraum sowie b) Originalschacht der Bauraumverkleinerung

Der Schacht der Bauraumverkleinerung muss wegen des Wechsels von einer quadratischen auf eine runde Substratgeometrie neu hergestellt werden. In diesem Zuge bekommt die Unterseite des Schachtes eine Aussparung zur Durchführung der Kabel, siehe Markierung 1 in Abbildung 8.18. Zwischen dem BV-Schacht und den Schraubenlöchern des BV-Rahmens verläuft in der Maschine eine Dichtung. Wenn auch hier eine Aussparung existieren soll, siehe Markierung 2, muss nach Verlegen des Kabels beispielsweise Silikon das Lückenvolumen verschließen. Die Fase an einer Ecke der Deckplatte, siehe Markierung 3, ermöglicht es dem Kabel, mit möglichst wenig Knickung oder Quetschung in den Bauraum zu gelangen.

Zusätzlich muss die Kabeldurchführung aus dem Bauraum heraus gasdicht erfolgen. Im Rückraum der Decke des Bauraumes befindet sich ein Stutzen, der nach außen führt und durch einen Stahldeckel aus der Vakuumtechnik verschlossen wird. Für die gasdichte Kabeldurchführung bekommt ein solcher Deckel eine PG9-Gewindebohrung mit einer Kabelverschraubung des Typs Lapp 52015710. Nach der Umrüstung findet eine Dichtheitsprüfung des mit Argon gefluteten Bauraumes statt, die erfolgreich verläuft, falls der Sauerstoffgehalt auch ohne aktive Regelung konstant bleibt, siehe Abbildung 8.19. Die Verschraubung hält dicht, der leichte Anstieg des Sauerstoffgehaltes nach der ersten Flutung ist auf Konzentrationsausgleich in der Maschine zurückzuführen. Nach der zweiten Flutung inklusive Gasregelung verbraucht die Maschine nicht mehr Argon als üblich. Das bestätigt die Dichtheit über den Zeitraum eines kompletten Baujobs und damit Teil a) des Maschinenentwicklungsziels.

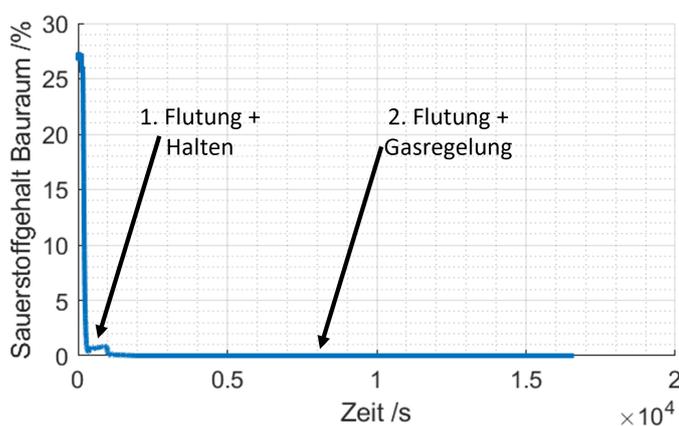


Abbildung 8.19: Gasdichtheitsprüfung der L-PBF-Maschine mit Kabelführung nach außen

### 8.3.5 Komponenten der Umrüstung

Zusammengefasst münden die Komponenten der Maschinenumrüstung in die Stückliste aus Tabelle 8.4. In Anlehnung an [184] erfolgt eine Einteilung in verschiedene Untergruppen der Umrüstung. Nicht in den Kosten enthalten sind Herstellungskosten

der intern, in der Zentralwerkstatt gefertigten Komponenten.

Tabelle 8.4: Stückliste aller Teile für die Umrüstung von Standard-L-PBF auf Sono-L-PBF in der Bauraumverkleinerung; Inventar: Bereits vorhandene Komponenten, intern: interne Herstellung oder Verarbeitung

Pos.	Spezifikation	Stückzahl	Stückkosten /€
<i>Umrüstung Bauraumverkleinerung</i>			
1	Rahmen mit Kabelschlitz gemäß CAD	1	intern
2	Schacht mit $d_{innen} = 62$ mm Kabelschlitz gemäß CAD	1	intern
3	Stempeladapter mit Anpassung gemäß CAD	1	intern
4	Substratplatte mit $d = 60$ mm	1	intern
5	Stempelplatte mit Passstiften gemäß CAD	1	intern
6	Beschichterlippenschiene gemäß CAD	1	intern
<i>Kabelführung aus der Maschine heraus</i>			
7	Verschlusskappe mit PG9 Gewindebohrung	1	Inventar, intern
8	Kabelverschraubung mit PG 9 Gewinde	1	5,99
<i>Sonotrode inklusive Steuerung</i>			
9	Festkörperlautsprecher Eliga 85977 $d = 60$ mm, $P_{max} = 20$ W, $R = 8 \Omega$ $f \in [175 \text{ Hz}; 20000 \text{ Hz}]$	1	30,67
10	Lautsprecherkabel 30 m Rolle $\vartheta_{max} = 70$ °C	1	13,99
11	Endstufe Thomann The t.amp 400 2x 190 W an $4 \Omega$	1	139,00
12	Tastkopf Voltcraft PP-80 mit BNC	2	9,49
13	Shunt Widerstand Widap 160000, $R = 0,1 \Omega$	1	2,99
14	Digitaloszilloskop PicoTechnology PicoScope 2204A-D2	1	115,00
15	Korkdämmschicht konisch $d \in [55 \text{ mm}; 50\text{mm}]$ , $h = 30$ mm	1	1,69
16	Hochtemperatursilikon UHU, 80 ml	1	12,79
17	Durchgangsverbinder mit Hebel Wago Compact, $I_{max} = 32$ A, 10 Stück	1	7,39
18	Steuerungs-PC HP 255 G7 mit Linux Mint	1	Inventar
<i>Summe</i>		18	353,21

Der angepasste Stempel der Bauraumverkleinerung unterscheidet sich deutlich vom Original. Vor allem die Werkstoffsubstitution von Stahl auf Kork fällt sofort auf. Der in Abbildung 8.20 a) fotografierte Aufbau folgt Abbildung 8.14 Variante 2 und berücksichtigt die alternierende Schichtung von schallharten und schallweichen Werkstoffen.

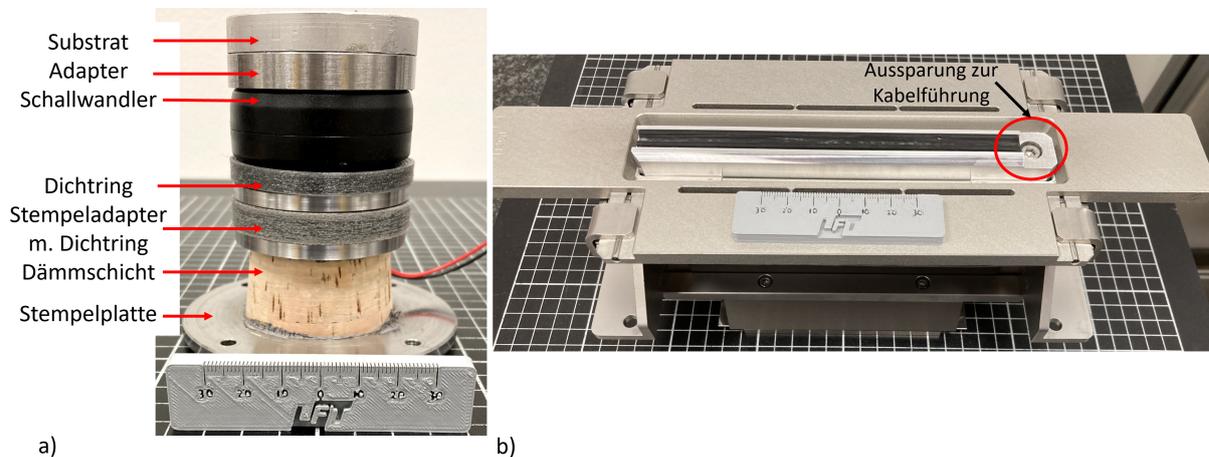


Abbildung 8.20: a) Angepasster Sono-Stempel mit additiv gefertigten Dichtringen aus TPU und b) umgerüsteter Beschichter mit angepasster Lippe und Schiene

Zum gefahrlosen Verfahren des Beschichters in der umgerüsteten Maschine muss trotz der Verwendung dünner Kabel die Gummilippe einschließlich ihrer Schiene angepasst werden, um nicht an den Kabelsegmenten im Bauraum zu reißen. Dazu eignet sich die angepasste Geometrie aus Abbildung 8.20 b), die am Rand mehrere Millimeter Höhe für die Kabelführung freigibt und mit einer um ca. 10 mm verschobenen Gummilippe weiterhin ihre Funktion erfüllt. Der angepasste Beschichter trägt immernoch homogene Schichten in einer Breite auf, bei der kein Rückbau auf die Standard-Schiene erfolgen muss, wenn Baujobs im Standard-L-PBF anstehen.

## 8.4 Abgleich der Pulverbeschallung im repräsentativen Sono-L-PBF-Aufbau

Mit Hilfe des Schallwandlers und der neu konstruierten Bauraumverkleinerung, soll probeweise eine Beschallung eines definiert aufgetragenen Pulverbettes betrachtet werden, um geeignete Frequenzbereiche in Kombination mit den Ergebnissen aus der Pulverdämpfung abstecken zu können. Ein repräsentativer Beschichtungsaufbau außerhalb der L-PBF-Maschine schützt einerseits die Maschine vor Schäden durch Konstruktions- und Auslegungsfehler und erlaubt andererseits eine bessere Beobachtung der Pulverbewegung bei Beschallung. In einer 3D-Verfahrenseinheit (Isel Germany AG) gibt es die Möglichkeit, eine definierte Pulverbeschichtung auf ein Substrat zu

bringen und gleichzeitig gibt es hinreichend Platz, um in diesem offenen Aufbau selbst und mit einer Digitalkamera die Beschallungseffekte beobachten zu können. Details des Aufbaus sind in Abbildung 8.21 beschrieben. Im Wesentlichen besteht der Aufbau aus einem eigens dafür konstruierten und per FFF additiv gefertigten Beschichter aus PLA, der umkonstruierten Bauraumverkleinerung, einem ehemaligen Mikroskoptisch und einer Messuhr. Derselbe Aufbau gemäß Abbildung 8.12, der später den L-PBF-Prozess beschallen soll, steuert auch hier den Beschichtungstest.

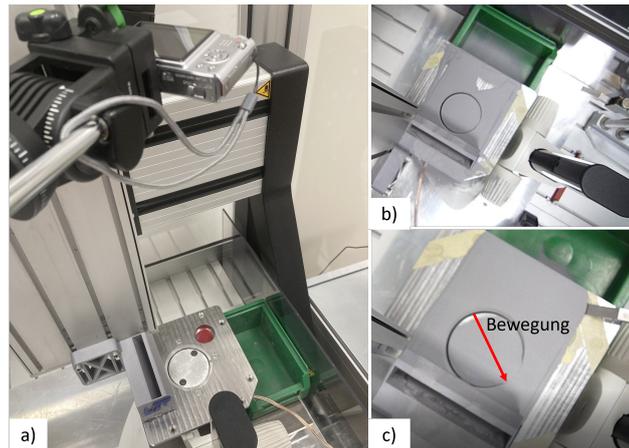


Abbildung 8.21: Repräsentativer Aufbau zur Pulverbeschallung außerhalb der L-PBF-Maschine mit a) Gesamtaufbau ohne Steuerung, b) initiales Pulverbett und c) beschalltes Pulverbett in Bewegung bei ungünstiger Frequenzwahl

Die Beschichtungsgeschwindigkeit dieses Eigenbaus weicht ungefähr um einen Faktor 4 von der tatsächlichen in der Maschine ab, denn im Aufbau kann der Beschichter mit maximal ca.  $27 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  verfahren und in der Maschine sind ca.  $107 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  eingestellt. Dennoch trägt der Aufbau Pulverschichten auf, deren Homogenität dem Original gleicht.

Als Hauptziel gilt es, geeignete Frequenzen bei gegebenen Leistungen zu finden, bei denen der Aufbau das Pulver in eine definierte, resonanzfreie Bewegung versetzen kann, ohne dass Pulverbewegungen in der Beschichtungsebene entstehen, die zur inhomogenen Umverteilung der Pulverlagendicke führt. Dazu soll zunächst ein grober Sweep über Einzelfrequenzen einen Überblick bieten und gleichzeitig eine Grundfrequenz für eine additive Überlagerung liefern. Tabelle 8.5 fasst die zugehörigen Beobachtungen zusammen. In den Versuchen kommt Pulver der Charge 2021000766 bei einer relativen Feuchte von ca. 5% in einem Pulverbett mit einer Dicke von ca. 1 mm zum Einsatz.

Tabelle 8.5: Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei Einzelfrequenzen von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12

Frequenz /Hz	Schalleistung /W	Substratbedeckung	Bewegung
175	5,30	homogen	nicht sichtbar
200	5,22	homogen	schwach in z-Richtung
250, 500, 750, 1000, 5000, 10000	5,23; 5,02; 4,95; 5,02; 4,06; 3,29	homogen	nicht sichtbar

Aus Tabelle 8.5 geht hervor, dass sich eine Frequenz von 200 Hz eignet, um Effekte im Pulverbett zu erzielen. Lediglich bei dieser Frequenz befindet sich das Pulver in geringer, gleichmäßiger Bewegung bei homogener Verteilung auf dem Substrat. Für eine Beschallung mit Einzelfrequenzen scheint sich also eine Frequenz von 200 Hz gut zu eignen, wie bereits die Partikeldämpfungsexperimente zeigen. Bei höheren Frequenzen gibt diese Messmethode wegen der stark abnehmenden Auslenkung des Wandlers keinen Aufschluss mehr über geeignete Beschallungsmodi. Durch die gleichmäßige, schwache Bewegung könnte 200 Hz auch als Grundfrequenz für die additive Überlagerung zweier Frequenzen dienen, da beide Frequenzen auch nach der Überlagerung erkennbar bleiben. Um eine gleichmäßige Beschallung im zeitlichen Verlauf der Welle zu gewährleisten, muss die überlagerte Frequenz die Grundfrequenz deutlich übersteigen. Deshalb beginnt die Untersuchung zur Überlagerung erst bei 1000 Hz, also in einem Bereich, bei dem in der Einzelfrequenz schon kein Effekt zu sehen gewesen ist. Tabelle 8.6 fasst die Beobachtungen zusammen.

Tabelle 8.6: Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei Überlagerung mit der Grundfrequenz von 200 Hz von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12

Frequenzen /Hz	Schalleistung /W	Substratbedeckung	Bewegung
200 + 1000	7,39	homogen	leicht in z-Richtung
200 + 3000	6,83	homogen	leicht seitwärts
200 + 5000	6,67	abnehmend homogen	leicht seitwärts
200 + 7000	6,33	abnehmend homogen	nicht sichtbar
200 + 9000	6,15	abnehmend homogen	leicht seitwärts
200 + 15000	5,45	abnehmend homogen	nicht sichtbar

Die Überlagerung von 200 Hz mit 1000 Hz erscheint nach dieser groben Variation der Überlagerungsfrequenz am vielversprechendsten. Mehr Zwischenstufen brächten vermutlich keinen größeren Erkenntnisgewinn, wenn sich die Bewegung in der Beschich-

tungsebene über weite Frequenzbereiche erstreckt, es träten weitere Resonanzen zu Tage, die aber ohnehin dem Prozess eher schaden. Im letzten Beschallungsversuch stehen die breitbandigen Rausch-Anregungen im Fokus. Dabei kommen sicherlich Frequenzen häufiger vor, die zuvor keinen oder einen unerwünschten Effekt gezeigt haben. Jedoch kann die Überlagerung zahlreicher Frequenzen in chaotischer Abfolge dazu führen, dass sich unerwünschte Bewegungen nicht ausbilden können. Weißes, pinkes und braunes Rauschen werden in den Experimenten untersucht. Die Ergebnisse stellt Tabelle 8.7 zusammen.

Tabelle 8.7: Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei breitbandiger Rauschanregung von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12

Rauschart	Schallleistung /W	Substratbedeckung	Bewegung
Weiß	2,82	homogen	nicht sichtbar
Pink	0,89	homogen	Pulververlust am Rand
Braun	1,77 volatil	homogen	nicht sichtbar

Aufgrund des am Substratrand abfallenden Pulverbetts sowie der stark schwankenden Schallleistung disqualifizieren sich pinkes und braunes Rauschen für den Einsatz im L-PBF-Prozess. Als drei mögliche Varianten zur Beschallung sollen in den ersten Baujobs Einzelfrequenzen von 200 Hz und 1000 Hz, eine Überlagerung von 200 Hz und 1000 Hz sowie weißes Rauschen getestet werden. Die Schraubenlöcher der Substratbefestigung zeichnen sich bei keiner der getesteten Beschallungsarten ab, sodass sie, wie auf Grundlage der Simulationen vermutet, keinen Einfluss haben. Auffälligerweise unterscheiden sich die gemessenen Schallleistungen von denen aus Abbildung 8.13 a). Die aufgenommene Leistung hängt offenbar vom schwingenden System ab und variiert mit den apparativen Bedingungen des Messstandes. Das erfordert eine Messung der Schallleistung vor jedem beschallten Baujob.

Dieser Aufbau stellt die Überlagerung der beiden Frequenzen heraus, die die Partikeldämpfung einzeln identifiziert hat. Ein mit 200 Hz beschallter Baujob wird zeigen müssen, ob wie von der Partikeldämpfung postuliert keine Verdichtung eintritt oder der gewünschte Bewegungsmodus wie in dieser Messung doch zu einem Effekt führt.

## 8.5 Zusammenbau des Aufbaus in der L-PBF-Maschine

Die vorangegangenen Untersuchungen belegen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Beschallungskomponenten. Zur nachfolgenden Qualifikation der Technologie im

Prozess ist die vollständige Umrüstung der Maschine nötig. Abbildung 8.22 zeigt den Zusammenbau im Bauraum der L-PBF-Maschine. Der Rahmen mit angeschraubtem Schacht der angepassten Bauraumverkleinerung liegt in der Beschichtungsebene. Ein eingeklebtes Vlies stellt den Druckausgleich zwischen dem Bauraum und dem nicht genutzten Volumen des Bauzylinders sicher, während das ebenfalls eingeklebte Kabel des Schallwandlers gasdicht am Bauzylinder abschließt. Der neu konzipierte Stempel inklusive Schallwandler und Substrat läuft sauber im BV-Schacht. Alle Kabelführungen innerhalb des Bauraumes stören keine weiteren Funktionselemente der Maschine, weder den Gasstrom über das Pulverbett noch die Bewegung des Beschichters. Bereiche, in denen sich im Prozess Pulver oder Schmauch ansammelt, sind bei der Kabelverlegung umgangen worden.

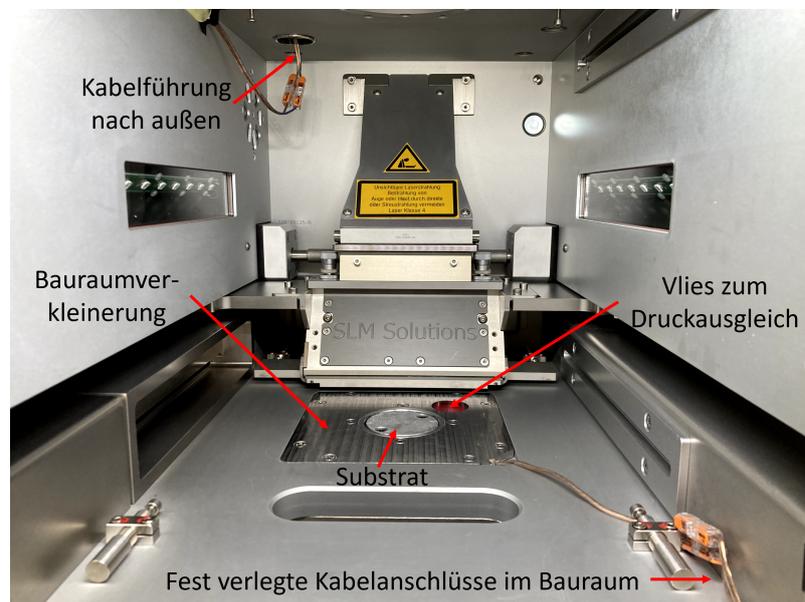


Abbildung 8.22: Umgerüsteter Bauraum zum Sono-L-PBF inklusive Kabelführung

Der erste Prototyp einer Sono-L-PBF-Erweiterung verfügt lediglich über eine externe Steuerung. Wie in Abbildung 8.23 dargestellt steht hier die gesamte Steuerung auf einem gemeinsamen Wagen und sorgt sowohl für die Leistungsmessung als auch für das Abspielen der Beschallungsdatei. In künftigen Systemen erscheint es sinnvoll, die Endstufe in die Maschine zu integrieren und die Beschallung mit dem maschineneigenen Computer regeln zu lassen. Das vorhandene Rack im Schaltschrank der SLM125 weist passenderweise dasselbe Maß auf wie die Montagevorrichtung an der Endstufe. Lediglich müssten einige Ventile und Drucksensoren ummontiert werden.



Abbildung 8.23: Steuerungseinheit der Baujobbeschallung mit Spannungsmessaufbau über Tastköpfe und ein Digitaloszilloskop

## 8.6 Pulverbeschallung im fertig umgerüsteten Aufbau

Die zuvor angestellten Analysen bezüglich des Verdichtungsverhaltens von Pulver in zunehmend repräsentativen Aufbauten haben insbesondere der Auslegung des Schallwandlers und der Identifikation erwartbarer Effekte gedient. Die fertig umgerüstete Maschine muss jedoch unter Beweis stellen, die zuvor postulierten Effekte auch erzielen zu können. Deshalb soll zunächst der Schalleinfluss auf das AlSi10Mg-Pulver in der neuen Maschinenkonfiguration im Fokus stehen. Ein zylindrischer Pulvertopf mit Durchmesser 30 mm und Höhe 30 mm sowie einem Flansch, der das Substrat ersetzt, wird per FFF additiv aus PET-G gefertigt. Der Flansch sorgt nicht nur für eine ebene Auflage des Bauteils auf dem Adapter und dem Wandler sondern bietet auch die Möglichkeit, diesen Topf mit denselben Schrauben zu befestigen wie sonst das Substrat. Da Schallausbreitung stark von der Geometrie abhängt, befindet sich eine Rundung von 5 mm Radius am Übergang zwischen Pulvertopf und Flansch. Der Versuchsstand, eingebaut in die Maschine und gefüllt mit beschalltem Pulver, ist in Abbildung 8.24 dargestellt. Dieser Aufbau erlaubt zwar keinen schichtweisen Pulverauftrag, macht durch die erwartbare Kaskadenverdichtung aber Effekte besser sichtbar. Eine Beschallungszeit von drei Minuten reicht aus, um die Verdichtung zu erzielen. Augenscheinlich tritt die Verdichtung innerhalb der ersten Minute ein, was sich mit den Ergebnissen der Partikeldämpfung deckt und für eine Verdichtungsinkubation abhängig vom Beschal-

lungsmodus spricht. Wenn das Pulverbett schnell verdichtet, braucht es keine Zeitaufschläge im Baujob und der Prozess verliert nicht an Geschwindigkeit.

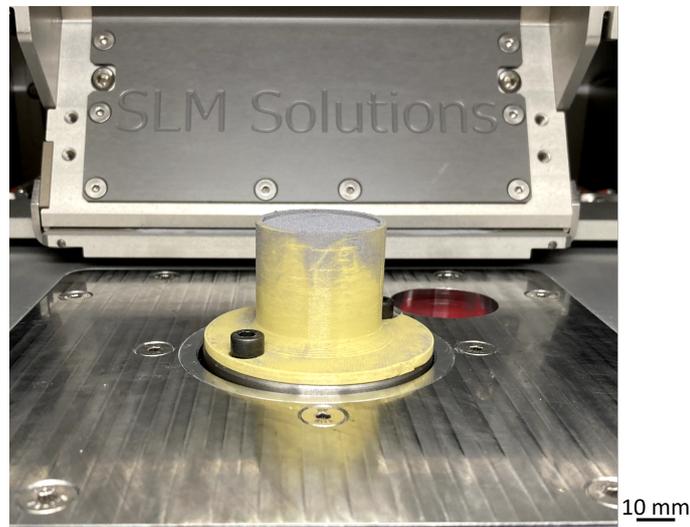


Abbildung 8.24: Versuchsstand zur Pulverbeschallung im fertig umgerüsteten Aufbau

Als vielversprechende Beschallungsmodi haben sich im Vorfeld Einzelfrequenzen von 200 Hz und 1000 Hz sowie deren Superposition und weißes Rauschen ergeben. Im direkten Vergleich auf zwei Leistungsstufen (Skalenteil 10 und Skalenteil 14 des Endstufenpotentiometers) werden nun analog zu den Experimenten im Ultraschallbad Dickenabnahmen im Zentrum und am Rand der Pulverschüttung zusammen mit der jeweiligen Pulvereinwaage zu Hausner-Verhältnissen in Tabelle 8.8 zusammengefasst. Die mittlere Schüttdichte von  $1,39 \pm 0,02 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  liegt zwischen dem normgetreu gemessenen Wert von  $1,34 \pm 0,01 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und den Literaturwerten. Anhand dessen zeigt sich also die Validität der Messungen, obgleich geringfügige Fehler auftreten können. Anhand von Tabelle 8.8 zeigt sich die Leistungsabhängigkeit des Hausner-Verhältnisses deutlich. Obwohl beide Beschallungsstufen im oberen Bereich der aufgezeichneten Wandlerkennlinie liegen, können nur Leistungen nah an der Belastungsgrenze des Wandlers Verdichtungen mit  $H > 1,1$  erzielen. Offenbar reicht zwar bei der Superposition schon eine geringere Leistung aus, aber das resultiert aus der Überlagerung von zwei Audio Spuren, die zu einer höheren Auslenkung führen. Der Effekt wäre derselbe, wenn sich zwei Spuren derselben Frequenz überlagerten.

Tabelle 8.8: Schallbedingte Hausner-Verhältnisse in der umgerüsteten Maschine für verschiedene Beschallungsmodi und Schallleistungen bei vollständiger Füllung

<b>Modus</b>	<b>Schallleistung /W</b>	<b>Schüttdichte / <math>\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}</math></b>	<b>Einwaage Pulver /g</b>	$H_{min}$ /a.u.	$H_{max}$ /a.u.
200 Hz Einzelfrequenz	3,09	1,41	29,949	1,08	1,09
1000 Hz Einzelfrequenz	3,09	1,43	30,347	1,05	1,08
200 Hz + 1000 Hz Superposition	4,31	1,38	29,407	1,13	1,14
Weißes Rauschen	2,07	1,39	29,522	1,06	1,08
200 Hz Einzelfrequenz	6,10	1,38	29,303	1,14	1,17
1000 Hz Einzelfrequenz	5,72	1,36	29,006	1,11	1,13
200 Hz + 1000 Hz Superposition	8,00	1,38	29,27	1,13	1,15
Weißes Rauschen	3,01	1,37	29,221	1,07	1,07

Entgegen der Ergebnisse der Partikeldämpfung führt eine Einzelfrequenz von 200 Hz zu einer stärkeren Verdichtung als eine Einzelfrequenz von 1000 Hz. Aus der Basis der Herleitung in Anhang C entstehen Karten in Abhängigkeit von Aufbauhöhe, Schallleistung und Hausner-Verhältnis, die einen Vergleich zwischen der Verdichtung im Originalaufbau und der Partikeldämpfung zulassen. Gemäß Abbildung 8.25 a) kann mehr Leistung die eingebrachte Schallbeschleunigung erhöhen, aber eher schwer in die Höhe des Pulverbetts transportieren. Laut Abbildung 8.25 b) sinken die Beschleunigungen mit zunehmender Verdichtung ab, vermutlich bedingt durch die Abhängigkeit von  $\sim \frac{1}{\sqrt{H}}$ . Tatsächlich bietet ein verdichtetes Pulverbett wahrscheinlich einen höheren Widerstand gegen die Ausbreitung von Schallwellen, wie die Dichteabhängigkeit der akustischen Impedanz beweist. Zusätzlich immobilisieren die Partikel nachweislich und sind dadurch schwerer in Bewegung zu versetzen. So liegt auch der Schluss nahe, dass ein stark verdichtetes Pulverbett bei derselben Schallleistung weniger Beschleunigung erfährt.

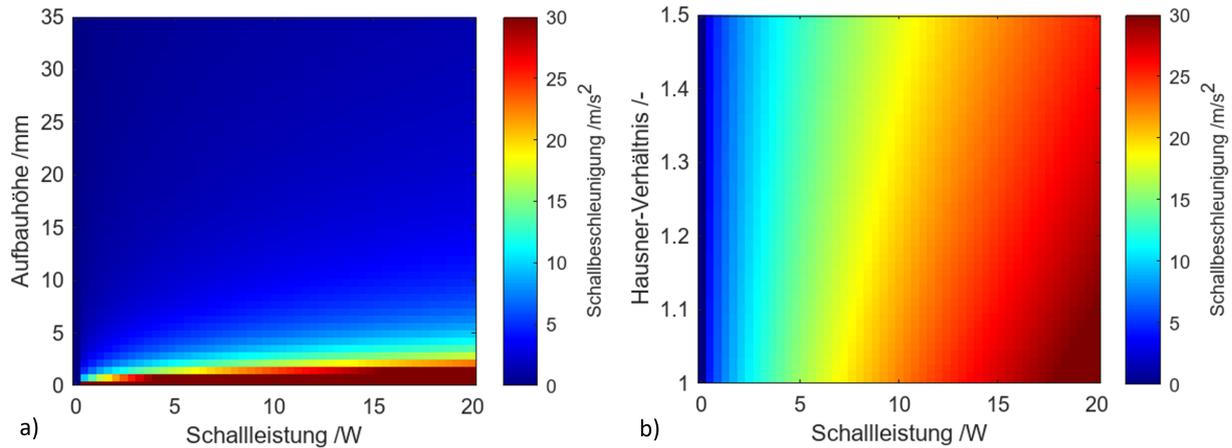


Abbildung 8.25: Verteilung der Schallbeschleunigung in Abhängigkeit von a) Aufbauhöhe und Schalleistung und b) Hausner-Verhältnis und Schalleistung

Die Beschleunigungsbereiche hoher Energiedissipation aus Abbildung 7.4 liegen ungefähr zwischen  $30 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 35 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  bei 200 Hz und  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  bei 1000 Hz. Dazu berechnete Auslenkungen liegen bei 200 Hz in einem Bereich  $< 40 \mu\text{m}$  und bei 1000 Hz  $< 2 \mu\text{m}$ . Beide fallen unter die Obergrenze des Auslenkungsfensters. Der Wert für 1000 Hz korrigiert jedoch die minimale Schallauslenkung für eine Verdichtung weiter nach unten. Gleichung 11.15 in Anhang C erlaubt zudem eine frequenzunabhängige Auftragung der Beschleunigungsverteilung. Abbildung 8.25 a) kann den scheinbaren Widerspruch zwischen Partikeldämpfung und Verdichtung im Sono-L-PBF-Aufbau auflösen. Da die hohen Beschleunigungen, die bei 200 Hz zur hohen Dissipation führen würden, nur in einem schmalen Bereich bis ca. 2 mm Aufbauhöhe auftreten, verdichtet das Pulver nur in diesem Bereich. Selbst, wenn der Schall den übrigen Bereich durchdringt, führt er hier nicht mehr zur Verdichtung. Das Pulver behält also in weiten Teilen nach Beschallung mit 200 Hz seine Fließfähigkeit bei, wobei ein schmaler Bereich verdichtet und das Hausner-Verhältnis im Mittel den Werten aus Tabelle 8.8 entspricht. Im Baujob bedeutet das eine Verdichtung im Bereich der Stützstrukturen und nicht im Bereich des Bauteils. Die relative Dichte der so beschallten Bauteile müsste also denen der Bauteile ohne Beschallung entsprechen, wenn die Pulverbettverdichtung tatsächlich zu einer Steigerung der Bauteildichte beiträgt. Bei der Beschallung mit 1000 Hz liegen die Bereiche der verdichtenden Beschleunigungen in größeren Aufbauhöhen als bei 200 Hz. Deshalb kommt das beobachtete Hausner-Verhältnis eher aus der Verdichtung größerer Pulverbettbereiche und nicht nur aus den ersten 2 mm.

## 8.7 Fazit aus der Umrüstung auf Sono-L-PBF

Grundlegende sowie zunehmend praxisnahe Experimente der Pulverbeschallung zeigen deutliche Verdichtungseffekte auf. Sowohl das breitbandig, auch mit Hörschall anregende Ultraschallbad als auch der fertig umgerüstete Aufbau zum Sono-L-PBF rufen Hausner-Verhältnisse  $> 1,1$  hervor. Aufgrund der kaskadenartigen Verdichtung in den Experimenten formt sich die Kontur eines Bauteils in der Pulverschüttung ab. Im Sono-L-PBF-Prozess verdichtet aber jede neue Pulverlage einzeln, sodass der Effekt vermutlich schwächer bis gar nicht auftritt. Mit dem ausgewählten Schallwandler ist die angestrebte Umrüstung der Bauraumverkleinerung erfolgreich verlaufen. Darüber hinaus besteht bei den gewählten Frequenzen kein Bedarf, Maßnahmen zur Arbeitssicherheit zu ergreifen. Das belegen gemessene sowie berechnete Schallpegel im Bauraum. Auch die Maschine nimmt durch Schalldämmung und -dämpfung insbesondere durch die Korkdämmschicht nur einen kleinen Bruchteil der Schalleistung auf, sodass keine Maschinenschäden zu erwarten sind. Die Kabelführung verläuft ohne Kollision mit dem Beschichter, ohne Störung des Gasstroms über das Pulverbett und gasdicht aus dem Bauraum heraus.

Es existiert ein funktionsfähiger Aufbau zum Sono-L-PBF, der im Rahmen von Baujobs qualifiziert werden muss. Dieser Aufbau besteht in einem nicht in die Maschine integrierten Steuerungsstand und in einem Umrüstsatz der Bauraumverkleinerung mit einem zylindrischen Bauvolumen mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Höhe von 35 mm.

# 9 Qualifizierung von Sono-L-PBF

## 9.1 Einfluss verschiedener Beschallungsmodi

Erste Bauteile zur Bestimmung, welche Beschallungsmodi sich tatsächlich für die Fertigung eignen und wie stark sich die Schallwirkung in den Bauteileigenschaften niederschlägt, berücksichtigen aufgrund der getroffenen Vorauswahl vier Modi:

1. 200 Hz Einzelfrequenz
2. 1000 Hz Einzelfrequenz
3. 200 Hz + 1000 Hz Superposition
4. Weißes Rauschen

Für jeden Modus muss es einen eigenen Baujob geben, in dem zunächst eine Würfelprobe und eine Fächerprobe gemäß Abbildung 5.6 hergestellt werden, um neben dem erfolgreichen Abschluss des Baujobs die Kriterien relative Dichte, Oberflächenqualität und Mikrostruktur heranziehen zu können. Drei der vier Baujobs laufen erfolgreich. Lediglich die Superposition von 200 Hz und 1000 Hz schlägt mehrfach fehl, da starkes Warping und zusätzlich Delaminationen zwischen Stützstrukturen und Bauteil auftreten. Trotz eines vielversprechend hohen Hausner-Verhältnisses in den Verdichtungsversuchen eignet sich dieser Modus also nicht für Sono-L-PBF. Folglich erfüllen drei der vier gewählten Beschallungsmodi Teil b) des *Maschinenentwicklungsziels*. Es treten keinerlei Schäden an der Maschine auf, sodass auch Teil b) des *Sicherheitsentwicklungsziels* erreicht ist. Während des Prozesses kommt es zu keiner Kaskadenverdichtung, die effektive Pulverlagendicke entspricht also der nominellen, sodass keine größere Pulvermenge über den Beschichter aufgetragen werden muss. Sono-L-PBF-Bauteile weisen trotzdem eine mit Standardbauteilen vergleichbare Höhe auf. Außerdem verdichtet das Pulver schwach genug, dass es sich im Rahmen der Maschinenrüstung problemlos mit einem Pinsel entfernen lässt.

### Dichteentwicklung bei Beschallung

Die drei erfolgreich getesteten Beschallungsmodi stehen nun den Standard-L-PBF-Bauteilen mit und ohne Substratheizung (MSH/OSH) gegenüber. Tabelle 9.1 zeigt,

dass zwei der drei erfolgreichen Baujobbeschallungen zu einer gemessenen relativen Dichte von 100% führen, was auf porenfreie Bauteile hinweist. Die relative Dichte nach einem unbeschallten Baujob ohne Substratheizung stimmt mit der nach einem mit 200 Hz beschallten Baujob überein. Das bekräftigt die Vermutung, dass die verdichtete Zone tatsächlich nur im Bereich der Stützstrukturen liegt und das Bauteil davon unberührt bleibt.

Tabelle 9.1: Archimedische Dichte von Standard-L-PBF-Bauteilen im Vergleich zum Sono-L-PBF mit verschiedenen Beschallungsmodi

Modus	MSH	OSH	200 Hz	1000 Hz	Weißes Rauschen
Schalleistung /W	–	–	7,35	4,82	3,67
Skalenteil Potentiometer	–	–	12	12	12
relative Dichte /%	99,7	99,8	99,8	100	100

Qualitativ beweist eine exemplarische Computertomographie, die am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZfP) durchgeführt worden ist, an Probenstücken der Kantenlänge 8 mm eine starke Abnahme der Porosität bei Beschallung mit weißem Rauschen im Vergleich zum Standard-L-PBF im Modus MSH. Die Anzahl der von der Freeware Slicer gefundenen Poren bei der Einstellung Half Resolution für überschaubare Rechenzeiten liegt bei MSH um einen Faktor 2-3 über der des weißen Rauschens. Wie Abbildung 9.1 zeigt, beinhalten die Segmentierungen softwarebedingt noch Artefakte an Probenoberflächen, sodass die Porenanzahlen vom Realzustand abweichen. Dennoch zeigen die Probenvolumina bedeutende Unterschiede auf.

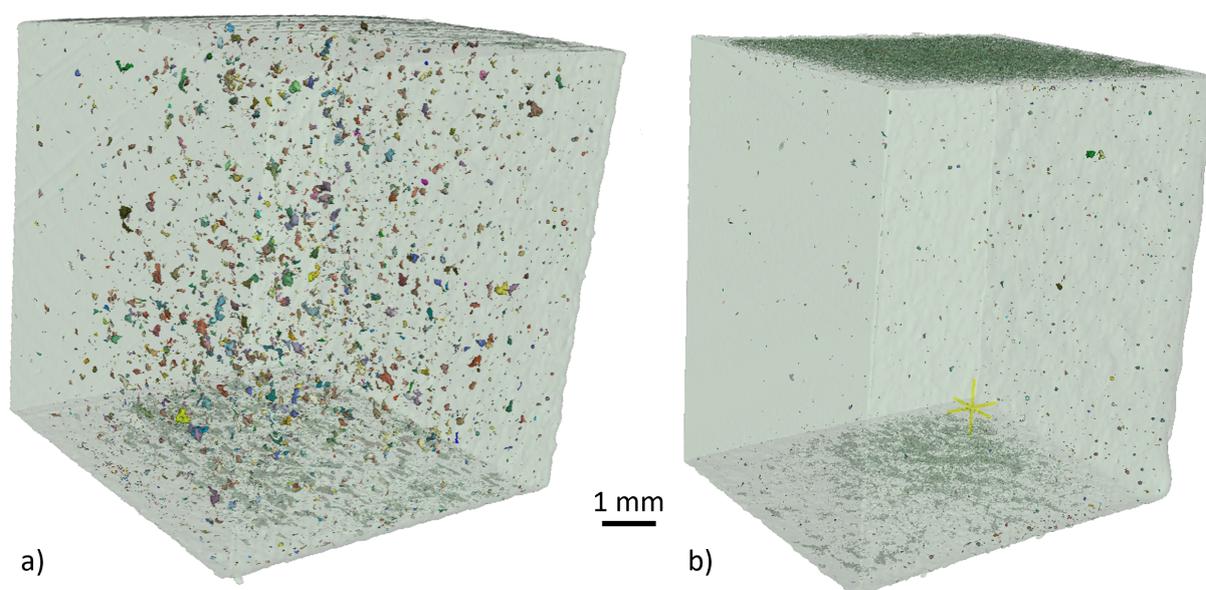


Abbildung 9.1: Exemplarische CT-Aufnahmen von a) einem unbeschallten MSH-Probenstück und b) einem mit weißem Rauschen beschallten Probenstück

Metallographische Schlibffanalysen sollen nun quantitativ klären, inwieweit sich die Modi tatsächlich unterscheiden, insbesondere mit Blick auf die Beschallungen mit 1000 Hz Einzelfrequenz und weißem Rauschen.

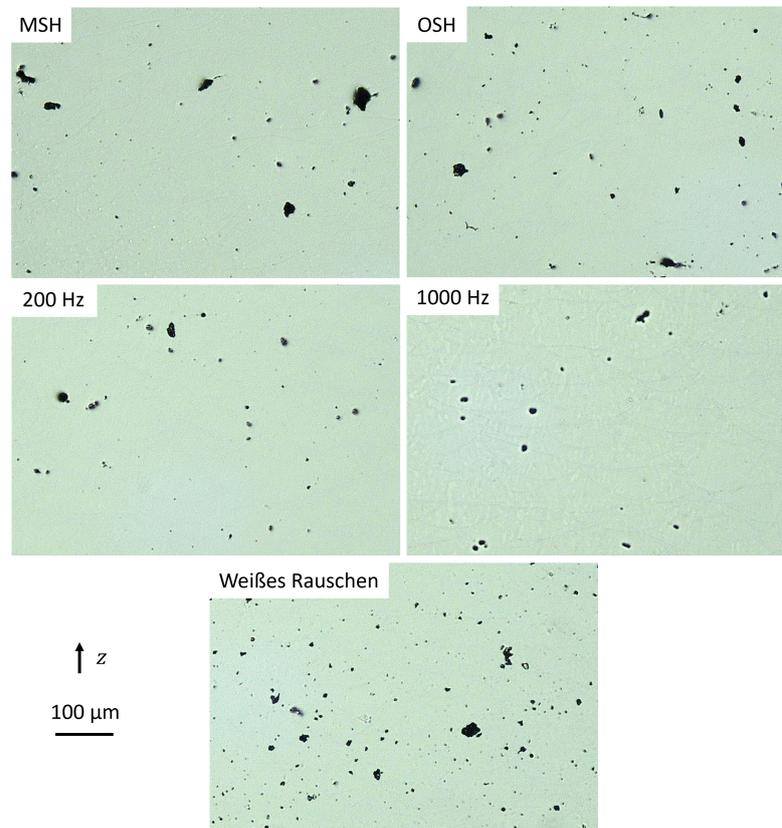


Abbildung 9.2: Metallographische Schlibffbilder zum Vergleich der Ausbildung von Porosität in Standard- und Sono-L-PBF-Teilen

Die mikroskopischen Aufnahmen aus Abbildung 9.2 zeigen zum Teil deutliche Unterschiede auf. Eine Beschallung mit 200 Hz unterscheidet sich nicht vom Standard-L-PBF, was die archimedische Messung bestätigt. Dagegen erscheint bei auf 100% theoretischer Dichte gemessenen Teile eine reduzierte Porosität. Obwohl die Poren nicht vollständig eliminiert worden sind, hat sich ihre Anzahl augenscheinlich deutlich verringert. Weißes Rauschen bringt eher kleinere Poren hervor, während 1000 Hz zu einer bedeutenderen Abnahme in der Anzahl führt. Automatisierte Messungen am Digitalmikroskop erlauben eine statistische Auswertung der Porengrößenverteilung. Hier sollen die in Abbildung 9.3 dargestellten Größen mittlerer äquivalenter Porendurchmesser (a), die Porenfläche (b) sowie das Aspektverhältnis als Quotient aus Minimal- zu Maximaldurchmesser jeder Pore (c) herangezogen werden. Der mittlere äquivalente Porendurchmesser  $d_{eq}$  beschreibt denjenigen Durchmesser, den eine exakt sphärische Pore mit identischer Fläche hätte, wobei die mittlere Fläche aller gemessenen Poren  $\bar{A}$

eingeht. Es gilt:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 \bar{A}}{\pi}} \quad (9.1)$$

Polygonzüge der Porenfläche und des Aspektverhältnisses sollen im Idealfall verschiedene Formen aufweisen. Das Ziel besteht darin, im Falle der Porenfläche schnell eine kumulierte relative Häufigkeit von 1 zu erreichen, da so die Poren eher klein ausfallen. Im Falle des Aspektverhältnisses liegt der Zielbereich bei 1 auf der Abszisse, sodass sich der Polygonzug für die Bildung von sphärischen Poren erst spät davon abheben sollte. So zeigt sich weißes Rauschen als besserer Beschallungsmodus im Vergleich zu 1000 Hz, da die Polygonzüge eher im Zielbereich liegen und der mittlere äquivalente Porendurchmesser geringer ausfällt. Auch wenn 200 Hz scheinbar kleinere Poren hervorbringt, bilden sie sich hier eher in unregelmäßiger Form aus, sodass sie Anisotropien fördern.

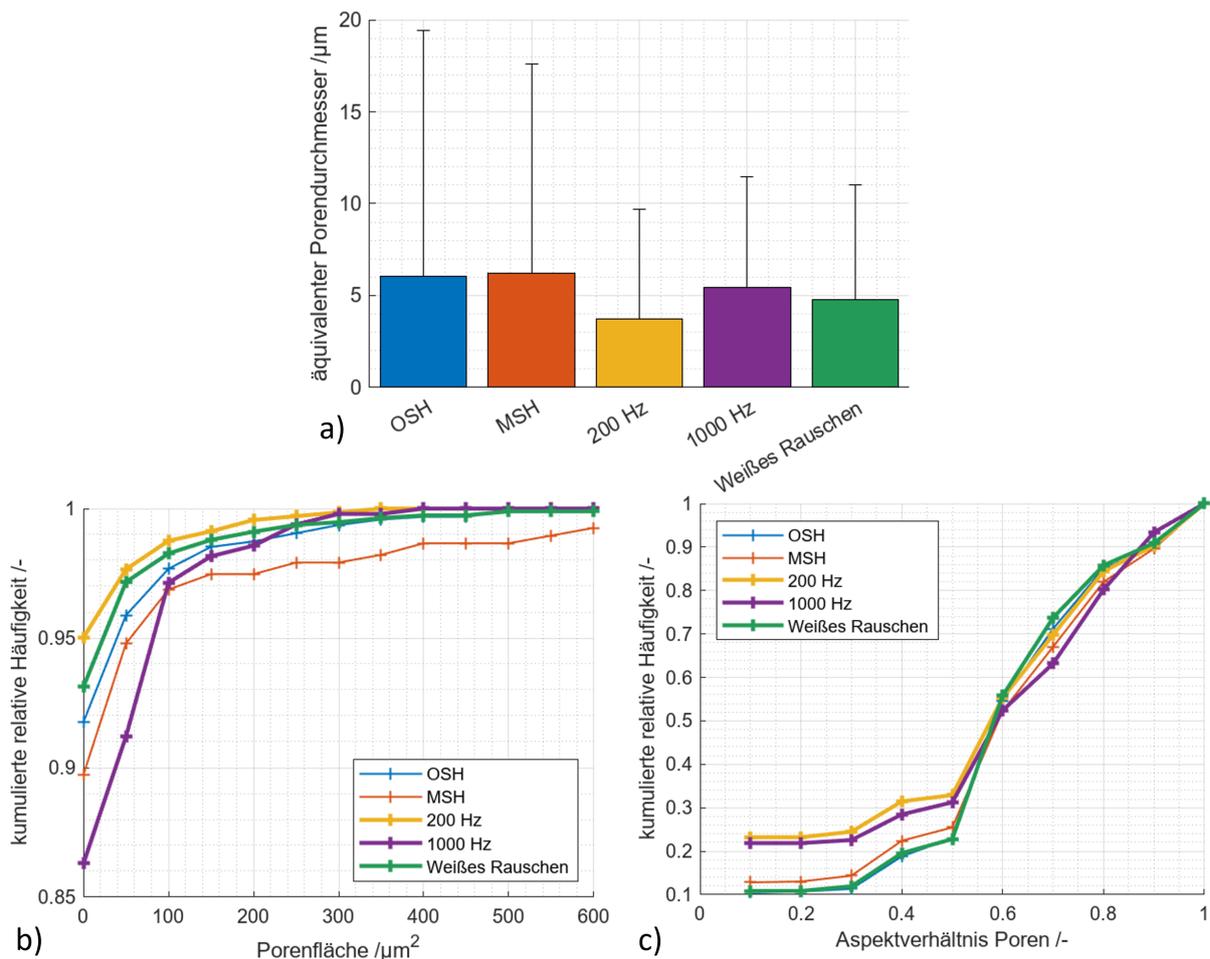


Abbildung 9.3: a) Mittlere äquivalente Porendurchmesser, b) Porenflächen sowie c) Aspektverhältnisse der Poren in Abhängigkeit des L-PBF-Modus

In Verbindung mit den prozessbedingten Porenbildungsmechanismen aus Tabelle 3.4 lässt sich die Schallwirkung näher analysieren. Angemessene Prozessparameter des L-PBF wie im hier genutzten Parametersatz minimieren Porosität gebildet durch Balling oder Lack of Fusion ohnehin. Ein Einfluss des Schalls auf diese Phänomene ist aber noch unklar, da möglicherweise Schallterme in die Energiedichtedefinition eingehen müssen. Trotzdem zeigen die Messdaten auf, dass beim Sono-L-PBF große sowie unregelmäßig geformte Poren in geringeren Anteilen auftreten als im Standard-L-PBF. Am wahrscheinlichsten liegt das an der Abschwächung bis hin zur Unterdrückung der Porenbildung durch ungleichmäßige Schichtdicken auf welligen Oberflächen vorheriger Schichten. Einerseits spricht dafür die Pulverbettverdichtung, die vermutlich Inhomogenitäten ausgleicht und andererseits zeigen Ergebnisse der Oberflächencharakterisierung höhere Qualitäten, sodass wahrscheinlich auch Grenzflächen zwischen einzelnen Pulverlagen glatter ausfallen.

Folglich ist das *Dichteentwicklungsziel* teilweise erreicht, da Beschallungsmodi die Bildung von Porosität hin zu wenigen und kleinen Poren beeinflussen. Also gleicht die Beschallung eines Baujobs nicht nur die Nachteile einer fehlenden Substratheizung aus, sondern verbessert die Bauteileigenschaften.

### **Oberflächenentwicklung bei Beschallung**

Anhand der Fächerproben zeigt sich ein Verlauf der Oberflächenrauheit über dem Neigungswinkel von Upskin- und Downskinflächen. Dabei darf der kritische Überhangwinkel der Stützung nicht überschritten werden, um as-built Oberflächen messen zu können. Abbildung 9.4 verdeutlicht, dass Sono-L-PBF nicht nur den Nachteil der fehlenden Substratheizung ausgleicht sondern auch bessere Oberflächen liefert als die Standard-Variante. Die Kernrauheit bezüglich des Profilzentrums  $R_k$ , siehe Abbildung 9.4 a), verläuft für alle Schallmodi ähnlich und nah am Modus MSH. Bei starken Überhängen reduziert sich aber der Downskineffekt. Deutlicher fallen die Unterschiede im Spitzenbereich des Rauheitsprofils auf.  $R_{pk}$ , siehe Abbildung 9.4 b), unterliegt bei den beschallten Proben weniger einem hyperbolischen Verlauf als bei den unbeschallten. Grund dafür ist die abgeschwächte Partikelanhaftung an Downskinflächen, die im direkten Vergleich der Proben mit bloßem Auge auffällt. Wie schon in den theoretischen Vorüberlegungen vermutet übernimmt das Pulverbett also tatsächlich eine höhere Stützwirkung durch seine Verdichtung um das Hausner-Verhältnis. Wie Abbildung 9.4 c) und d) zeigen, liegen die Streuungen der Rauheiten bei beschallten Teilen in ähnlichen Regionen wie bei unbeschallten.

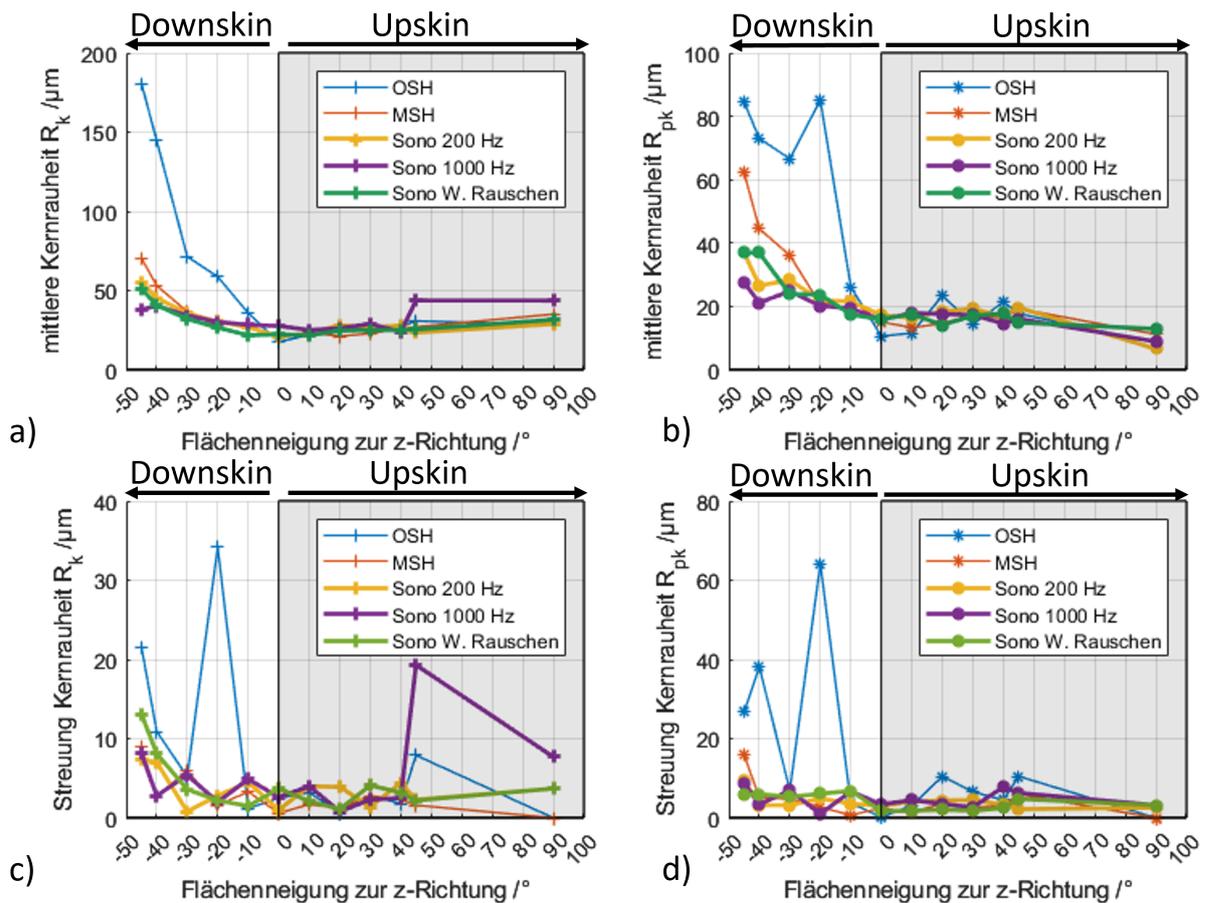


Abbildung 9.4: Verläufe der Kernrauheitsparameter  $R_k$  und  $R_{pk}$  über dem Überhangwinkel für Upskin- und Downskinflächen a)/b) Mittelwerte c)/d) Standardabweichungen

Gerade bei Upskin- und Downskinflächen mit geringem Neigungswinkel unterscheiden sich die Rauheiten der Sono-L-PBF-Teile kaum von denen des Standards MSH. Der Treppenstufeneffekt stellt in diesen Bereichen den Hauptgrund für die Rauheitsentwicklung dar, der mit zunehmender Neigung im Downskinbereich von der Partikelanhaftung als treibender Mechanismus abgelöst wird. Dennoch treten verschieden starke Maße an Partikelanhaftung auch an 0° zur z-Richtung geneigten Flächen, beispielsweise den Seitenflächen der Dichtewürfel, auf. Abbildung 9.5 zeigt dazu mit Höhenkarten überlagerte Digitalmikroskopiebilder. Weißes Rauschen und 1000 Hz Einzelfrequenz bringen offenbar die gleichmäßigsten Oberflächen hervor und weisen am wenigsten Partikelanhaftungen auf.

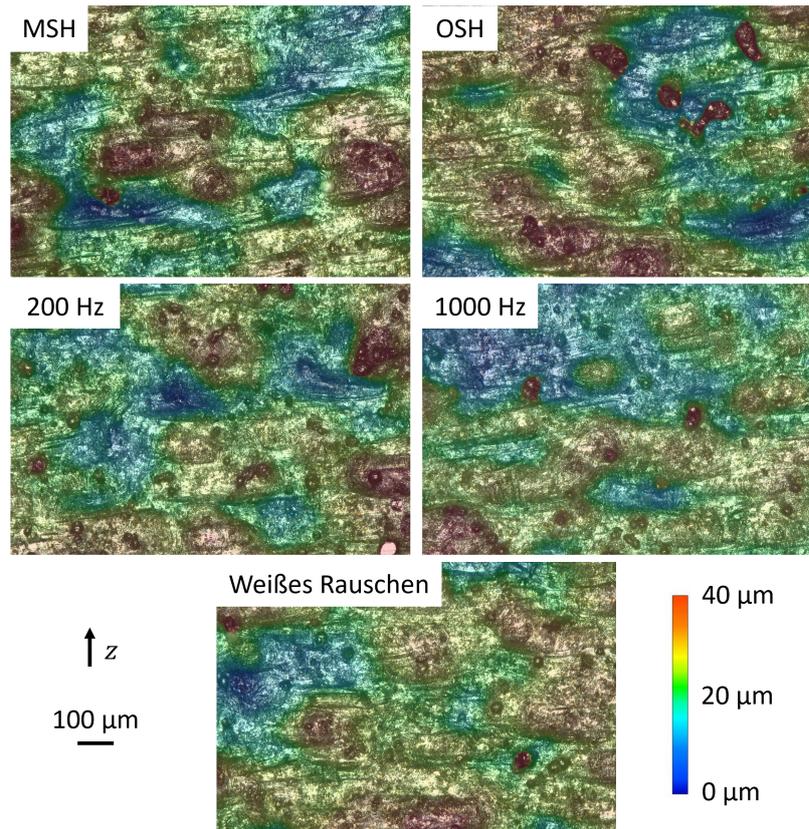


Abbildung 9.5: Topographien von 0° zur z-Richtung geneigten Flächen im Vergleich zwischen Standard- und Sono-L-PBF

Somit zeigen die Ergebnisse geschlossen auf, dass das *Oberflächenentwicklungsziel* erreicht ist.

### Gefügeentwicklung bei Beschallung

Wie Gedankenexperimente, analytische Näherungsrechnungen sowie die Literatur zu Sono-LMD nahelegen, vermag der Schall, die Kristallisation auch in der schnell erstarrenden Schmelze zu beeinflussen. Nach metallographischer Präparation wird je eine Probe jedes Beschallungsmodus am REM mittels EBSD untersucht, um Morphologie, Größenverteilungen und Vorzugsorientierungen zu untersuchen. Falschfarbenbilder in Abbildung 9.6 stellen die Orientierungen einzelner Körner dar. Schwarze Bereiche resultieren aus Datenlücken, bei denen die Messsoftware keine Indizierung erstellen können. Alle Indizierungsraten liegen mit  $> 70\%$  in einem angemessenen Bereich.

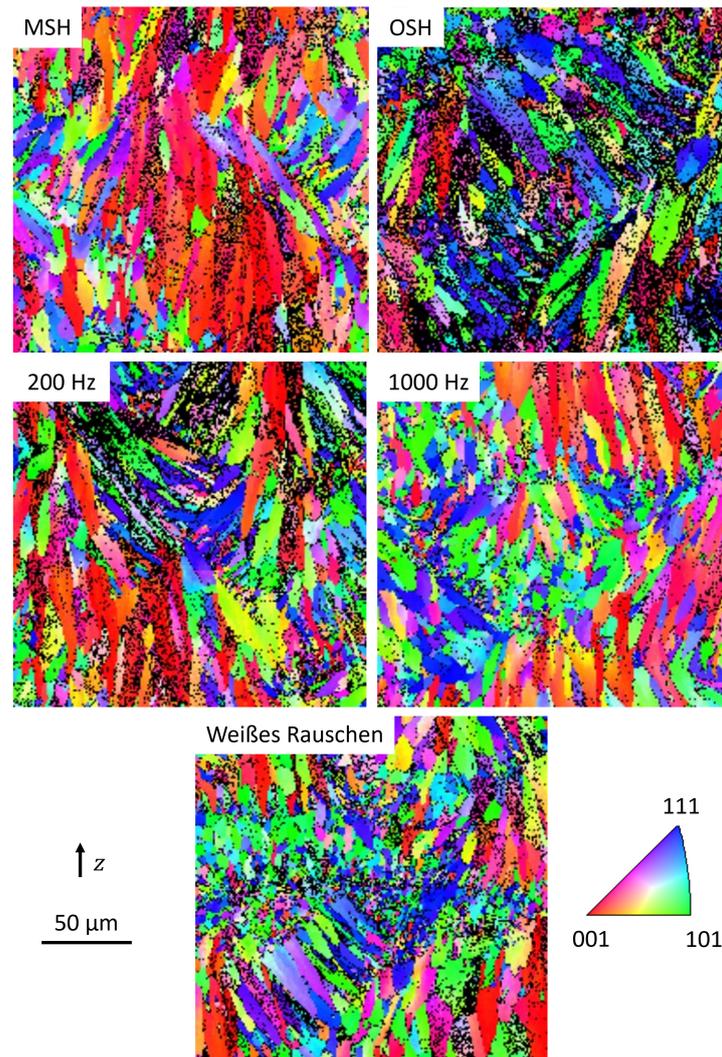


Abbildung 9.6: EBSD-Orientierungsbilder für verschiedene Standard- und Sono-L-PBF-Modi (Inverse Polfiguren bezüglich der y-Richtung)

Der Farbeindruck der EBSD-Karten lässt vermuten, dass bei Beschallung weniger ähnliche Orientierungen im Gefüge vorliegen. Zur Überprüfung dieser Vermutung dienen Polfiguren, die die Software ATEX [185] aus den EBSD-Rohdaten erstellt. Die berechneten Polfiguren stellen eine Anzahldicke von (100)-Polen einer stereographischen Projektion der auftretenden Orientierungen dar. Je stärker sich also darin regelmäßige Muster bilden und je intensiver Hotspots erscheinen, desto eher existiert eine Vorzugsorientierung im Gefüge.

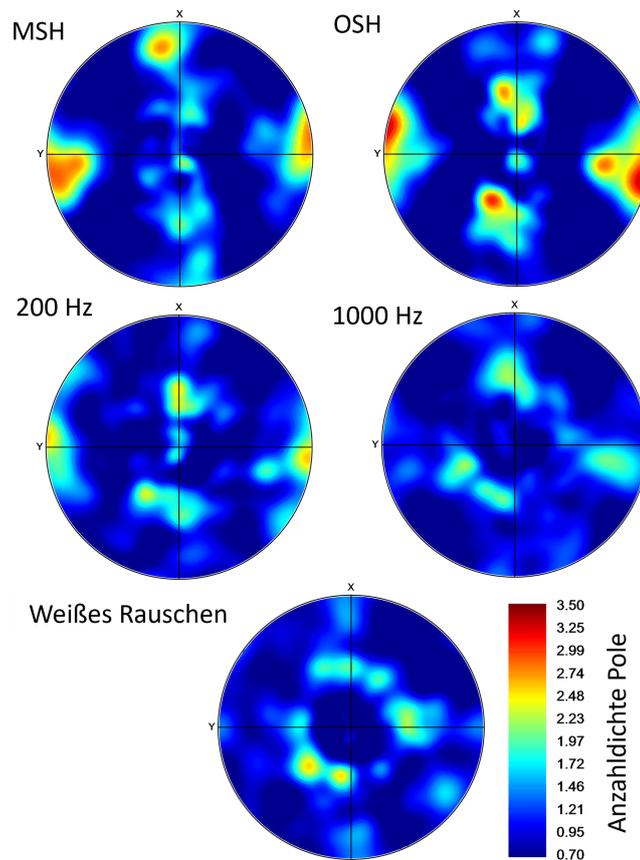


Abbildung 9.7: Polfiguren für verschiedene Standard- und Sono-L-PBF-Modi, berechnet aus gemessenen EBSD-Daten

Abbildung 9.7 verdeutlicht Unterschiede in den as-built-Gefügen zwischen beschallten und nicht beschallten Bauteilen. Bei MSH sowie OSH beinhalten die Polfiguren ein kreuzförmiges Muster, das sich bei 200 Hz Beschallung abschwächt und bei 1000 Hz sogar ganz verliert. Weißes Rauschen bringt scheinbar eine andere Form der Vorzugsorientierung hervor, da ein eher ringförmiges Muster in der Polfigur entsteht. Offenbar verringert Sono-L-PBF im Vergleich zum Standardverfahren Vorzugsorientierungen im Gefüge und damit Gefügeanisotropie, die sich in ebenso anisotropen mechanischen Eigenschaften ausdrückt.

Morphologie und Korngröße des Gefüges quantifizieren, in welchem Maße Sono-L-PBF Stengelkristallwachstum zurückdrängt oder, wie in den theoretischen Vorüberlegungen diskutiert, die Kristallisation durch eine höhere Keimbildungsrate unterstützt. Dazu überführt die Software EDAX OIM Analysis jede Orientierungskarte in eine Korn-ID-Karte, indem sie Datenlücken füllt und in starkem Farbkontrast benachbarte Körner unterscheidbar einfärbt. Im Gegensatz zur Orientierungskarte beinhalten die Falschfarben in der Korn-ID-Karte keine weiteren Informationen als die Unterscheidbarkeit. Im Anschluss berechnet die Software automatisch Häufigkeitsverteilungen von Korn-

flächen sowie Aspektverhältnissen. Analog zur Auswertung der Porosität dienen äquivalente Durchmesser zum Vergleich der mittleren Korngröße.

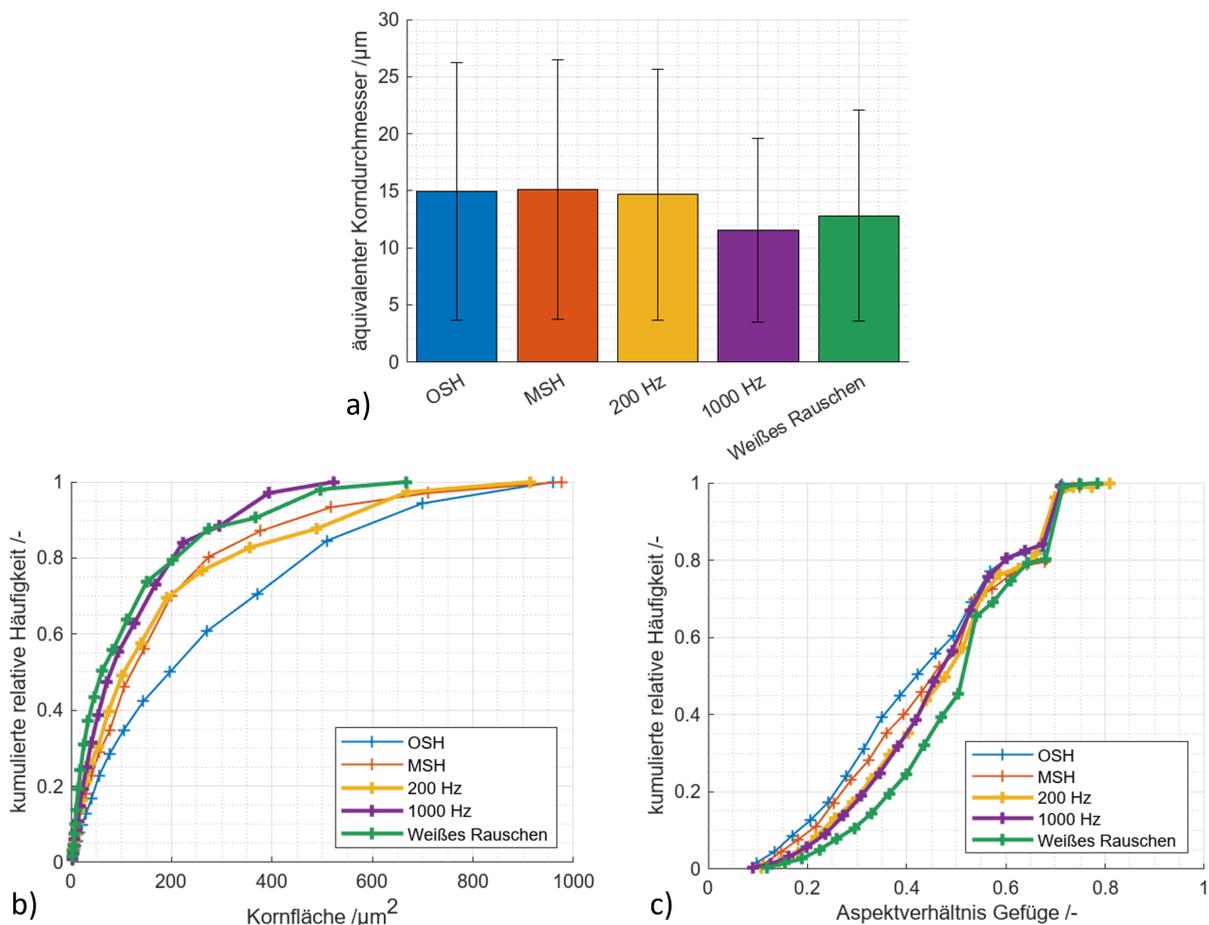


Abbildung 9.8: a) Mittlere äquivalente Korndurchmesser, b) Kornflächen sowie c) Aspektverhältnisse der Körner in Abhängigkeit des L-PBF-Modus

Daten aus Abbildung 9.8 offenbaren zum Teil deutliche Unterschiede in der Gefügeausbildung. Äquivalente Korndurchmesser der Standard-L-PBF-Modi, siehe Abbildung 9.8 a), unterscheiden sich weder voneinander noch von der Beschallung mit 200 Hz. Erneut kristallisiert sich eine enge Konkurrenz zwischen der Beschallung mit 1000 Hz und der mit weißem Rauschen heraus, wobei 1000 Hz in einem schmäleren Streubereich einen geringeren äquivalenten Korndurchmesser aufweist. Die Polygonzüge bezüglich der Kornflächen, siehe Abbildung 9.8 b), belegen ebenfalls die Kornfeinung durch Sono-L-PBF mit 1000 Hz und weißem Rauschen, denn beide Kurven steigen stärker an und beschreiben bereits bei kleineren Kornflächen alle Körner im Bildausschnitt als bei den übrigen Proben. Die Beschreibung von äquivalenten Korndurchmessern sowie von Kornflächen überlagern Morphologien im Gefüge und sorgen für große Standardabweichungen in den äquivalenten Durchmessern. Bereits die EBSD-Orientierungskarten aus Abbildung 9.6 haben den Eindruck vermittelt, dass es auch

bei Beschallung zum Stengelkristallwachstum kommt. Offenbar steigen die Polygonzüge bezüglich der Aspektverhältnisse, siehe Abbildung 9.8 c), im Gefüge für Sono-L-PBF erst später und dafür steiler an als für Standard-L-PBF. Diese Beobachtung trifft insbesondere auf weißes Rauschen zu. Tendenziell bewirkt die Beschallung, wie in Gedankenexperimenten vermutet, ein eher globulitisches Gefüge. Das Stengelkristallwachstum kann jedoch infolge steiler Temperaturgradienten von der Laserinzidenz zum Substrat nicht vollständig unterbunden werden. Wenn es in künftigen Studien gelingt, Beschallung mit Substratheizung zu kombinieren, flacht der Temperaturgradient ab und kann zusammen mit der Beschallung weiter die Aspektverhältnisse im Gefüge erhöhen. Zusammengefasst kann eine geeignete Beschallung die beim L-PBF entstehende Gefügeanisotropie abmildern, aber nicht vollkommen beseitigen. Auch wenn es noch Weiterentwicklungsbedarf gibt, kann für den ersten Sono-L-PBF-Aufbau das *Mikrostrukturentwicklungsziel* als erreicht angesehen werden.

## **9.2 Auswahl des für AlSi10Mg am besten geeigneten Beschallungsmodus**

Ergebnisse erster beschallter Baujobs bestätigen die Vermutungen aus Gedankenexperimenten, dass Sono-L-PBF gegenüber dem Standard zu Verbesserungen der Dichte, Oberfläche sowie Mikrostruktur führt. Dabei gleicht der Schall nicht nur Nachteile durch die fehlende Substratheizung aus, sondern verbessert Bauteileigenschaften gegenüber dem Standard-L-PBF mit Substratheizung (MSH). In enger Konkurrenz um den am besten geeigneten Beschallungsmodus - spezifisch für die Legierung AlSi10Mg - stehen die Einzelfrequenz von 1000 Hz und das breitbandige weiße Rauschen. Bei der Entscheidung für einen von beiden Modi soll Tabelle 9.2 helfen, die für einzelne, gleich gewichtete Bauteileigenschaften die beiden besten L-PBF-Modi anführt.

Tabelle 9.2: Tabellarische Zusammenfassung der am besten geeigneten Beschallungsmodi für hohe Bauteilqualitäten, Punktstände ergeben sich bei gleicher Gewichtung von 1 für den besten und 0,5 für den zweitbesten L-PBF-Modus

Kategorie	Qualitätsmerkmal	Bester Modus	Zweitbester Modus
Porosität	Archimedische Dichte	1000 Hz W. Rauschen	-
	Äq. Porendurchmesser	200 Hz	W. Rauschen
	Porenflächenverteilung	200 Hz	W. Rauschen
	Aspektverhältnis	W. Rauschen	MSH
Oberfläche	Mittlere Kernrauheit	W. Rauschen	1000 Hz
	Streuung Kernrauheit	W. Rauschen	MSH
	Partikelanhaftung	1000 Hz	W. Rauschen
Mikrostruktur	Vorzugsrichtung	1000 Hz	W. Rauschen
	Äq. Korndurchmesser	1000 Hz	W. Rauschen
	Kornflächenverteilung	1000 Hz	W. Rauschen
	Aspektverhältnis	W. Rauschen	1000 Hz

Modus	Sono-L-PBF			Standard-L-PBF	
	W. Rauschen	1000 Hz	200 Hz	MSH	OSH
Punktstand	8	6	2	1	0

Nach dieser Bewertung zeigt sich weißes Rauschen mit 8 von 12 möglichen Punkten als bester Beschallungsmodus über alle betrachteten Eigenschaften hinweg, gefolgt von 1000 Hz Einzelfrequenz. Beide übertreffen Standard-L-PBF deutlich. Diese Wahl der Beschallung gilt spezifisch für das System AlSi10Mg im vorgestellten Aufbau und erlaubt noch keine Übertragung auf andere Systeme oder Legierungen. Am ehesten hat jedoch weißes Rauschen das Potential, auch für andere Legierungen gute Bauteileigenschaften hervorzubringen, da viele Frequenzen gleicher Intensitäten wirken und so speziell verdichtende Frequenzen enthalten sind. Dann liegt es nur noch am Frequenzgang des Schallwandlers, ob die passenden Frequenzen mit ausreichender Energie ins Pulverbett und ins Bauteil einkoppeln können.

## 9.3 L-PBF-seitige Parametervariation

### Betrachtung der Energien im Prozess

Zur Überprüfung des Parameterentwicklungsziels soll eine vollfaktorielle DoE mit vier Faktoren auf zwei Stufen und je drei Proben pro Parametersatz dienen. Im Gegensatz

zum CCD, das beim Einfluss der Substratheizung Anwendung gefunden hat, bietet ein vollfaktorieller Plan eine bessere Möglichkeit zum Screening eines weiteren Bereiches bei gleichzeitig besserer statistischer Absicherung an, verliert durch die Zweistufigkeit aber die Auflösung von Nichtlinearitäten. Um herauszufinden, wie sich Schall über die gängigen Prozessparameter hinweg verhält und damit wechselwirkt, ist der vollfaktorielle Plan die geeignetere Wahl. Die vier Prozessparameter Pulverlagendicke  $h$ , Laserleistung  $P$ , Scangeschwindigkeit  $v$  und Spurabstand  $d$  haben einen großen Einfluss auf die Bauteilqualitäten [161] und werden üblicherweise in Publikationen zur Beschreibung eines Parametersatzes angeführt. Alle gewählten Werte, siehe Tabelle 9.3, entstammen Studien, die diese Einstellungen genutzt und als zielführend beschrieben haben [92, 186–188] und entsprechen Auszügen aus den in Magics [30] hinterlegten Standardparametersätzen für AlSi10Mg von Nikon SLM Solutions.

Tabelle 9.3: Dekodierung der genutzten Parametersätze zum Screening des umgerüsteten Aufbaus

<b>Faktorstufe</b>	<b>–</b>	<b>+</b>
Pulverlagendicke $h / \mu\text{m}$	30	50
Laserleistung $P / \text{W}$	250	350
Scangeschwindigkeit $v / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	1000	1650
Spurabstand $d / \text{mm}$	0,06	0,13

Mit auf 17 mm Kantenlänge reskalierten Würfelproben können drei Proben je Baujob verschiedenen Substratpositionen zugewiesen werden. Dabei gilt die Restriktion, dass einerseits niemals mehrere Proben eines Parametersatzes in demselben Baujob und andererseits nie mehrere Proben eines Parametersatzes an derselben Substratposition in mehreren Baujobs sitzen dürfen. Abbildung 9.9 stellt die möglichen Substratpositionen schematisch dar. Probennummerierungen werden an den Seitenflächen der Teile ebenfalls additiv gefertigt, sodass die Ausrichtung der Teile auf dem Substrat in Kombination mit ihrer Position nachvollziehbar bleibt.

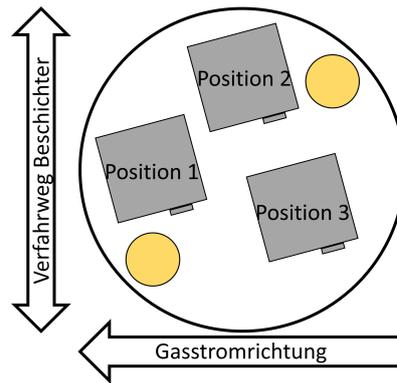


Abbildung 9.9: Schematische Darstellung zur Anordnung und Ausrichtung der Würfelproben auf dem Sono-L-PBF-Substrat; kleine graue Kästen am Rand der Proben symbolisieren die mitgefertigte Probennummerierung

Bei der Durchführung der angedachten 16 Baujobs treten Havarien von Schallwandlern auf. Es liegt die Vermutung nahe, dass mehrere Baujobs hintereinander den Wandler thermisch schädigen, da sich dessen Gehäuse stark deformiert und Wellen schlägt. Es gibt aber Baujobs aus dem Versuchsplan, die alleine in der Lage sind, den zu Beginn kalten Wandler thermisch zu zerstören. Offenbar existiert ein Grenzwert an Energie, den der Laser nominell einbringen darf, damit ein Baujob erfolgreich zum Ende kommt und der Wandler danach noch voll funktionsfähig ist. Die energetische Betrachtung besteht aus einer groben Abschätzung aus den gewählten Prozessparametern der Bauteile. Wie im Stand der Forschung beschrieben, gilt für die Volumenenergie-dichte  $E_V = \frac{P}{R_{b,th}} = \frac{P}{h \cdot v \cdot d}$ . Alle 16 gewählten Parametersätze unterscheiden sich darin. Mit drei Proben in einem Baujob folgt die Gesamtenergie zu Gleichung 9.2, wobei alle Probenvolumina  $V_i = (17 \text{ mm})^3$  entsprechen und Stützstrukturen vernachlässigt werden.

$$E_{Bau} = \sum_{i=1}^3 E_{V,i} V_i \quad (9.2)$$

Erfolgreiche Baujobs weisen eine abgeschätzte Gesamtenergie von ca. 759 kJ auf, die Energie des Baujobs mit Wandlerhavarie beträgt ca. 1143 kJ. Die Grenze zwischen reibungslosem Betrieb und Funktionsverlust liegt also dazwischen. Analog dazu ergeben sich die zur Havarie führenden Temperaturen im Wandler gemäß der Rechnung in Anhang D im Bereich zwischen 94°C und 127°C.

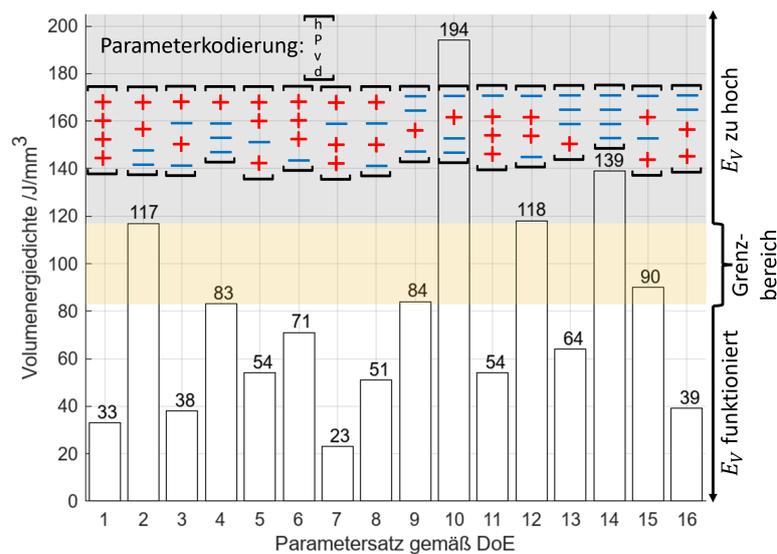


Abbildung 9.10: Volumenenergiedichte der genutzten Parametersätze inklusive Kodierung und Einteilung nach Funktionsfähigkeit im Sono-L-PBF

Offenbar limitiert eine Grenze an eingebrachter Gesamtenergie die einstellbaren Prozessparameter im Vergleich zum Standard-L-PBF nach oben, zumindest bis ein temperaturbeständiger Aufbau vorliegt. Dieser Umstand disqualifiziert Parametersätze hoher Energiedichte, da das maximal herstellbare Bauteilvolumen zu schnell ausgeschöpft ist. Deshalb sollten die Parametersätze der höchsten Volumenenergiedichten, siehe grauer Bereich in Abbildung 9.10, aufgrund großer Versagensgefahr des Wandlers und mangelnder Anwendungsrelevanz entfallen. Das betrifft mit den Parametersätzen 2 ( $+++--$ ;  $E_V \approx 117 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ), 10 ( $+++--$ ;  $E_V \approx 194 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ), 12 ( $+++--$ ;  $E_V \approx 118 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ) und 14 ( $+++--$ ;  $E_V \approx 139 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ) fast ausschließlich die geringere Pulverlagendicke, die zum Aufbau der Höhe mehr Schichten und damit mehr Laserüberfahrten benötigt. Damit reduziert sich die Anzahl der Parametersätze von 16 auf 12 und die Anzahl der Proben inklusive Wiederholungsversuche von 48 auf 36. Dadurch verliert der Versuchsplan seinen vollfaktoriellen Charakter. Umgerechnet auf eine Reduktionsstufe zur Angabe des Auflösungsverlustes zwischen voll- und teilfaktoriellen Versuchsplänen folgt diese zu 0,42. Das bedeutet eine Auflösung des Versuchsplans zwischen vollfaktoriell (Auflösungskategorie V+) und teilfaktoriell der ersten Stufe (Auflösungskategorie V) [149, 189], sodass keine nennenswerten Verluste in der Beschreibbarkeit der Effekte auftreten.

### Betrachtung von Faktor- und Wechselwirkungseffekten

Eine Berechnung von Faktoreffekten der Beschallung mit weißem Rauschen bei ca. 3,5 W Schallleistung auf die relative Dichte und Kernrauheitswerte erfolgt sowohl bezüglich der jeweiligen Mittelwerte als auch bezüglich der Standardabweichungen. Die

genaue Aufschlüsselung nach Rauheitskenngrößen aller Messpositionen und -richtungen bietet Anhang E. Hier soll die Betrachtung der relativen Dichte und des Mittelwerts der Spitzenkernrauheit  $R_{pk}$  über alle Messstellen und -richtungen hinweg als Zielgrößen genügen. Daraus ergibt sich ein klareres Bild, ob die Beschallung die Eigenschaften verbessert. Faktoreffekte der Beschallung auf beide Zielgrößen beinhalten eine starke Mittlung über alle variierten Faktoren des L-PBF hinweg und bieten deshalb wenig Trennschärfe für die Identifikation passender Parameter. Außerdem werden hier Positionseinflüsse vernachlässigt. Gesonderte Auswertungen hierzu zeigen jedoch keinerlei Einfluss, obwohl das Pulver gemäß Abbildung 8.3 einer räumlichen Verdichtungsverteilung unterliegt.

Die Faktoreffekte der Beschallung auf die relative Dichte beträgt  $-0,3\%$ , der auf die Spitzenkernrauheit  $-1,9 \mu\text{m}$ . Das heißt, durchschnittlich reduziert Beschallung sowohl die Rauheit als auch die relative Dichte. Oberflächenqualitäten steigen durch abnehmende Partikelanhaftung im Rahmen der Beschallung, was in Einklang mit den ersten Ergebnissen der Auswahl des Beschallungsmodus steht. Dem entgegen steht die offensichtliche Erhöhung von Porosität durch Sono-L-PBF. Hier muss eine nähere Betrachtung einzelner Parametersätze klären, welche Parameterkonstellationen sich für die Beschallung eignen. Gleichzeitig muss es wie Abbildung 9.11 zeigt starke Wechselwirkungseffekte geben, die eine Abweichung von der Richtung des Faktoreffektes ermöglichen.

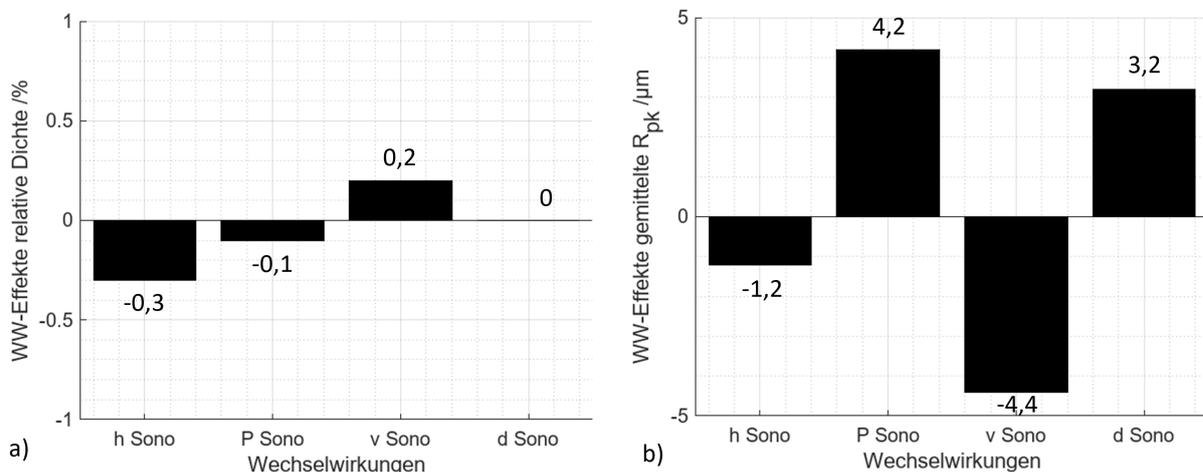


Abbildung 9.11: Wechselwirkungseffekte der variierten L-PBF-Parameter Pulverlagendicke  $h$ , Laserleistung  $P$ , Scangeschwindigkeit  $v$  und Spurbabstand  $d$  mit Beschallung durch weißes Rauschen auf a) relative Dichten und b) über alle Messpositionen und -richtungen gemittelte  $R_{pk}$

Tatsächlich ähneln die Wechselwirkungen im Vergleich den genannten Faktoreffekten oder fallen größer aus. Daraus lässt sich ableiten, in welche Richtung welcher Parameter geändert werden sollte, um höhere Dichten oder niedrigere Rauheiten zu erreichen.

Wie schon Parameterstudien ohne Beschallung [190] gezeigt haben, senkt eine niedrige Pulverlagendicke Rauheiten. Beim Sono-L-PBF sinkt jedoch gleichzeitig die Dichte, weil sich Verdichtungseffekte stärker bei größeren Schüttvolumina von Pulver auswirken. Aus solchen Feststellungen ergeben sich variable Stellschrauben zur weiteren Parameteroptimierung, wobei auch Wechselwirkungen zwischen den L-PBF-Parametern nicht vernachlässigt werden sollten. Nicht zuletzt begrenzen kollektive Parameter wie die Volumenenergiedichte oder die theoretische Baurate das Parameterfeld, um Wandlervariationen vorzubeugen.

### Betrachtung kollektiver Parameter

Die kollektiven Parameter Volumenenergiedichte und theoretische Baurate erlauben Differenzkurven, die für jeden Parametersatz die Entwicklung beider Zielgrößen im Vergleich zum Modus MSH darstellen, siehe Abbildung 9.12. Anhang E enthält die direkten Kurven im Vergleich.

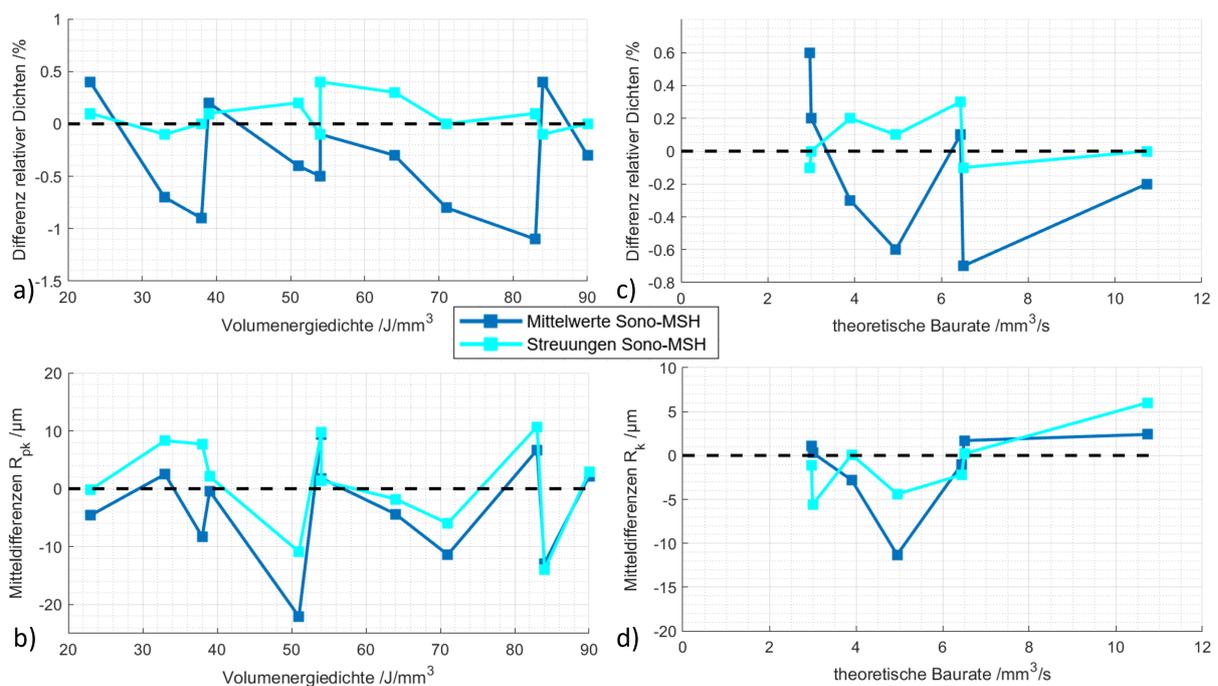


Abbildung 9.12: Differenzkurven der Mittelwerte und Streuungen einzelner Parametersätze im Vergleich MSH mit Beschallung durch weißes Rauschen, a)-b) Auftragung über der Volumenenergiedichte und c)-d) Auftragung über der theoretischen Baurate für beide Zielgrößen

Aufgrund der komplexen und ineffizienten Nachverdichtung fertiger Bauteile hat der als bester identifizierte Parametersatz dieser DoE zwingend eine höhere Dichte als sein Pendant im Modus MSH, verbunden mit einem Datenpunkt  $> 0$ . Die in der Analyse der Beschallungsmodi auf 100% gemessene relative Dichte von Parametersatz

16 ( $--++$ ;  $E_V \approx 39 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ) wird hier nicht erreicht, da hier mehrere Proben dieses Parametersatzes bereits Streuung einbringen. Der beste Parametersatz des Versuchsplans zeichnet sich durch möglichst hohe relative Dichte auch im Vergleich zum MSH-Pendant bei gleichzeitig möglichst geringer Oberflächenrauheit aus. Dabei liegen mehrere Parametersätze mit Pulverlagendicke  $h = 30 \mu\text{m}$  nah beieinander. Parametersatz 9 ( $--+-$ ;  $E_V \approx 84 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ ) wird aufgrund ähnlicher Rauheiten bei der höchsten erzielten Dichte als bester Kompromiss zwischen relativer Dichte und Oberflächenqualität angesehen, da dieser für beide Zielgrößen die Qualität der MSH-Proben übertrifft. So ist bezüglich Oberfläche und Dichte das *Parameterentwicklungsziel* erreicht.

### Betrachtung der geometrischen Genauigkeit

Es stellt sich die Frage nach der geometrischen Genauigkeit einiger Merkmale hinsichtlich Form, Maß und Lage, da der Schall belichtete Stellen permanent bewegt. Einen ersten Überblick bietet die Untersuchung jeweils dreier Probenkörper gemäß Abbildung 5.6 b) für die folgenden Herstellungsbedingungen, die die jeweils besten Parametersätze von Sono- und Standard-L-PBF berücksichtigen sowie das Pendant des besten Sono-Parametersatzes im Modus MSH:

- Weißes Rauschen bei 3,5 W mit L-PBF-Parametersatz 9 ( $--+-$ )
- MSH mit L-PBF-Parametersatz 9 ( $--+-$ )
- MSH mit L-PBF-Parametersatz 16 ( $--++$ )

Tabelle 9.4 stellt die Messergebnisse des Koordinatenmessgerätes zusammengefasst dar. Messdaten aus zwei Richtungen in der Beschichtungsebene werden gemeinsam betrachtet, sodass die angegebenen Werte von je drei Proben aus drei oder sechs Werten bestehen.

Tabelle 9.4: Mittlere Geometrieabweichungen vom Soll für die genannten (Sono-)L-PBF-Modi

<b>Geometrie- abweichung</b>	<b>Position</b>	<b>W. Rauschen PS 9</b>	<b>MSH PS 9</b>	<b>MSH PS 16</b>
Lage Zylinder /mm	Beschichtungs- ebene	$-0,073 \pm 0,070$	$-0,042 \pm 0,014$	$-0,061 \pm 0,014$
	Baurichtung	$-0,016 \pm 0,094$	$-0,030 \pm 0,020$	$-0,016 \pm 0,018$
Durchmesser Zylinder /mm	Beschichtungs- ebene	$0,007 \pm 0,005$	$0,009 \pm 0,019$	$0,025 \pm 0,017$
	Baurichtung	$0,004 \pm 0,005$	$0,057 \pm 0,007$	$0,066 \pm 0,008$
Rundheit Zylinder /mm	Baurichtung	$0,049 \pm 0,008$	$0,073 \pm 0,046$	$0,045 \pm 0,004$
Kantenmaß Würfel /mm	Beschichtungs- ebene	$-0,066 \pm 0,013$	$-0,073 \pm 0,018$	$-0,108 \pm 0,017$
	Baurichtung	$0,040 \pm 0,004$	$-0,107 \pm 0,103$	$-0,023 \pm 0,004$
Parallelität Würfel /mm	Beschichtungs- ebene	$0,015 \pm 0,016$	$0,044 \pm 0,077$	$0,007 \pm 0,005$
	Baurichtung	$0,046 \pm 0,017$	$0,127 \pm 0,096$	$0,018 \pm 0,009$

Bis auf die Lagegenauigkeit des zylindrischen Loches, dessen Achse in der Beschichtungsebene liegt, übertreffen die Proben des Sono-L-PBF ihr MSH-Pendant in allen betrachteten Charakteristika von Form, Maß und Lage. Das beweist den ausreichenden Auftrag von Pulver zur Herstellung eines verdichteten Pulverbetts, sodass bei Beschallung nicht nur augenscheinlich sondern tatsächlich die nominelle Schichtdicke der realen entspricht. Im Vergleich zum besten Parametersatz des Modus MSH, ausgewählt anhand von Rauheit und Dichte, zeigt sich ein durchwachsenes Bild. Durchmesser in der Beschichtungsebene und in Baurichtung sowie Kantenmaße in der Beschichtungsebene fallen bei beschallten Proben genauer aus als beim besten MSH-Parametersatz 16. Bei der Lage des zylindrischen Loches in der Beschichtungsebene und bei Parallelitäten von Kanten übertrifft MSH PS 16 jedoch die beschallten Proben knapp, wobei bei den beschallten Teilen die Streuung vergleichsweise groß ist.

Offenbar können Schallschwingungen bei geeigneter Parametereinstellung die geometrische Genauigkeit erhöhen, was durchaus für eine erhöhte Stützwirkung des Pulverbetts spricht. Inwieweit die Schwingungen selbst zu Abweichungen an verschiedenen Stellen führen, können die hier vorgestellten Daten nicht klären. Wahrscheinlich überlagert sich ein etwaiger Effekt der Schwingungen mit dem Schiefstand des Substrates durch den manuellen Zusammenbau des BV-Stempels. Dieser lässt sich nie komplett eliminieren, aber verstärkt sich mit zunehmender Anzahl von Sono-L-PBF-Baujobs,

bis entweder die Klebung oder der Wandler inklusive Klebung erneuert werden muss. In der Gesamtschau der betrachteten Geometrie Größen kann ein angepasster Sono-L-PBF-Parametersatz Teile produzieren, die bezüglich geometrischer Genauigkeit mit Standard-L-PBF-Teilen mithalten können und diese teilweise sogar übertreffen. Trotzdem kann auch der Schall herstellungsbedingte Formfehler durch beispielsweise den Treppenstufeneffekt oder den Schichtaufbau nicht komplett beseitigen.

Es hat sich also gezeigt, dass weißes Rauschen von ca. 3,5 W Schalleistung in Verbindung mit dem Parametersatz 9 gleiche bis bessere Bauteileigenschaften hervorbringt als die betrachteten Parametersätze beim Standard-L-PBF im Modus MSH. Das bestätigt die Erreichung des *Parameterentwicklungsziels*, da nun ein geeigneter Sono-L-PBF-Parametersatz existiert, der als Ausgangspunkt für weitere Parameteroptimierungen dienen kann.

### Betrachtung von Formfehlern beim Sono-L-PBF

Wie aus Kapitel 6.1.1 hervorgeht, kann ein verdichtetes Pulverbett eine höhere Stützwirkung als ein unverdichtetes erzielen und so Verzüge reduzieren. Das hat die geringere Ausbildung des Downskin-Effektes an Fächerproben zunächst bestätigt. Dennoch treten verschiedene Formfehler gemäß Abbildung 9.13 auf, die in keinem Zusammenhang mit dem jeweiligen Parametersatz stehen. Solche Fehler sind aus dem Standard-L-PBF nicht bekannt. Das Auftreten der Fehler beim Sono-L-PBF verteilt sich über die Substratpositionen und konzentriert sich häufig auf ganze Baujobs.

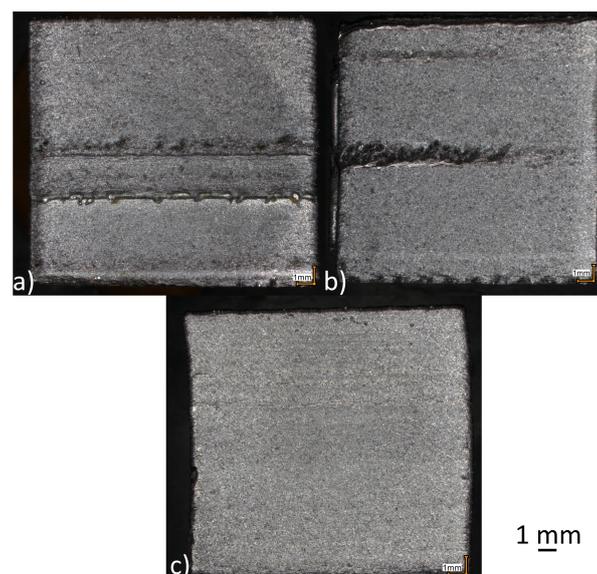


Abbildung 9.13: Baujobbedingte Formfehler bei Sono-L-PBF-Teilen a) Streifen, b) schiefe Ecke oben links und unvollständige Fügung sowie c) Wölbung

Im Folgenden heißen Fehler gemäß Abbildung 9.13 a) Streifen. Abbildung 9.13 b) zeigt am oberen linken Bildrand eine schiefe Ecke sowie eine unvollständige Fügung auf halber Höhe am linken Bildrand, die einem Lack of Fusion bei zu niedrigen Energiedichten ähnelt. Abbildung 9.13 c) zeigt eine gewölbte Probe. Insgesamt sind die Hälfte aller Teile (18 von 36) mit mindestens einem dieser Formfehler belastet. Eine Auswertung bezüglich Faktoreffekten, Wechselwirkungen und kollektiven Parametern ohne die Fehlerteile ergibt keinen Unterschied zu den präsentierten Ergebnissen. Die Fehlertypen verteilen sich gemäß Tabelle 9.5 auf die in Abbildung 9.9 definierten Substratpositionen.

Tabelle 9.5: Verteilung der beobachteten Formfehler des Sono-L-PBF auf die Substratpositionen

	<b>Position 1</b>	<b>Position 2</b>	<b>Position 3</b>
Streifen	4	5	2
unvollständige Fügung	1	0	2
Schiefe Ecke	0	0	4
Wölbung	0	1 mit Streifen	1 mit unvollst. Fügung
Summe Fehlerteile	5	5	8
Teile insgesamt	12	12	12

Die Aufnahmen des Layer Control Systems der Maschine in Abbildung 9.14 erlauben in fast allen Fällen Fehlerdiagnosen, die auf den Prototypenstatus von Sono-L-PBF zurückgehen. Die Probleme liegen in Mängeln beim Schichtauftrag begründet. Relevante LCS-Aufnahmen finden sich bei den Schichtanzahlen, die zu den Aufbauhöhen der Defektpositionen passen.

Streifen entstehen bei Aufnahmen wie in Abbildung 9.14 a) und b) durch unzureichenden Schichtauftrag. Deshalb belichtet der Laser inhomogene Pulverlagen oder bereits verschmolzene Bereiche. So muss die Probe mehr Wärme aufnehmen als bei Belichtung einer geschlossenen Pulveroberfläche und verformt sich deshalb in der Folge. Nach 10-20 Schichten heilt dieser Effekt aus und der Prozess läuft störungs- und verformungsfrei weiter. Unzureichende Pulverbeschichtung durch Pulverundichtigkeiten können unvollständige Fügungen oder schiefe Ecken hervorrufen. Der Beschichter trägt in zwei Richtungen auf. Wenn jedoch wie in Abbildung 9.14 c) und e) lokal das Pulverbett absackt, fällt der Pulvervorrat des Beschichters auf dem Weg vom unteren zum oberen Bildrand an diesen Stellen in die entstandenen Lücken und die Bauteile

bleiben lokal unbedeckt. Je nach Bedeckungsdefizit bildet sich bei vielfachen Belichtungen derselben Bereiche, die zunehmend aus dem Laserfokus geraten, entweder eine unvollständige Fügung oder eine schiefe Ecke. Außerdem kann ein initial ungleichmäßiges Pulverbett eine Heftung von Stützstrukturen am Substrat verhindern. Die manuelle Montage des BV-Stempels bringt Schiefstand um wenige Grad mit sich, reicht aber schon aus, um einen Gradienten in der Pulverlagendicke, siehe Abbildung 9.14 d), zu erzeugen. Bauteilen, die auf dem dicken initialen Pulverbett gebaut werden, fehlt dann die Anbindung ans Substrat sowie der Wärmetransport durch die Stützstrukturen dort hin.

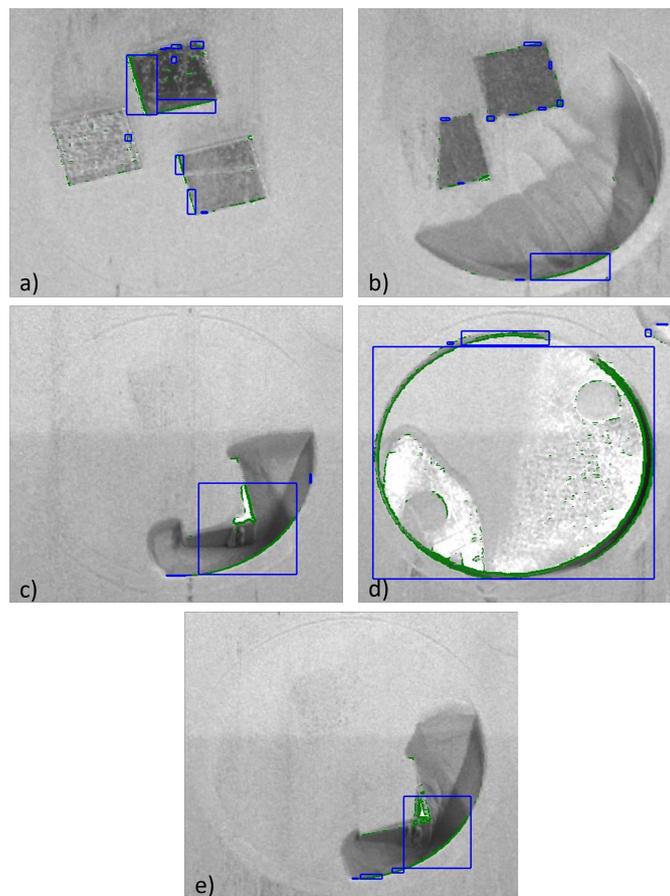


Abbildung 9.14: Repräsentative LCS-Aufnahmen von Aufbauhöhen, in denen Formfehler auftreten; a)-b) Streifen, c)-d) unvollständige Fügung und e) schiefe Ecke; grüne und blaue Markierungen setzt die Software an erkannte Fehler

Die LCS-Aufnahmen erklären noch nicht die Entstehung von gewölbten Proben. Beide beobachteten Fälle entstammen demselben Baujob. Beide Proben wölben sich in dieselbe Richtung. Der Aufbau des BV-Stempels unterliegt über mehrere Baujobs hinweg Setzungseffekten sowie einem zunehmend starken Schiefstand des gesamten Aufbaus. Gründe dafür sind nachgiebige Klebungen und thermischer Verzug des polymeren Wandlergehäuses. In diesem Fall hätte der prototypische Aufbau bereits aufge-

arbeiten werden müssen, um eine Verkippung der Substrates während des Prozesses und damit die Bildung der Wölbung zu vermeiden.

## 9.4 Bewertung des umgerüsteten Sono-L-PBF-Systems

Mit dem hier dokumentierten Aufbau liegt ein qualifizierter Prototyp des Sono-L-PBF vor. Im Rahmen der Parameterstudie mit einem erhöhten Aufkommen an Baujobs stellt sich heraus, dass mehrere Baujobs hintereinander möglich sind und bei geeigneten Energien  $E_{Bau}$  der Aufbau keinen Schaden nimmt. Damit haben sich bislang maximal vier Baujobs an einem Arbeitstag hintereinander durchführen lassen. Während der Maschinenrüstung haben Aluminiumplatten dem BV-Stempel und dem BV-Rahmen die Wärme des vorangegangenen Prozesses entzogen.

Die Bauteilqualitäten zeigen trotz des Wegfalls der Substrateheizung Verbesserungen gegenüber dem Standard-L-PBF im Modus MSH bezüglich Porosität, Oberflächenqualität, Mikrostruktur und geometrischer Genauigkeit. Dennoch treten in Baujobs unregelmäßig Artefakte durch Formfehler auf, die es in der Weiterentwicklung zu adressieren gilt. Ein für Maschine und Personal sicherer Betrieb ist schon in diesem frühen Entwicklungsstadium möglich und bietet durch die positiven Effekte auf die Bauteilqualität eine geeignete Plattform, das System weiterzuentwickeln. Im aktuellen Aufbau können kleine Bauteile mit höherer Qualität als bisher aus dem Standard-L-PBF bekannt hergestellt werden und das mit bedeutend niedrigeren Schalleistungen als im SonoLMD aus der Literatur. In dieser Arbeit liegt eine effektive Schalleistung bei ca. 3,5 W bei weißem Rauschen, in der Literatur bei 125 W [59] oder bis zu 1000 W [129] im Ultraschallbereich. Diese Leistungsreduktion bedarf weniger zusätzlicher Energie für eine Qualitätssteigerung von AM-Bauteilen in dem hier präsentierten Aufbau im Vergleich zur Literatur. Diese Effizienzsteigerung verliert voraussichtlich an Gewicht, wenn größere Bauteile im Sono-L-PBF hergestellt werden sollen, denn dafür müssen größere Schalleistungen den Prozess unterstützen.

Bislang ermöglicht der Aufbau also die Herstellung kleinvolumiger Bauteile höherer Qualität. Jenseits der Wandlerhavarien, die beim Ausloten von Prozessfenstern auftreten, ist die Haltbarkeit über mehrere Baujobs hinweg noch limitiert. Gerade der Schallwandler und die Klebestellen in dessen Umfeld stellen Schwachstellen des Aufbaus dar und begrenzen die Lebensdauer eines Aufbaus auf ca. 10 Baujobs. Mit Wandlern, die auf diese Anwendung ausgelegt sind hinsichtlich Temperaturbeständigkeit und Integrierbarkeit, lassen sich voraussichtlich zuverlässigere Sono-L-PBF-Systeme herstellen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Als Motivation der Arbeit haben mangelnde Bauteilqualitäten des L-PBF gedient, die eine industrielle Anwendung insbesondere für sicherheitsrelevante Komponenten erschweren. Das drückt sich in Form von unvermeidbarer Porosität, rauen Oberflächen, gerichteten Gefügen sowie mangelhafter Maßhaltigkeit aus. Nachbearbeitungsverfahren können insbesondere bei komplexen Geometrien nur sehr bedingt diese Nachteile beheben. Die Eigenschaften wirken zum Teil negativ auf das quasistatische sowie zyklische mechanische Verhalten und fördern so ein vorzeitiges Bauteilversagen. Als mögliche Lösung präsentiert die Literatur beim Laserauftragsschweißen von großvolumigen Bauteilen eine Beschallung mit hochintensivem Ultraschall, sodass sich Übertragung auf L-PBF von kleineren, filigranen Komponenten anbietet. Dahinter steht die Idee, mit Schallenergie im Herstellungsprozess Zeit und Energie in der Nachbearbeitung einzusparen und die genannten Nachteile auszugleichen. Beim L-PBF soll der Schall durch die ins System eingebrachte Energie sowie die eingebrachte Oszillation wirken. Im Gegensatz zum Laserauftragsschweißen kann die Beschallung beim L-PBF nicht nur den entstehenden Festkörper und Schmelzbäder beeinflussen sondern auch das Pulverbett verdichten.

Zur Umrüstung einer L-PBF-Maschine SLM125 von Nikon SLM Solutions AG auf Sono-L-PBF hat es mehrere Entwicklungsschritte gebraucht, die sich gegenseitig bedingen und grundlegende Experimente außerhalb des Standes der Forschung erfordern. Es ist wohl bekannt, dass Pulver um ihr Hausner-Verhältnis  $> 1$  verdichten können, aber das Verhalten einer Pulverschüttung unter Schalleinfluss ist erst in dieser Arbeit ergründet worden. Solche Erkenntnisse helfen bei der Beantwortung der Frage, ob sich wie beim beschallten Laserauftragsschweißen hochintensiver Ultraschall oder doch weniger intensiver Hörschall für Sono-L-PBF eignen. Dazu gibt es mehrere Pulvercharakterisierungsmethoden, die zum Teil standardmäßig der Qualitätssicherung dienen, und Aufschluss über das Einsatzverhalten geben. Als unkonventionelle Messung führt diese Arbeit die Partikeldämpfung an, die für jeden Pulverwerkstoff einmal durchgeführt werden muss, um relevante Frequenz- und Beschleunigungsbereiche der Beschallung zu identifizieren.

Die Umrüstung der L-PBF-Maschine auf Sono-L-PBF hat vielfältige konstruktive Herausforderungen gestellt. Die Entwicklungen beschränken sich auf die Bauraumver-

kleinerung und müssen daher auf den Einsatz der Substratheizung verzichten. Zunächst muss ein geeigneter Schallwandler eine hinreichende Temperaturbeständigkeit sowie eine gekapselte Bauweise aufweisen, damit die aus dem Schmelzbad abgeführte Wärme nicht zur Havarie führt und damit Pulver nicht ins Innere eindringt, wo es zu Kurzschlüssen in der Elektronik führt. Je geringer die Schallleistung des Wandlers ausfallen darf, um immer noch Effekte hervorzurufen, umso einfacher gestaltet sich die Auslegung der Steuerungselektronik. Hier kommen kommerziell erhältliche Komponenten aus der Beschallungstechnik zum Einsatz. Deren maximale Leistungsabgabe liegt deutlich höher als der Wandler aufnehmen kann. Die Kabelführung zwischen Steuerung und Wandler verläuft gasdicht in den Bauraum hinein. In dessen Innern stört sie weder den Gasstrom über das Pulverbett noch die Beschichterbewegung zum Pulverauftrag. Der Stempel der Bauraumverkleinerung führt die Kabel zum Wandler durch sein Inneres, um nach außen Pulverdichtigkeit herzustellen. Er ist so aufgebaut, dass nur ein kleiner Bruchteil des Schalls in die Maschine einkoppelt und der Großteil Effekte in Pulverbett und Schmelze hervorruft.

Qualifizierende Baujobs mit Sono-L-PBF validieren die Funktionsfähigkeit der Umrüstung und die Passfähigkeit der zuvor identifizierten Beschallungsmodi. Als Kriterien dienen dabei die relative Dichte, die die Porosität repräsentiert, sowie die Spitzenkernrauheit, die ein Maß für Partikelanhaftung darstellt. Exemplarische Gefügeuntersuchungen zielen auf die Veränderung von mikrostrukturellen Anisotropien ab. Nach einer Parametervariation über weite Bereiche hinweg kristallisiert sich ein für Sono-L-PBF geeigneter Parametersatz heraus. Die geometrische Genauigkeit bezüglich Form, Maß und Lage so hergestellter Teile steht dann im Vergleich zu Standard-L-PBF-Teilen.

Die Entwicklungen dieser Arbeit haben einen funktionsfähigen Aufbau zum Sono-L-PBF hervorgebracht. Dieser Aufbau hat bislang Probenkörper mit erhöhter Bauteilqualität produziert. Zu den wichtigsten Ergebnissen zählt:

- Messungen von Pulverfeuchte, Fließfähigkeit, Schüttdichte, Partikeldämpfung und schallbedingter Verdichtung bilden eine vollständige Charakterisierung zur Qualifikation eines Pulverwerkstoffes für Sono-L-PBF.
- Hörschall im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20000 Hz eignet sich besser zur Beschallung als Ultraschall mit Frequenzen größer 20000 Hz, da hier bei geringer Leistung eine höhere Auslenkung das Pulverbett verdichtet. Das reduziert Energiebedarfe des Sono-L-PBF und senkt Anforderungen an Schallwandler und Steuerungselektronik.
- Der Betrieb von Sono-L-PBF gefährdet weder die Sicherheit von Menschen noch die von der L-PBF-Maschine.

- Mit einem geeigneten Parametersatz erhöht Sono-L-PBF die Dichte auf 99,9% bis 100% relativer Dichte und kann Porosität fast vollständig eliminieren. CT-Aufnahmen und metallographische Schlitze bestätigen die zahlenmäßig starke Reduktion von Poren und eine gleichzeitige Feinung sowie Verrundung der Restporen.
- Oberflächen an beschallt hergestellten Teilen entstehen sichtbar glatter. Taktile und mikroskopische Rauheitsbetrachtungen bestätigen diese Beobachtung. Insbesondere in Downskinbereichen reduziert Schall die Anhaftung von nicht aufgeschmolzenen Partikeln am Bauteil. Auch Kernbereiche der Rauheitsprofile ebnen sich teilweise ein.
- Sono-L-PBF bewirkt nachweislich Kornfeinung im Vergleich zum Standard-L-PBF und hebt prozessbedingte Vorzugsorientierungen im Gefüge auf. Das kommt von einem Energiebeitrag des Schalls zur Keimbildung und einer Bewegung von Kristallisationskeimen aus der Wachstumsrichtung heraus. Dennoch vermag der Schall in Leistungsbereichen  $< 10 \text{ W}$  nicht, Stengelkristallwachstum zu verhindern.
- Variationen über weite Bereiche klassischer L-PBF-Parameter geben ein erstes Optimum für Sono-L-PBF aus, das nicht mit dem Optimum für Standard-L-PBF übereinstimmt. Dieser Parametersatz mit einer Volumenenergiedichte von  $84 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  übertrifft alle untersuchten Standard-L-PBF-Parametersätze hinsichtlich Dichte, Oberfläche sowie Teile der geometrischen Genauigkeit.
- Geometrische Genauigkeiten fallen im Vergleich zum Standard-L-PBF gleich oder verbessert aus. Das kann Nachbearbeitungsbedarfe reduzieren. Auftretende Formfehler beim Sono-L-PBF wie Streifen, unvollständige Fügungen, schiefe Ecken und Wölbungen sind mit dem bloßen Auge erkennbar. Alle Ursachen der aufgetretenen Formfehler liegen im Prototypenstadium des Aufbaus begründet und lassen sich mit genauerer Montage und temperaturstabileren Wandlern beheben.

Diese Ergebnisse belegen insgesamt, dass Sono-L-PBF nicht nur Nachteile der fehlenden Substratheizung ausgleicht sondern alle problematischen Bauteileigenschaften verbessert. Im erstellten Aufbau beträgt das Bauvolumen 60 mm im Durchmesser und 35 mm in der Höhe.

Diese Arbeit stellt einen ersten Laborprototypen der Sono-L-PBF-Technologie vor, der weiterentwickelt werden muss, um qualitätsfähig und wirtschaftlich verwertbar zu produzieren. Wichtige Angriffspunkte zur Weiterentwicklung von Sono-L-PBF sind:

- Zur Vergrößerung des Bauvolumens benötigt Sono-L-PBF eine angepasste Neuentwicklung von Schallwandlern, die temperaturbeständiger, leistungsstärker und in der Grundfläche größer sind. Solche Geräte sind in kompakter und gekapselter Bauform zur Zeit nicht am Markt verfügbar. Gegebenenfalls müssen mehrere Schallwandler ein großflächiges Substrat gemeinsam beschallen. Eine erhöhte Temperaturbeständigkeit erweitert zudem anwendbare Parameterbereiche zu höheren Energiedichten oder zu größeren Bauteilvolumina bei gleichen Energiedichten.
- Präzisere Montagethoden verbessern die Pulverdichtigkeit und verringern den Substratschiefstand. In Kombination mit einem thermisch stabileren Wandler, der sich nicht über mehrere Baujobs hinweg verformt, können wahrscheinlich alle beobachteten Formfehler verhindert werden. Wenn der Zusammenbau schallisolierend und trotzdem ohne nachgiebige Klebungen erfolgt, werden Setzungseffekte vermieden.
- Die Übertragung von Sono-L-PBF auf andere Maschinen und Bauteilgeometrien steht noch aus. Es ist noch unklar, ob bei filigranen Gitterstrukturen dieselben Parameter wie bei Vollmaterial hochwertige Teile produzieren. Sono-L-PBF kann an andere Legierungssysteme als AlSi10Mg mit der vorgeschlagenen Pulvercharakterisierung angepasst werden. Dennoch muss es auch hier angepasste Parametersätze geben. Eine Umrüstung anderer L-PBF-Maschinentypen beschränkt sich hingegen weitgehend auf konstruktive Anpassungen.
- Der in dieser Arbeit präsentierte Aufbau bedarf steuerungs- und messtechnisch einer Integration in die L-PBF-Maschine. Vor allem seitens der Software zur Beschallungssteuerung und Leistungsmessung muss Kompatibilität mit der Steuerung der Maschine hergestellt werden.

# 11 Literaturverzeichnis

- [1] LACHMAYER, Roland (Hrsg.) ; LIPPERT, Rene B. (Hrsg.): *Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54113-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54113-5>. – ISBN 978–3–662–54112–8 978–3–662–54113–5
- [2] GIBSON, Ian ; ROSEN, David ; STUCKER, Brent ; KHORASANI, Mahyar: *Additive Manufacturing Technologies*. Cham : Springer International Publishing, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>. – ISBN 978–3–030–56126–0 978–3–030–56127–7
- [3] TANG, Ming ; PISTORIUS, P. C.: Oxides, Porosity and Fatigue Performance of AISi10Mg Parts Produced by Selective Laser Melting. In: *International Journal of Fatigue* 94 (2017), Januar, S. 192–201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.002>. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.002. – ISSN 01421123
- [4] TODARO, C. J. ; EASTON, M. A. ; QIU, D. ; ZHANG, D. ; BERMINGHAM, M. J. ; LUI, E. W. ; BRANDT, M. ; STJOHN, D. H. ; QIAN, M.: Grain Structure Control during Metal 3D Printing by High-Intensity Ultrasound. In: *Nature Communications* 11 (2020), Dezember, Nr. 1, S. 142. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-13874-z>. – DOI 10.1038/s41467-019-13874-z. – ISSN 2041–1723
- [5] JIANG, Jingchao ; XU, Xun ; STRINGER, Jonathan: Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2 (2018), September, Nr. 4, S. 64. <http://dx.doi.org/10.3390/jmmp2040064>. – DOI 10.3390/jmmp2040064. – ISSN 2504–4494
- [6] FERTIGUNGSVERFAHREN, Additive: Vdi-Richtlinien Vdi 3405. (2014)
- [7] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52902 - Additive Fertigung - Testkörper - Allgemeine Leitlinien für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme*. 2020
- [8] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52904:2020 - Additive manufacturing - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Verwendung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen bei kritischen Anwendungen*. 2020
- [9] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52907:2020 - Additive Fertigung - Ausgangswerkstoffe - Verfahren zur Charakterisierung von Metallpulvern*. 2020
- [10] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52910:2019 - Additive Fertigung - Konstruktion - Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen*. 2020
- [11] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52911-1:2019 - Additive Fertigung - Konstruktion - Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen*. 2020

- [12] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52911-2:2019 - Additive Fertigung - Konstruktion - Teil 2: Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren*. 2020
- [13] NORM: *DIN EN ISO ASTM 52924:2020 - Additive Fertigung - Qualifizierungsgrundsätze - Güteklasse für additiv gefertigte Kunststoffbauteile*. 2020
- [14] KLEIN, Martin (Hrsg.) ; KRIEG, Klaus G. (Hrsg.) ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Einführung in die DIN-Normen: mit 644 Tabellen und 252 Beispielen*. 12., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner [u.a.], 1997. – ISBN 978–3–519–16301–5 978–3–410–13961–4
- [15] KUMKE, Martin: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-22209-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-22209-3>. – ISBN 978–3–658–22208–6 978–3–658–22209–3
- [16] KLOCKE, Fritz: *Fertigungsverfahren 5: Gießen und Pulvermetallurgie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 (VDI-Buch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54728-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54728-1>. – ISBN 978–3–662–54727–4 978–3–662–54728–1
- [17] RICHARD, Hans A. (Hrsg.) ; SCHRAMM, Britta (Hrsg.) ; ZIPSNER, Thomas (Hrsg.): *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen: Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-27412-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-27412-2>. – ISBN 978–3–658–27411–5 978–3–658–27412–2
- [18] QUITTER, Dorothee: 3D-Druck macht Produktion flexibel. (2021), April, S. 3
- [19] HASTIE, James C. ; KARTAL, Mehmet E. ; CARTER, Luke N. ; ATTALLAH, Moataz M. ; MULVIHILL, Daniel M.: Classifying Shape of Internal Pores within Al-Si10Mg Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion Using 3D X-ray Micro Computed Tomography: Influence of Processing Parameters and Heat Treatment. In: *Materials Characterization* 163 (2020), Mai, S. 110225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110225>. – DOI 10.1016/j.matchar.2020.110225. – ISSN 10445803
- [20] FERRO, P. ; MENEGHELLO, R. ; RAZAVI, S. M. J. ; BERTO, F. ; SAVIO, G.: Porosity Inducing Process Parameters in Selective Laser Melted AlSi10Mg Aluminium Alloy. In: *Physical Mesomechanics* 23 (2020), Mai, Nr. 3, S. 256–262. <http://dx.doi.org/10.1134/S1029959920030108>. – DOI 10.1134/S1029959920030108. – ISSN 1029–9599, 1990–5424
- [21] VOLLERTSEN, Frank: *Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen, Modellierung*. Bamberg : Meisenbach, 1996. – ISBN 978–3–87525–071–8
- [22] GEBHARDT, Andreas: *Additive Fertigungsverfahren: additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2016. – ISBN 978–3–446–44401–0

- [23] LACHMAYER, Roland (Hrsg.) ; LIPPERT, Rene B. (Hrsg.) ; KAIERLE, Stefan (Hrsg.): *Additive Serientfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56463-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56463-9>. – ISBN 978–3–662–56462–2 978–3–662–56463–9
- [24] GUGGENBERGER, Von S.: Daimler Buses lässt Kunden ihre Ersatzteile selbst drucken. (2022), Juni, S. 3
- [25] CHEKOTU, Josiah C. ; GOODALL, Russell ; KINAHAN, David ; BRABAZON, Dermot: Control of Ni-Ti Phase Structure, Solid-State Transformation Temperatures and Enthalpies via Control of L-PBF Process Parameters. In: *Materials & Design* 218 (2022), Juni, S. 110715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110715>. – DOI 10.1016/j.matdes.2022.110715. – ISSN 02641275
- [26] CHAKRABARTI, Amaresh (Hrsg.) ; ARORA, Manish (Hrsg.): *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing: Proceedings of I-4AM 2019*. Singapore : Springer Singapore, 2021 (Lecture Notes in Mechanical Engineering). <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-5689-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-5689-0>. – ISBN 9789811556883 9789811556890
- [27] WAGNER, Rainer M. (Hrsg.): *Industrie 4.0 für die Praxis: Mit realen Fallbeispielen aus mittelständischen Unternehmen und vielen umsetzbaren Tipps*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-21118-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-21118-9>. – ISBN 978–3–658–21117–2 978–3–658–21118–9
- [28] VOLLMER, Patrick ; WUNNER, Felix ; KÄFER, Simone: Ohne Digitalisierung keine Additive Fertigung. (2020), Oktober, S. 5
- [29] GHANI, S.A.C. ; ZAKARIA, M.H. ; HARUN, W.S.W. ; ZAULKAFILAI, Z.: Dimensional Accuracy of Internal Cooling Channel Made by Selective Laser Melting (SLM) And Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Processes in Fabrication of Internally Cooled Cutting Tools. In: *MATEC Web of Conferences* (2017), S. 8
- [30] NV, Materialise: *Magics*. Materialise, 2022
- [31] SIDDIQUE, Shafaqat: *Reliability of Selective Laser Melted AISi12 Alloy for Quasi-static and Fatigue Applications*. 2018. – ISBN 978–3–658–23424–9
- [32] NAGARAJAN, Balasubramanian ; HU, Zhiheng ; SONG, Xu ; ZHAI, Wei ; WEI, Jun: Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives. In: *Engineering* 5 (2019), Nr. 4, S. 702–720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.002>. – DOI 10.1016/j.eng.2019.07.002. – ISSN 20958099
- [33] CALIGNANO ; GALATI ; IULIANO: A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations. In: *Machines* 7 (2019), November, Nr. 4, S. 72. <http://dx.doi.org/10.3390/machines7040072>. – DOI 10.3390/machines7040072. – ISSN 2075–1702

- [34] YAP, C Y. ; CHUA, C K. ; DONG, Z L. ; LIU, Z H. ; ZHANG, D Q. ; LOH, L E. ; SING, S L.: Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications. (2015), S. 22
- [35] SAMES, W. J. ; LIST, F. A. ; PANNALA, S. ; DEHOFF, R. R. ; BABU, S. S.: The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing. In: *International Materials Reviews* 61 (2016), Juli, Nr. 5, S. 315–360. <http://dx.doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>. – DOI 10.1080/09506608.2015.1116649. – ISSN 0950–6608, 1743–2804
- [36] ZHANG, Jinliang ; SONG, Bo ; WEI, Qingsong ; BOURELL, Dave ; SHI, Yusheng: A Review of Selective Laser Melting of Aluminum Alloys: Processing, Microstructure, Property and Developing Trends. In: *Journal of Materials Science & Technology* 35 (2019), Februar, Nr. 2, S. 270–284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>. – DOI 10.1016/j.jmst.2018.09.004. – ISSN 10050302
- [37] MORGAN, Dakota ; AGBA, Emmanuel ; HILL, Chris: Support Structure Development and Initial Results for Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. In: *Procedia Manufacturing* 10 (2017), S. 819–830. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.083>. – DOI 10.1016/j.promfg.2017.07.083. – ISSN 23519789
- [38] TAKATA, Naoki ; KODAIRA, Hirohisa ; SEKIZAWA, Keito ; SUZUKI, Asuka ; KOBASHI, Makoto: Change in Microstructure of Selectively Laser Melted AlSi10Mg Alloy with Heat Treatments. In: *Materials Science and Engineering: A* 704 (2017), September, S. 218–228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.029>. – DOI 10.1016/j.msea.2017.08.029. – ISSN 09215093
- [39] FAHRENWALDT, Hans J. ; SCHULER, Volkmar: *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Verfahren, Fertigung*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2003 (Vieweg Praxiswissen). – ISBN 978–3–528–03955–4
- [40] BRONDER, Stefan ; HERTER, Franziska ; RÖHRIG, Anabel ; BÄHRE, Dirk ; JUNG, Anne: Design Study for Multifunctional 3D Re-entrant Auxetics. In: *Advanced Engineering Materials* 24 (2022), Januar, Nr. 1, S. 2100816. <http://dx.doi.org/10.1002/adem.202100816>. – DOI 10.1002/adem.202100816. – ISSN 1438–1656, 1527–2648
- [41] STRANO, G. ; HAO, L. ; EVERSON, R. M. ; EVANS, K. E.: A New Approach to the Design and Optimisation of Support Structures in Additive Manufacturing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (2013), Juni, Nr. 9-12, S. 1247–1254. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4403-x>. – DOI 10.1007/s00170–012–4403–x. – ISSN 0268–3768, 1433–3015
- [42] KAJIMA, Yuka ; TAKAICHI, Atsushi ; NAKAMOTO, Takayuki ; KIMURA, Takahiro ; KITTIKUNDECHA, Nuttaphon ; TSUTSUMI, Yusuke ; NOMURA, Naoyuki ; KAWASAKI, Akira ; TAKAHASHI, Hidekazu ; HANAWA, Takao ; WAKABAYASHI, Noriyuki: Effect of Adding Support Structures for Overhanging Part on Fatigue Strength in Selective Laser Melting. In: *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 78 (2018), Februar, S. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.11.009>. – DOI 10.1016/j.jmbbm.2017.11.009. – ISSN 17516161

- [43] JÄRVINEN, Jukka-Pekka ; MATILAINEN, Ville ; LI, Xiaoyun ; PIILI, Heidi ; SALMINEN, Antti ; MÄKELÄ, Ismo ; NYRHILÄ, Olli: Characterization of Effect of Support Structures in Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. In: *Physics Procedia* 56 (2014), S. 72–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.099>. – DOI 10.1016/j.phpro.2014.08.099. – ISSN 18753892
- [44] CALIGNANO, F.: Design Optimization of Supports for Overhanging Structures in Aluminum and Titanium Alloys by Selective Laser Melting. In: *Materials & Design* 64 (2014), Dezember, S. 203–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>. – DOI 10.1016/j.matdes.2014.07.043. – ISSN 02613069
- [45] ROMANO, S. ; BRÜCKNER-FOIT, A. ; BRANDÃO, A. ; GUMPINGER, J. ; GHIDINI, T. ; BERETTA, S.: Fatigue Properties of AlSi10Mg Obtained by Additive Manufacturing: Defect-based Modelling and Prediction of Fatigue Strength. In: *Engineering Fracture Mechanics* 187 (2018), Januar, S. 165–189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.11.002>. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2017.11.002. – ISSN 00137944
- [46] MORAND, Lucas M. ; SUMMERS, Joshua D. ; PATAKY, Garrett J.: Repurposing Metal Additive Manufacturing Support Structures for Reduction of Residual Stress Deformation. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119 (2022), März, Nr. 5-6, S. 3963–3973. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-08646-3>. – DOI 10.1007/s00170-021-08646-3. – ISSN 0268-3768, 1433–3015
- [47] WEBER, S. ; MONTERO, J. ; BLECKMANN, M. ; PAETZOLD, K.: Parameters on Support Structure Design for Metal Additive Manufacturing. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1* (2020), Mai, S. 1145–1154. <http://dx.doi.org/10.1017/dsd.2020.14>. – DOI 10.1017/dsd.2020.14. – ISSN 2633-7762
- [48] VANLOFFELT, Martijn: Wie weniger Stützstrukturen das Laserstrahlschmelz voranbringen. (2022), S. 5
- [49] COOPER, Kenneth ; STEELE, Phillip ; CHENG, Bo ; CHOU, Kevin: Contact-Free Support Structures for Part Overhangs in Powder-Bed Metal Additive Manufacturing. In: *Inventions* 3 (2017), Dezember, Nr. 1, S. 2. <http://dx.doi.org/10.3390/inventions3010002>. – DOI 10.3390/inventions3010002. – ISSN 2411-5134
- [50] MÖSER, Michael ; KROPP, Wolfgang: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49048-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49048-7>. – ISBN 978-3-540-40336-4 978-3-540-49048-7
- [51] GOTTSTEIN, Günter: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde: mit 28 Tabellen*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-71104-9
- [52] ILSCHNER, Bernhard ; SINGER, Robert F.: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien ; mit 33 Tabellen*. 4., neu

- bearb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–540–21872–2
- [53] WORCH, Hartmut (Hrsg.) ; POMPE, Wolfgang (Hrsg.) ; SCHATT, Werner (Hrsg.): *Werkstoffwissenschaft*. 10., vollst. überarb. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2011 (Master). – ISBN 978–3–527–32323–4
- [54] GOTTSTEIN, Günter: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde: mit 26 Tabellen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2001 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–540–41961–7
- [55] BARGEL, Hans-Jürgen (Hrsg.) ; SCHULZE, Günter (Hrsg.): *Werkstoffkunde*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48629-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48629-0>. – ISBN 978–3–662–48628–3 978–3–662–48629–0
- [56] WEISSBACH, Wolfgang ; DAHMS, Michael: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung ; mit 245 Tabellen*. 16., überarb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2007 (Viewegs Fachbücher der Technik). – ISBN 978–3–8348–0295–8
- [57] LIU, Mengyun ; ZHANG, Zhan ; BRETON, Francis ; CHEN, X.-Grant: Investigation of the Quench Sensitivity of an AlSi10Mg Alloy in Permanent Mold and High-Pressure Vacuum Die Castings. In: *Materials* 12 (2019), Juni, Nr. 11, S. 1876. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12111876>. – DOI 10.3390/ma12111876. – ISSN 1996–1944
- [58] MERKEL, Manfred (Hrsg.) ; THOMAS, Karl-Heinz (Hrsg.): *Taschenbuch der Werkstoffe*. 5., neubearb. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl, 2000. – ISBN 978–3–446–21410–1
- [59] TODARO, C.J. ; EASTON, M.A. ; QIU, D. ; BRANDT, M. ; STJOHN, D.H. ; QIAN, M.: Grain Refinement of Stainless Steel in Ultrasound-Assisted Additive Manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 37 (2021), Januar, S. 101632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101632>. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101632. – ISSN 22148604
- [60] RUGE, J.: *Handbuch Der Schweißtechnik*. 3., neubearbeitete und erw. Aufl. Berlin ; New York : Springer, 1991. – ISBN 978–3–540–52697–1 978–0–387–52697–3 978–3–540–55407–3
- [61] TELLE, Rainer (Hrsg.) ; SALMANG, Hermann (Hrsg.) ; SCHOLZE, Horst (Hrsg.): *Keramik: mit 132 Tabellen*. 7., vollständig neubearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–63273–3
- [62] OSTERMANN, Friedrich ; THIELER, Wolfgang: *Anwendungstechnologie Aluminium: ein werkstoffhandbuch*. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2007
- [63] STEELNUMBER: *ENAC-ALSi10Mg(a)*. [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_alloy\\_composition](http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition) Mai 2021
- [64] STEELNUMBER: *ALSi10Mg*. [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_alloy\\_composition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php) Mai 2021

- [65] RAGHAVAN, V.: Al-Mg-Si (Aluminum-Magnesium-Silicon). In: *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* 28 (2007), Juni, Nr. 2, S. 189–191. <http://dx.doi.org/10.1007/s11669-007-9027-8>. – DOI 10.1007/s11669-007-9027-8. – ISSN 1547–7037, 1863–7345
- [66] BLOME, H. ; BARIG, A.: *Der neue Grenzwert (A-/E-Staub)*. 2002
- [67] SOLUTIONS, SLM: *Material Data Sheet Al-Alloy AlSi10Mg / EN AC-43000 / EN AC-AlSi10Mg*. 2019
- [68] MITTELLEHNER, Marco ; DANNINGER, Herbert ; GIERL-MAYER, Christian ; GSCHIEL, Herbert: Investigation of the Influence of Powder Moisture on the Spreadability Using the Spreading Tester. (2021), Nr. 166, S. 14–22
- [69] BAESSO, Ilaria ; KARL, David ; SPITZER, Andrea ; GURLO, Aleksander ; GÜNSTER, Jens ; ZOCCA, Andrea: Characterization of Powder Flow Behavior for Additive Manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 47 (2021), November, S. 102250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102250>. – DOI 10.1016/j.addma.2021.102250. – ISSN 22148604
- [70] NORM: *DIN SPEC 17071 - Additive Fertigung - Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren*. 2019
- [71] VOCK, Silvia ; KLÖDEN, Burghardt ; KIRCHNER, Alexander ; WEISSGÄRBER, Thomas ; KIEBACK, Bernd: Powders for Powder Bed Fusion: A Review. In: *Progress in Additive Manufacturing* 4 (2019), Dezember, Nr. 4, S. 383–397. <http://dx.doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>. – DOI 10.1007/s40964-019-00078-6. – ISSN 2363–9512, 2363–9520
- [72] NORM: *NF EN ISO ASTM 52907:2019 - Additive Manufacturing - Feedstock Materials - Methods to Characterize Metal Powders*. 2019
- [73] RIENER, Kirstin ; ALBRECHT, Nikolaj ; ZIEGELMEIER, Stefan ; RAMAKRISHNAN, Robert ; HAFERKAMP, Lukas ; SPIERINGS, Adriaan B. ; LEICHTFRIED, Gerhard J.: Influence of Particle Size Distribution and Morphology on the Properties of the Powder Feedstock as Well as of AlSi10Mg Parts Produced by Laser Powder Bed Fusion (LPBF). In: *Additive Manufacturing* 34 (2020), August, S. 101286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101286>. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101286. – ISSN 22148604
- [74] SCHULZE, Dietmar: *Pulver und Schüttgüter: Fließigenschaften und Handhabung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-53885-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-53885-8>. – ISBN 978–3–642–53884–1 978–3–642–53885–8
- [75] NORM: *NF ISO 3953:2011 - Metallic Powders - Determination of Tap Density*. 2011
- [76] SCHATT, Werner ; WIETERS, Klaus-Peter ; KIEBACK, Bernd: *Pulvermetallurgie*. 2. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 3–540–68112–4

- [77] NORM: *NF EN ISO 4490:2018 - Metallic Powders - Determination of Flow Rate by Means of a Calibrated Funnel (Hall Flowmeter)*. 2018
- [78] HULME-SMITH, Christopher N. ; HARI, Vignesh ; MELLIN, Pelle: Spreadability Testing of Powder for Additive Manufacturing. (2021), Nr. 166, S. 9–13
- [79] MELLIN, Pelle ; RASHIDI, Masoud ; FISCHER, Marie ; NYBORG, Lars ; MARCHETTI, Lorenzo ; HULME-SMITH, Christopher ; UHLIRSCH, Markus ; STRONDL, Annika: Moisture in Metal Powder and Its Implication for Processability in L-PBF and Elsewhere. (2021), Nr. 166, S. 33–39
- [80] DOPLER, Martin ; WEISS, Christian: Energy Consumption in Metal Powder Production. (2021), Nr. 166, S. 2–8
- [81] WEISS, C. ; MUNK, J. ; HAEFNER, C.L.: Investigation Towards AlSi10Mg Powder Recycling Behavior in the LPBF Process and Its Influences on Mechanical Properties. In: *Proceedings of the 32nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (2021), S. 16
- [82] SÁNCHEZ, Martín ; ROSENTHAL, Gustavo ; PUGNALONI, Luis A.: Universal Response of Optimal Granular Damping Devices. In: *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), September, Nr. 20, S. 4389–4394. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.05.001>. – DOI 10.1016/j.jsv.2012.05.001. – ISSN 0022460X
- [83] EHLERS, Tobias ; LACHMAYER, Roland: Design of Particle Dampers for Laser Powder Bed Fusion. In: *Applied Sciences* 12 (2022), Februar, Nr. 4, S. 2237. <http://dx.doi.org/10.3390/app12042237>. – DOI 10.3390/app12042237. – ISSN 2076–3417
- [84] LACHMAYER, Roland (Hrsg.) ; RETTSCHLAG, Katharina (Hrsg.) ; KAIERLE, Stefan (Hrsg.): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2019*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-61149-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-61149-4>. – ISBN 978–3–662–61148–7 978–3–662–61149–4
- [85] GHARIB, Mohamed ; GHANI, Saud: Free Vibration Analysis of Linear Particle Chain Impact Damper. In: *Journal of Sound and Vibration* 332 (2013), November, Nr. 24, S. 6254–6264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.07.013>. – DOI 10.1016/j.jsv.2013.07.013. – ISSN 0022460X
- [86] HOLLKAMP, Joseph J. ; GORDON, Robert W.: Experiments with Particle Damping. In: DAVIS, L. P. (Hrsg.): *5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*. San Diego, CA, Juni 1998, S. 2–12
- [87] BEN ROMDHANE, M. ; BOUHADDI, N. ; TRIGUI, M. ; FOLTÊTE, E. ; HADDAR, M.: The Loss Factor Experimental Characterisation of the Non-Obstructive Particles Damping Approach. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 38 (2013), Juli, Nr. 2, S. 585–600. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.02.006>. – DOI 10.1016/j.ymsp.2013.02.006. – ISSN 08883270

- [88] MARCHAL, Ph. ; SMIRANI, N. ; CHOPLIN, L.: Rheology of Dense-Phase Vibrated Powders and Molecular Analogies. In: *Journal of Rheology* 53 (2009), Januar, Nr. 1, S. 1–29. <http://dx.doi.org/10.1122/1.3037266>. – DOI 10.1122/1.3037266. – ISSN 0148–6055, 1520–8516
- [89] ALTIPARMAK, Sadettin C. ; YARDLEY, Victoria A. ; SHI, Zhusheng ; LIN, Jianguo: Challenges in Additive Manufacturing of High-Strength Aluminium Alloys and Current Developments in Hybrid Additive Manufacturing. In: *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 4 (2021), Juni, Nr. 2, S. 246–261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.12.004>. – DOI 10.1016/j.ijlmm.2020.12.004. – ISSN 25888404
- [90] KING, Wayne E. ; BARTH, Holly D. ; CASTILLO, Victor M. ; GALLEGOS, Gilbert F. ; GIBBS, John W. ; HAHN, Douglas E. ; KAMATH, Chandrika ; RUBENCHIK, Alexander M.: Observation of Keyhole-Mode Laser Melting in Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014), Dezember, Nr. 12, S. 2915–2925. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005. – ISSN 09240136
- [91] KUMAR, Pankaj ; FARAH, Jano ; AKRAM, Javed ; TENG, Chong ; GINN, Jon ; MISRA, Mano: Influence of Laser Processing Parameters on Porosity in Inconel 718 during Additive Manufacturing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103 (2019), Juli, Nr. 1-4, S. 1497–1507. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03655-9>. – DOI 10.1007/s00170-019-03655-9. – ISSN 0268–3768, 1433–3015
- [92] HYER, Holden ; ZHOU, Le ; PARK, Sharon ; GOTTSFRITZ, Guilherme ; BENSON, George ; TOLENTINO, Bjorn ; MCWILLIAMS, Brandon ; CHO, Kyu ; SOHN, Yongho: Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy. In: *Metallography, Microstructure, and Analysis* 9 (2020), August, Nr. 4, S. 484–502. <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-020-00659-w>. – DOI 10.1007/s13632-020-00659-w. – ISSN 2192–9262, 2192–9270
- [93] SCHATT, Werner: *Sintervorgänge: Grundlagen*. Düsseldorf : VDI-Verl, 1992. – ISBN 978–3–18–401218–2 978–3–540–63356–3 978–3–540–62152–2
- [94] TANG, Ming ; PISTORIUS, P. C. ; NARRA, Sneha ; BEUTH, Jack L.: Rapid Solidification: Selective Laser Melting of AlSi10Mg. In: *JOM* 68 (2016), März, Nr. 3, S. 960–966. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-015-1763-3>. – DOI 10.1007/s11837-015-1763-3. – ISSN 1047–4838, 1543–1851
- [95] STRUMZA, Einat ; HAYUN, Shmuel ; BARZILAI, Shmuel ; FINKELSTEIN, Yacov ; BEN DAVID, Roey ; YEHESEKEL, Ori: In Situ Detection of Thermally Induced Porosity in Additively Manufactured and Sintered Objects. In: *Journal of Materials Science* 54 (2019), Juni, Nr. 11, S. 8665–8674. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-019-03452-5>. – DOI 10.1007/s10853-019-03452-5. – ISSN 0022–2461, 1573–4803
- [96] WEINGARTEN, Christian ; BUCHBINDER, Damien ; PIRCH, Norbert ; MEINERS, Wilhelm ; WISSENBACH, Konrad ; POPRAWA, Reinhart: Formation and Reduction

- of Hydrogen Porosity during Selective Laser Melting of AlSi10Mg. In: *Journal of Materials Processing Technology* 221 (2015), Juli, S. 112–120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013. – ISSN 09240136
- [97] CHEN, Jing ; HOU, Wei ; WANG, Xiuzhuan ; CHU, Songlin ; YANG, Zhiyi: Microstructure, Porosity and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Al-Si10Mg. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 33 (2020), Juli, Nr. 7, S. 2043–2054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.017>. – DOI 10.1016/j.cja.2019.08.017. – ISSN 10009361
- [98] WANG, Tingting ; DAI, Shimin ; LIAO, Hailong ; ZHU, Haihong: Pores and the Formation Mechanisms of SLMed AlSi10Mg. In: *Rapid Prototyping Journal* 26 (2020), August, Nr. 9, S. 1657–1664. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-02-2020-0036>. – DOI 10.1108/RPJ-02-2020-0036. – ISSN 1355–2546, 1355–2546
- [99] TAN, J. L. ; TANG, C. ; WONG, C. H.: A Computational Study on Porosity Evolution in Parts Produced by Selective Laser Melting. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 49 (2018), August, Nr. 8, S. 3663–3673. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-018-4697-x>. – DOI 10.1007/s11661-018-4697-x. – ISSN 1073–5623, 1543–1940
- [100] WU, Hong ; REN, Junye ; HUANG, Qianli ; ZAI, Xiongfei ; LIU, Ling ; CHEN, Chao ; LIU, Shifeng ; YANG, Xin ; LI, Ruidi: Effect of Laser Parameters on Microstructure, Metallurgical Defects and Property of AlSi10Mg Printed by Selective Laser Melting. In: *Journal of Micromechanics and Molecular Physics* 02 (2017), Dezember, Nr. 04, S. 1750017. <http://dx.doi.org/10.1142/S2424913017500175>. – DOI 10.1142/S2424913017500175. – ISSN 2424–9130, 2424–9149
- [101] KHAIRALLAH, Saad A. ; ANDERSON, Andrew T. ; RUBENCHIK, Alexander ; KING, Wayne E.: Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones. In: *Acta Materialia* 108 (2016), April, S. 36–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014>. – DOI 10.1016/j.actamat.2016.02.014. – ISSN 13596454
- [102] THIJS, Lore ; VERHAEGHE, Frederik ; CRAEGHS, Tom ; HUMBEECK, Jan V. ; KRUTH, Jean-Pierre: A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti–6Al–4V. In: *Acta Materialia* 58 (2010), Mai, Nr. 9, S. 3303–3312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.004>. – DOI 10.1016/j.actamat.2010.02.004. – ISSN 13596454
- [103] LI, Chonggui ; SUN, Shuai ; LIU, Chuanming ; LU, Qinghua ; MA, Pan ; WANG, You: Microstructure and Mechanical Properties of TiC/AlSi10Mg Alloy Fabricated by Laser Additive Manufacturing under High-Frequency Micro-Vibration. In: *Journal of Alloys and Compounds* 794 (2019), Juli, S. 236–246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.287>. – DOI 10.1016/j.jallcom.2019.04.287. – ISSN 09258388

- [104] WESTKÄMPER, Engelbert ; WARNECKE, Hans-Jürgen ; GOTTWALD, Bernhard: *Einführung in die Fertigungstechnik*. 4., überarb. Aufl. Stuttgart Leipzig Wiesbaden : Teubner, 2001 (Teubner-Studienbücher Technik). – ISBN 978–3–519–36323–1
- [105] UZAN, Naor E. ; SHNECK, Roni ; YEHEKEL, Ori ; FRAGE, Nachum: Fatigue of AlSi10Mg Specimens Fabricated by Additive Manufacturing Selective Laser Melting (AM-SLM). In: *Materials Science and Engineering: A* 704 (2017), September, S. 229–237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.027>. – DOI 10.1016/j.msea.2017.08.027. – ISSN 09215093
- [106] CHASTAND, Victor ; QUAEGBEUR, Philippe ; MAIA, Wilson ; CHARKALUK, Eric: Comparative Study of Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Specimens Built by Electron Beam Melting (EBM) and Selective Laser Melting (SLM). In: *Materials Characterization* 143 (2018), September, S. 76–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.028>. – DOI 10.1016/j.matchar.2018.03.028. – ISSN 10445803
- [107] ROTT, Sebastian ; LADEWIG, Alexander ; FRIEDBERGER, Katrin ; CASPER, Johannes ; FULL, Moritz ; SCHLEIFENBAUM, Johannes H.: Surface Roughness in Laser Powder Bed Fusion – Interdependency of Surface Orientation and Laser Incidence. In: *Additive Manufacturing* 36 (2020), Dezember, S. 101437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101437>. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101437. – ISSN 22148604
- [108] RIVALTA, Francesco ; CESCHINI, Lorella ; JARFORS, Anders E. W. ; STOLT, Roland: Effect of Scanning Strategy in the L-PBF Process of 18Ni300 Maraging Steel. In: *Metals* 11 (2021), Mai, Nr. 5, S. 826. <http://dx.doi.org/10.3390/met11050826>. – DOI 10.3390/met11050826. – ISSN 2075–4701
- [109] WHIP, Bo ; SHERIDAN, Luke ; GOCKEL, Joy: The Effect of Primary Processing Parameters on Surface Roughness in Laser Powder Bed Additive Manufacturing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103 (2019), August, Nr. 9-12, S. 4411–4422. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03716-z>. – DOI 10.1007/s00170-019-03716-z. – ISSN 0268–3768, 1433–3015
- [110] SIMONI, Filippo ; HUXOL, Andrea ; VILLMER, Franz-Josef: Improving Surface Quality in Selective Laser Melting Based Tool Making. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 32 (2021), Oktober, Nr. 7, S. 1927–1938. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-021-01744-9>. – DOI 10.1007/s10845-021-01744-9. – ISSN 0956–5515, 1572–8145
- [111] CAO, Longchao ; LI, Jingchang ; HU, Jiexiang ; LIU, Huaping ; WU, Yuda ; ZHOU, Qi: Optimization of Surface Roughness and Dimensional Accuracy in LPBF Additive Manufacturing. In: *Optics & Laser Technology* 142 (2021), Oktober, S. 107246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107246>. – DOI 10.1016/j.optlastec.2021.107246. – ISSN 00303992
- [112] MAAMOUN, Ahmed ; XUE, Yi ; ELBESTAWI, Mohamed ; VELDHUIS, Stephen: Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. In: *Materials* 11 (2018), November, Nr. 12, S. 2343. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11112343>. – DOI 10.3390/ma11112343. – ISSN 1996-1944

- [//dx.doi.org/10.3390/ma11122343](http://dx.doi.org/10.3390/ma11122343). – DOI 10.3390/ma11122343. – ISSN 1996–1944
- [113] GOUVEIA, Ronny M. ; SILVA, Francisco J. G. ; ATZENI, Eleonora ; SORMAZ, Dušan ; ALVES, Jorge L. ; PEREIRA, António B.: Effect of Scan Strategies and Use of Support Structures on Surface Quality and Hardness of L-PBF AlSi10Mg Parts. In: *Materials* 13 (2020), Mai, Nr. 10, S. 2248. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13102248>. – DOI 10.3390/ma13102248. – ISSN 1996–1944
- [114] CALIGNANO, F.: Investigation of the Accuracy and Roughness in the Laser Powder Bed Fusion Process. In: *Virtual and Physical Prototyping* 13 (2018), April, Nr. 2, S. 97–104. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2018.1426368>. – DOI 10.1080/17452759.2018.1426368. – ISSN 1745–2759, 1745–2767
- [115] JAHNS, Katrin ; BAPPERT, Robin: Additive Manufacturing of CuCr1Zr by Development of a Gas Atomization and Laser Powder Bed Fusion Routine. In: *Int J Adv Manuf Technol* (2020), S. 12
- [116] AMINZADEH, Masoumeh ; KURFESS, Thomas: Vision-Based Inspection System for Dimensional Accuracy in Powder-Bed Additive Manufacturing. In: *Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing*. Blacksburg, Virginia, USA : American Society of Mechanical Engineers, Juni 2016. – ISBN 978–0–7918–4990–3, S. V002T04A042
- [117] PRAGANA, J.P.M. ; SAMPAIO, R.F.V. ; BRAGANÇA, I.M.F. ; SILVA, C.M.A. ; MARTINS, P.A.F.: Hybrid Metal Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review. In: *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2 (2021), Mai, S. 100032. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032>. – DOI 10.1016/j.aime.2021.100032. – ISSN 26669129
- [118] YASA, Evren ; KANDEMIR, I ; ATIK, I: On the Z-dimensional Accuracy of L-powder Bed Fusion. In: *Journal of Additive Manufacturing Technologies* (2021), Dezember, S. 533 Pages. <http://dx.doi.org/10.18416/JAMTECH.2111533>. – DOI 10.18416/JAMTECH.2111533
- [119] FOURNET-FAYARD, Lucas ; CAYRON, Charles ; KOUTIRI, Imade ; LAPOUGE, Pierre ; GUY, Jason ; DUPUY, Corinne ; OBATON, Anne-Françoise: Thermal Analysis of Parts Produced by L-PBF and Correlation with Dimensional Accuracy. In: *Welding in the World* (2023), Januar. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01452-9>. – DOI 10.1007/s40194–022–01452–9. – ISSN 0043–2288, 1878–6669
- [120] MAURYA, Nagendra K. ; SRIVASTAVA, Ashish K. ; SAXENA, Ambuj ; DWIVEDI, Shashi P. ; ASHRAF ALI, Mashood ; MUSTAFA, Jiyaul: Experimental Investigation on the Effect of Laser Powder Bed Fusion Process Variables on Dimensional Accuracy, Surface Roughness and Cylindricity of the AlSi10Mg Alloy Component. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* (2021), August, S. 095440892110390. <http://dx.doi.org/10.1177/09544089211039046>. – DOI 10.1177/09544089211039046. – ISSN 0954–4089, 2041–3009

- [121] MILLNER, Rudolf (Hrsg.) ; COBET, Ulrich (Hrsg.): *Ultraschalltechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim : Physik-Verlag, 1987. – ISBN 978–3–87664–106–5
- [122] GRZESIK, Wit ; RUSZAJ, Adam: *Hybrid Manufacturing Processes: Physical Fundamentals, Modelling and Rational Applications*. Cham : Springer International Publishing, 2021 (Springer Series in Advanced Manufacturing). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>. – ISBN 978–3–030–77106–5 978–3–030–77107–2
- [123] TODARO, C.J. ; EASTON, M.A. ; QIU, D. ; BRANDT, M. ; STJOHN, D.H. ; QIAN, M.: Grain Refinement of Stainless Steel in Ultrasound-Assisted Additive Manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 37 (2021), Januar, S. 101632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101632>. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101632. – ISSN 22148604
- [124] LALEGANI DEZAKI, Mohammadreza ; SERJOUEI, Ahmad ; ZOLFAGHARIAN, Ali ; FOTOUHI, Mohammad ; MORADI, Mahmoud ; ARIFFIN, M.K.A. ; BODAGHI, Mahdi: A Review on Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Directed Energy Deposition (DED) Process. In: *Advanced Powder Materials* (2022), April, S. 100054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>. – DOI 10.1016/j.apmate.2022.100054. – ISSN 2772834X
- [125] WANG, Chong ; SUDER, Wojciech ; DING, Jialuo ; WILLIAMS, Stewart: Wire Based Plasma Arc and Laser Hybrid Additive Manufacture of Ti-6Al-4V. In: *Journal of Materials Processing Technology* 293 (2021), Juli, S. 117080. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117080>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2021.117080. – ISSN 09240136
- [126] MERKLEIN, Marion ; SCHULTE, Robert ; PAPKE, Thomas: An Innovative Process Combination of Additive Manufacturing and Sheet Bulk Metal Forming for Manufacturing a Functional Hybrid Part. In: *Journal of Materials Processing Technology* 291 (2021), Mai, S. 117032. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117032>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2020.117032. – ISSN 09240136
- [127] DILLHOEFER, Alexander: Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound. (2014), S. 8
- [128] RIEDER, Hans ; DILLHÖFER, Alexander ; SPIES, Martin ; BAMBERG, Joachim ; HESS, Thomas: Ultrasonic Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Based on Selective Laser Melting. In: *41ST ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: Volume 34*. Boise, Idaho, 2015, S. 184–191
- [129] ZHANG ; GUO ; CHEN ; KANG ; CAO ; QI ; YANG: Ultrasonic-Assisted Laser Metal Deposition of the Al 4047Alloy. In: *Metals* 9 (2019), Oktober, Nr. 10, S. 1111. <http://dx.doi.org/10.3390/met9101111>. – DOI 10.3390/met9101111. – ISSN 2075–4701

- [130] ZHANG, Xiaopeng ; KANG, Jinwu ; WANG, Shuo ; MA, Jiyu ; HUANG, Tianyou: The Effect of Ultrasonic Processing on Solidification Microstructure and Heat Transfer in Stainless Steel Melt. In: *Ultrasonics Sonochemistry* 27 (2015), November, S. 307–315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.041>. – DOI 10.1016/j.ultsonch.2015.05.041. – ISSN 13504177
- [131] YUAN, Tao ; KOU, Sindo ; LUO, Zhen: Grain Refining by Ultrasonic Stirring of the Weld Pool. In: *Acta Materialia* 106 (2016), März, S. 144–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016>. – DOI 10.1016/j.actamat.2016.01.016. – ISSN 13596454
- [132] YUAN, Ding ; SHAO, Shuaiqi ; GUO, Chunhuan ; JIANG, Fengchun ; WANG, Jiandong: Grain Refining of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser and Wire Additive Manufacturing Assisted with Ultrasonic Vibration. In: *Ultrasonics Sonochemistry* 73 (2021), Mai, S. 105472. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105472>. – DOI 10.1016/j.ultsonch.2021.105472. – ISSN 13504177
- [133] YAN, Zhongwei ; TROFIMOV, Vyacheslav ; SONG, Changhui ; HAN, Changjun ; YANG, Yongqiang ; YANG, Chao ; XIAO, Yunmian ; DENG, Zhengtai ; CHEN, Jie: Microstructure and Mechanical Properties of GH5188 Superalloy Additively Manufactured via Ultrasonic-Assisted Laser Powder Bed Fusion. In: *Journal of Alloys and Compounds* 939 (2023), April, S. 168771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168771>. – DOI 10.1016/j.jallcom.2023.168771. – ISSN 09258388
- [134] NING, Fuda ; HU, Yingbin ; CONG, Weilong: Microstructure and Mechanical Property of TiB Reinforced Ti Matrix Composites Fabricated by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping. In: *Rapid Prototyping Journal* 25 (2019), April, Nr. 3, S. 581–591. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-05-2018-0118>. – DOI 10.1108/RPJ-05-2018-0118. – ISSN 1355-2546
- [135] SCHIEBOLD, Karlheinz: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44700-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44700-0>. – ISBN 978-3-662-44699-7 978-3-662-44700-0
- [136] TRÄNKLER, Hans-Rolf (Hrsg.) ; REINDL, Leo (Hrsg.): *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 (VDI-Buch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. – ISBN 978-3-642-29941-4 978-3-642-29942-1
- [137] HERING, Ekbert ; MARTIN, Rolf ; STOHRER, Martin: *Physik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-63177-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-63177-5>. – ISBN 978-3-662-63176-8 978-3-662-63177-5
- [138] BUNDESMINISTERIUM DES INNERN UND FÜR HEIMAT (Hrsg.): *TRLV Lärm Teil 1*. 2017

- [139] SINAMBARI, Gh. R. ; SENTPALI, Stefan: *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-27289-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-27289-0>. – ISBN 978–3–658–27288–3 978–3–658–27289–0
- [140] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 1*. 2003. – ISBN 978–3–662–08597–4 978–3–540–43559–4
- [141] KUTTRUFF, Heinrich: *Physik und Technik des Ultraschalls*. Stuttgart : Hirzel, 1988. – ISBN 978–3–7776–0427–5
- [142] GERTHSEN, Christian ; VOGEL, Helmut: *Physik: ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen; mit 56 Tabellen und über 1150 Aufgaben*. 17., verb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 1993 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–540–56638–0
- [143] MÖSER, Michael: *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>. – ISBN 978–3–662–47703–8 978–3–662–47704–5
- [144] KOCH, Christian ; MÜLLER, Gerhard (Hrsg.) ; MÖSER, Michael (Hrsg.): *Ultraschall in Medizin und Technik*. 1. Auflage. Berlin [Heidelberg] : Springer Vieweg, 2017 (Fachwissen Technische Akustik). – ISBN 978–3–662–55441–8
- [145] SCHUSTER, Volker ; LACH, Michael ; PLATTE, Michael ; PRÜF, KARL D.: Die Qual der Wahl: Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz? (2004), S. 12
- [146] KRAUTKRÄMER, Josef ; KRAUTKRÄMER, Herbert: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5., völlig überarbeitete Aufl.; softcover reprint of the hardcover 5th ed. 1986 [2013]. Berlin Heidelberg : Springer, 2013. – ISBN 978–3–662–10910–6
- [147] PIERCE, Allan D.: *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Cham : Springer International Publishing, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-11214-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-11214-1>. – ISBN 978–3–030–11213–4 978–3–030–11214–1
- [148] BANDOW, Gerhard (Hrsg.) ; HOLZMÜLLER, Hartmut H. (Hrsg.): *"Das ist gar kein Modell!": unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*. 1. Auflage. Wiesbaden : Gabler Research, 2010 (Gabler Research). – ISBN 978–3–8349–1842–0
- [149] SIEBERTZ, Karl ; VAN BEBBER, David ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>. – ISBN 978–3–662–55742–6 978–3–662–55743–3
- [150] SCHIEFER, Hartmut ; SCHIEFER, Felix: *Statistik Für Ingenieure*. 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20640-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20640-6>. – ISBN 978–3–658–20639–0

- [151] PROROK, Stefan: *Statistische Unsicherheit in der industriellen Produktion: Grundlagen und Methoden der modernen Qualitätssicherung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2022. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-63889-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-63889-7>. – ISBN 978–3–662–63888–0 978–3–662–63889–7
- [152] MAURER, Oliver ; HERTER, Franziska ; BÄHRE, Dirk: The Impact of Manufacturing Parameters on Corrosion Resistance of Additively Manufactured AlSi10Mg-samples: A Design of Experiments Approach. In: *Manufacturing Letters* 34 (2022), Oktober, S. 29–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.006>. – DOI 10.1016/j.mfglet.2022.08.006. – ISSN 22138463
- [153] PAUL, Moses J. ; LIU, Qian ; BEST, James P. ; LI, Xiaopeng ; KRUZIC, Jamie J. ; RAMAMURTY, Upadrasta ; GLUDOVATZ, Bernd: Fracture Resistance of AlSi10Mg Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. In: *Acta Materialia* 211 (2021), Juni, S. 116869. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116869>. – DOI 10.1016/j.actamat.2021.116869. – ISSN 13596454
- [154] SANTOS MACÍAS, Juan G. ; ELANGESWARAN, Chola ; ZHAO, Lv ; BUFFIÈRE, Jean-Yves ; VAN HOOREWEDER, Brecht ; SIMAR, Aude: Fatigue Crack Nucleation and Growth in Laser Powder Bed Fusion AlSi10Mg under as Built and Post-Treated Conditions. In: *Materials & Design* 210 (2021), November, S. 110084. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110084>. – DOI 10.1016/j.matdes.2021.110084. – ISSN 02641275
- [155] BRUNO, Ilenia ; LOBO, Georges ; COVINO, Beatrice V. ; DONARELLI, Alessandro ; MARCHETTI, Valeria ; PANNI, Anna S. ; MOLINARI, Francesco: Technology Readiness Revisited: A Proposal for Extending the Scope of Impact Assessment of European Public Services. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*. Athens Greece : ACM, September 2020. – ISBN 978–1–4503–7674–7, S. 369–380
- [156] PAUZON, Camille ; HRYHA, Eduard ; FORÊT, Pierre ; NYBORG, Lars: Effect of Argon and Nitrogen Atmospheres on the Properties of Stainless Steel 316 L Parts Produced by Laser-Powder Bed Fusion. In: *Materials and Design* 179 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107873>. – DOI 10.1016/j.matdes.2019.107873. – ISSN 18734197
- [157] INC., ANSYS: *ANSYS Workbench*. ANSYS, 2022
- [158] SERT, E. ; SCHUCH, E. ; ÖCHSNER, A. ; HITZLER, L. ; WERNER, E. ; MERKEL, M.: Tensile Strength Performance with Determination of the Poisson's Ratio of Additively Manufactured AlSi10Mg Samples. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 50 (2019), Mai, Nr. 5, S. 539–545. <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.201800233>. – DOI 10.1002/mawe.201800233. – ISSN 0933–5137, 1521–4052
- [159] NORM (Hrsg.): *DIN EN ISO 4287 Tastschnittverfahren*. 2010
- [160] MAHR: *MahrSurf Surface Texture Parameters*. <https://capps.mahr.com/mahr-parameter/html/english/MarSurf/MarSurf.html>, Dezember 2021

- [161] MAURER, Oliver ; HERTER, Franziska ; BÄHRE, Dirk: Tolerancing the Laser Powder Bed Fusion Process Based on Machine Capability Measures with the Aim of Process Control. In: *Journal of Manufacturing Processes* 80 (2022), August, S. 659–665. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.031>. – DOI 10.1016/j.jmapro.2022.06.031. – ISSN 15266125
- [162] WAGNER, W. ; PRUSS, A.: The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 31 (2002), Juni, Nr. 2, S. 387–535. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1461829>. – DOI 10.1063/1.1461829. – ISSN 0047–2689, 1529–7845
- [163] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Thermophysical Properties of Fluid Systems*. <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>, September 2022
- [164] NORM: *DIN ISO 1101 - Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort Und Lauf*. 2015
- [165] KUHLENKASPER, Torben ; HANDL, Andreas: *Einführung in die statistische Auswertung von Experimenten: Theorie und Praxis mit R*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-59054-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-59054-6>. – ISBN 978–3–662–59053–9 978–3–662–59054–6
- [166] GOTTWALD, Siegfried (Hrsg.) ; KÄSTNER, Herbert (Hrsg.) ; RUDOLPH, Helmut (Hrsg.): *Meyers Kleine Enzyklopädie Mathematik*. 14., neubearbeitete und erw. Aufl. Mannheim : Meyers Lexikonverlag, 1995. – ISBN 978–3–411–07771–7
- [167] POULIN, J.-R. ; KREITZBERG, A. ; TERRIAULT, P. ; BRAILOVSKI, V.: Long Fatigue Crack Propagation Behavior of Laser Powder Bed-Fused Inconel 625 with Intentionally-Seeded Porosity. In: *International Journal of Fatigue* 127 (2019), Oktober, S. 144–156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.008>. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.008. – ISSN 01421123
- [168] GOTTSTEIN, Günter: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde: mit 26 Tabellen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2001 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–540–41961–7
- [169] ABOULKHAIR, Nesma T. ; MASKERY, Ian ; ASHCROFT, Ian ; TUCK, Chris ; EVERITT, Nicola M.: The Role of Powder Properties on the Processability of Aluminium Alloys in Selective Laser Melting. (2015), S. 6
- [170] KLOCKE, Fritz: *Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 (VDI-Buch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54207-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54207-1>. – ISBN 978–3–662–54206–4 978–3–662–54207–1

- [171] BRANDL, Erhard ; HECKENBERGER, Ulrike ; HOLZINGER, Vitus ; BUCHBINDER, Damien: Additive Manufactured AISi10Mg Samples Using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, High Cycle Fatigue, and Fracture Behavior. In: *Materials & Design* 34 (2012), Februar, S. 159–169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.067>. – DOI 10.1016/j.matdes.2011.07.067. – ISSN 02613069
- [172] BARTLETT, Jamison L. ; LI, Xiaodong: An Overview of Residual Stresses in Metal Powder Bed Fusion. In: *Additive Manufacturing* 27 (2019), Mai, S. 131–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.020>. – DOI 10.1016/j.addma.2019.02.020. – ISSN 22148604
- [173] GMBH, CINOY: Messprotokoll Lasereigenschaften SLM125. 2019 (2019.06.12\_12.18.0099\_O1\_00\_400W\_100%). – Messprotokoll. – 1 S.
- [174] EICHLER, Jürgen ; DÜNKEL, Lothar ; EPPICH, Bernd: Die Strahlqualität von Lasern – Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? In: *Laser Technik Journal* 1 (2004), Oktober, Nr. 2, S. 63–66. <http://dx.doi.org/10.1002/latj.200790019>. – DOI 10.1002/latj.200790019. – ISSN 16137728, 18639119
- [175] FU, Yifeng ; KABIR, Imrana I. ; YEOH, Guan H. ; PENG, Zhongxiao: A Review on Polymer-Based Materials for Underwater Sound Absorption. In: *Polymer Testing* 96 (2021), April, S. 107115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107115>. – DOI 10.1016/j.polymertesting.2021.107115. – ISSN 01429418
- [176] FISCHER, Rolf: *Elektrotechnik: Für Maschinenbauer sowie Studierende technischer Fächer*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25644-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25644-9>. – ISBN 978–3–658–25643–2 978–3–658–25644–9
- [177] DATABASE, Crow P.: *Polymer Data*. <https://polymerdatabase.com/index.html>, 2021
- [178] EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Aufl. München : Hanser, 2011. – ISBN 978–3–446–42283–4
- [179] JEYARAJ, P. ; GANESAN, N. ; PADMANABHAN, Chandramouli: Vibration and Acoustic Response of a Composite Plate with Inherent Material Damping in a Thermal Environment. In: *Journal of Sound and Vibration* 320 (2009), Februar, Nr. 1-2, S. 322–338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2008.08.013>. – DOI 10.1016/j.jsv.2008.08.013. – ISSN 0022460X
- [180] FUKUHARA, Mikio: Temperature Dependency of Elastic Moduli and Internal Dilational and Shear Frictions of Polyetherimide. In: *Journal of Applied Polymer Science* 90 (2003), Oktober, Nr. 3, S. 759–764. <http://dx.doi.org/10.1002/app.12717>. – DOI 10.1002/app.12717. – ISSN 0021–8995, 1097–4628
- [181] PHILLIPS, D. W. ; NORTH, A. M. ; PETHRICK, R. A.: Ultrasonic Studies of Polycarbonate, Polysulfone, and Polyether Sulfone. In: *Journal of Applied Polymer Science* 21 (1977), Juli, Nr. 7, S. 1859–1867. <http://dx.doi.org/10.1002/app.1977.070210713>. – DOI 10.1002/app.1977.070210713. – ISSN 00218995, 10974628

- [182] AIRLIQUIDE: *Sicherheitsdatenblatt Argon (verdichtet)*. Mai 2018
- [183] ESTRADA-ALEXANDERS, A: The Speed of Sound in Gaseous Argon at Temperatures between 110 K and 450 K and at Pressures up to 19 MPa. In: *The Journal of Chemical Thermodynamics* 27 (1995), Oktober, Nr. 10, S. 1075–1089. <http://dx.doi.org/10.1006/jcht.1995.0113>. – DOI 10.1006/jcht.1995.0113. – ISSN 00219614
- [184] KAISER, Jürgen H.: *Technische Produktdokumentation: Die Methoden der Produktbeschreibung und ihre Rolle in den Prozessen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-28749-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-28749-8>. – ISBN 978–3–658–28748–1 978–3–658–28749–8
- [185] BEAUSIR, B. ; FUNDENBERGER, J.-J.: *ATEX-Software*. Metz : Université de Lorraine, 2017
- [186] RAUS, A. A. ; WAHAB, M. S. ; SHAYFULL, Z. ; KAMARUDIN, K. ; IBRAHIM, M.: The Influence of Selective Laser Melting Parameters on Density and Mechanical Properties of AlSi10Mg. In: *MATEC Web of Conferences* 78 (2016), S. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167801078>. – DOI 10.1051/mateconf/20167801078. – ISSN 2261236X
- [187] RAUS, A. A. ; WAHAB, M. S. ; IBRAHIM, M. ; KAMARUDIN, K. ; AHMED, Aqeel ; SHAMSUDIN, S.: Mechanical and Physical Properties of AlSi10Mg Processed through Selective Laser Melting. In: *AIP Conference Proceedings* 1831 (2017). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4981168>. – DOI 10.1063/1.4981168. – ISBN 9780735414990
- [188] BUCHBINDER, Damien ; MEINERS, Wilhelm: *Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion / Fraunhofer ILT Aachen*. 2010. – Abschlussbericht AluGenerativ
- [189] INC., Minitab: *Minitab 17*. State College, PA, USA : Minitab Inc., 2017
- [190] MAURER, Oliver: *Einflussanalyse von Fertigungsparametern des Selective Laser Melting auf technische Bauteileigenschaften mit Fokus auf Korrosionsbeständigkeit*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Masterarbeit, Juni 2020
- [191] BÜRCEL, Ralf ; RICHARD, Hans A. ; RIEMER, Andre: *Werkstoffmechanik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03935-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03935-6>. – ISBN 978–3–658–03934–9 978–3–658–03935–6
- [192] HAIBACH, Erwin: *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3., korr. und erg. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2006 (VDI). – ISBN 978–3–540–29363–7
- [193] LAM, L.P. ; ZHANG, D.Q. ; LIU, Z.H. ; CHUA, C.K.: Phase Analysis and Microstructure Characterisation of AlSi10Mg Parts Produced by Selective Laser Melting. In: *Virtual and Physical Prototyping* 10 (2015), Oktober, Nr.

- 4, S. 207–215. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2015.1110868>. – DOI 10.1080/17452759.2015.1110868. – ISSN 1745–2759, 1745–2767
- [194] BAEHR, Hans D.: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen ; mit zahlreichen Tabellen sowie 72 Beispielen*. 10., grundlegend bearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2000 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–540–66940–1

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Zuordnung der vier Rapid/ Direct Fertigungsansätze zu den Phasen des Produktentstehungsprozesses nach [22] . . . . .	10
3.2	Schematische Skizze eines Bauraumes in einer L-PBF-Maschine, in der der Beschichter in zwei Richtungen beschichten kann . . . . .	12
3.3	Schema eines L-PBF-Prozessfensters mit Begrenzung durch Mechanismen wie Keyholing, Lack of Fusion und Balling [33] . . . . .	14
3.4	Mesostruktur von L-PBF-AlSi10Mg verursacht durch Schmelzspuren des Lasers im Querschliff [38] . . . . .	14
3.5	Beispielhafte, vergrößerte Standards für Stützstrukturen bei AlSi10Mg aus Materialise Magics; hellblau, gelb und rot repräsentieren stützende Linien, Flächen und Volumina [30] . . . . .	16
3.6	Einflüsse von Stützgeometrien auf Bauteileigenschaften qualitativ geordnet nach [47], grün: positiver Einfluss, gelb: neutral, rot: negativer Einfluss . . . . .	17
3.7	a) Entwicklung einer Kristallisationstriebkraft im Zuge der Unterkühlung, b) Summenkurve der freien Enthalpie zur homogenen Keimbildung [51] . . . . .	18
3.8	a) Schematische Bildung einer Nase im ZTU-Diagramm nach [51] und b) ZTU für kokillengegossenes AlSi10Mg [57] . . . . .	20
3.9	Phasendiagramm von Al90Si10 mit variablem Magnesiumgehalt, Markierung repräsentiert AlSi10Mg [65] . . . . .	22
3.10	Verlauf der Zugfestigkeit von L-PBF-AlSi10Mg über der relativen Bauteildichte nach [20] . . . . .	27
3.11	Schliffe aus L-PBF-AlSi10Mg-Teilen zur Bestimmung eines Prozessfensters bezüglich der Porosität nach [92] . . . . .	29
3.12	Schematischer Mechanismus der Kornfeinung beim Sono-LMD von AlSi10Mg nach [103] . . . . .	33
3.13	Kornorientierung in LMD-IN625 a) ohne und b) mit Beschallung der Schmelzphase [4] . . . . .	33
3.14	Entwicklung von Porosität in Sono-LMD von a) AlSi12 für verschiedene Schallleistungen [129] und b) TiC/AlSi10Mg für verschiedene Frequenzen [103] . . . . .	34
3.15	Schallfeldunterteilung in Nahfeld mit Länge $L$ und Fernfeld mit Divergenzwinkel $2\Theta$ nach [144, 145] . . . . .	37
3.16	a) Zweistufiger, vollfaktorieller Versuchsplan für drei Faktoren A, B und C nach [149] und b) derselbe Versuchsplan in seinem dreidimensionalen Versuchsraum nach [148] . . . . .	39
3.17	Central Composite Design im Versuchsraum zweier Faktoren mit $\alpha > 1$ nach [151] . . . . .	40
4.1	Häufigkeitsverteilung der relativen Dichte für L-PBF-AlSi10Mg mit $h = 30 \mu\text{m}$ , $P = 250 \text{ W}$ , $v = 1650 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und $d = 0,13 \text{ mm}$ . . . . .	42

4.2	a) Kritische Fehlergröße über dem geometrieabhängigen Belastungszustand für die linear-elastische Bruchmechanik und b) durch Porosität reskalierte Basquin-Kurve für L-PBF-AlSi10Mg mit Daten aus [153, 154] . . . . .	43
4.3	Arbeitsprogramm dieser Arbeit, das zur Schließung der Forschungslücke beiträgt . . . . .	45
5.1	Layout des Bereiches L-PBF im Technikum des Lehrstuhls für Fertigungstechnik inklusive Material- und Hilfsstoffflüsse . . . . .	49
5.2	a) Technische Zeichnung eines Hall-Flowmeters gemäß DIN EN ISO 4490 [77] und b) in dieser Arbeit genutzter Fließfähigkeits-Messaufbau . . . . .	52
5.3	Aufbau zur normgetreuen Schüttdichtemessung nach ISO 3923 . . . . .	53
5.4	a) genutzter Aufbau zur Pulverbeschallung im wassergefüllten Ultraschallbad und b) Messung des verdichtungsbedingten Krümmungsradius der Pulveroberfläche am Digitalmikroskop VHX-7000 . . . . .	54
5.5	a) Pulverbehältergeometrie im Halbschnitt und b) schematischer Messaufbau der Pulverdämpfung am Fraunhofer IZfP . . . . .	58
5.6	Standardtestgeometrien für a) die Rauheits- und Dichtemessung, b) die Messung der Form- und Maßhaltigkeit und c) die Rauheit in Abhängigkeit des Neigungswinkels . . . . .	58
5.7	Extraktion von Kenngrößen aus einem schematischen Rauheitsprofil, gemäß [160, 161] . . . . .	61
5.8	Definition der Bezeichnungen von Richtungen der taktilen Rauheitsmessung an Würfelprouben . . . . .	61
5.9	Aufbau zur archimedischen Dichtemessung . . . . .	62
5.10	Verteilung der KMG-Messstellen an der Probengeometrie . . . . .	65
6.1	Schematische Skizze des Sono-L-PBF-Prozesses . . . . .	68
6.2	Qualitativer Plot der konventionellen heterogenen Keimbildung im Vergleich zur schallunterstützten und damit einher gehende Absenkung der Energiebarriere (1) und des kritischen Keimradius (2) . . . . .	73
6.3	Bildung der Kurven des ZTU-Diagramms aus Keimbildungsrate und Diffusion für Standard-L-PBF und Sono-L-PBF (ohne und mit Sono) . . . . .	75
6.4	Validierung der Simulation a) Resonanzfrequenzen der einzelnen Modelle über der Zylinderhöhe und b) Direktvergleich von Simulation und Berechnung . . . . .	78
6.5	Substrat des Standard-Aufbaus der Bauraumverkleinerung von Nikon SLM Solutions . . . . .	79
6.6	Ausbildung konzentrischer Schalldruckzonen im Querschnitt des Pulverbetts beim Sono-L-PBF . . . . .	80
6.7	Qualitative Gesamtauslenkung bei a) quadratischem und b) rundem Substrat; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar . . . . .	80
6.8	Qualitative Auslenkung des Pulverbetts in z-Richtung in Abhängigkeit von der Bauhöhe; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar . . . . .	81
6.9	Qualitative Verschiebung eines Zylinders in z-Richtung in Abhängigkeit von der Bauhöhe; Farbskalen sind nicht miteinander vergleichbar . . . . .	82
7.1	Häufigkeitsverteilung des Aspektverhältnisses für eine Stichprobe von 3844 Partikeln aus Charge 2021000766 mit Realdaten im Histogramm und einer Normalverteilung auf Grundlage der Rohdaten . . . . .	85

7.2	Partikeldurchmesserverteilung für zwei Chargen Frischpulver AlSi10Mg und eine Probe Schmauch . . . . .	86
7.3	a) Frequenzabhängiger Phasenwinkel über der Anregungsbeschleunigung und b) zeitaufgelöstes Antwortverhalten für AlSi10Mg-Pulver . . . . .	89
7.4	Kartierung des Phasenwinkels über anregender Beschleunigung und Frequenz, Bereiche zwischen den Messzuständen der Frequenz entstehen durch lineare Interpolation . . . . .	90
7.5	Mehrfachdurchläufe von Beschleunigungssweeps an AlSi10Mg-Pulver bei a) 200 Hz und b) 1000 Hz . . . . .	91
7.6	Kernrauheitsentwicklung an Upskin- und Downskin-Flächen von Fächerproben aus AlSi10Mg bei geheiztem (MSH, orange) und ungeheizten (OSH, blau) Substrat . . . . .	93
7.7	Faktoreffektdiagramme für den Einfluss der Substratheizung auf die relative Dichte und Repräsentanten von Rauheit und Maßabweichung . . . . .	95
8.1	Verhalten einer manuell aufgetragenen Pulverschicht bei steigender Frequenz über eine Resonanz hinweg . . . . .	98
8.2	3D-Panorama-Aufnahmen des Digitalmikroskops verschieden beschallter Pulversäulen a)-c) halbe Füllung des Behälters und d)-f) vollständige Füllung des Behälters . . . . .	99
8.3	a) Ortsverteilung der Pulververdichtung im Bauraum über Radialposition auf dem Substrat und Pulverbetthöhe und b) Verdichtungskurven über der Radialposition bei ausgewählten Pulverbetthöhen . . . . .	102
8.4	Panorama-Aufnahme der Oberfläche einer im Ultraschallbad verdichteten Pulverschüttung, die ein würfelförmiges Bauteil umgibt . . . . .	103
8.5	Grafische Bestimmung der Mindestauslenkung $u$ in der Anordnung mit $\alpha_S \approx 34^\circ$ und $d_{50} \approx 43 \mu\text{m}$ . . . . .	105
8.6	Form des Laserstrahls der genutzten Maschine SLM125 nach [173] mit Divergenzwinkel $\Theta$ , Strahldurchmesser im Fokus $d_L$ , Auslenkung $u_{max}$ und absoluter Durchmesserabweichung $\Delta d_L^{abs}$ . . . . .	105
8.7	Auslenkung des Schallwandlers über der Frequenz mit auslegungsrelevanten Fenstern für Frequenz und Auslenkung . . . . .	106
8.8	a) additive und b) multiplikative Überlagerung zweier Sinus-Schwingungen zweier Frequenzen mit einem Unterschied von Faktor 10 . . . . .	107
8.9	Extrapolation der maximalen Substrattemperatur und angepasste Temperatur-Zeit-Verläufe je nach Flächenbelegung . . . . .	110
8.10	Schallwandler für Sono-L-PBF mit der Bauraumverkleinerung einer SLM125 a) Oberseite zur Montage eines Substrates und b) Unterseite zur Montage in der Maschine . . . . .	111
8.11	Schematische Schnittansicht der Bauraumverkleinerung in der L-PBF-Maschine mit exemplarischer Kabelführung . . . . .	112
8.12	a) Schaltbild zur Leistungsmessung und b) externe Wandlersteuerung zur Schallunterstützung im Sono-L-PBF . . . . .	113
8.13	a) Wandlerleistung für verschiedene Beschallungsmodi in Abhängigkeit von der Potentiometerposition und b) emittierter Schallpegel über der Frequenz am fertigen Aufbau im Vergleich zu relevanten Referenzwerten . . . . .	114

8.14	Variantenbildung zum Einbau der Dämmschicht in den BV-Stempel zur Entkopplung des Schallwandlers von der Maschine . . . . .	116
8.15	Anteile der Wandlerprimärleistung, die in die Maschine und rückwärtig in den Wandler eingekoppelt werden . . . . .	117
8.16	Werkstoffbedingte Dämmung als Funktion von Schallfrequenz und Schichtdicke für PEEK, PEI, PES und Kork . . . . .	119
8.17	Akustischer Zustand des Bauraumes in Abhängigkeit von der Wandlerleistung	120
8.18	a) Anpassung des Schachtes der Bauraumverkleinerung mit 1) Kabeldurchführung aus dem verkleinerten Schacht heraus, 2) Kabelschlitz hinführend zum Bauraum und 3) Kabeldurchführung zum Bauraum sowie b) Originalschacht der Bauraumverkleinerung . . . . .	121
8.19	Gasdichtheitsprüfung der L-PBF-Maschine mit Kabelführung nach außen . . .	122
8.20	a) Angepasster Sono-Stempel mit additiv gefertigten Dichtringen aus TPU und b) umgerüsteter Beschichter mit angepasster Lippe und Schiene . . . . .	124
8.21	Repräsentativer Aufbau zur Pulverbeschallung außerhalb der L-PBF-Maschine mit a) Gesamtaufbau ohne Steuerung, b) initiales Pulverbett und c) beschalltes Pulverbett in Bewegung bei ungünstiger Frequenzauswahl . . . . .	125
8.22	Umgerüsteter Bauraum zum Sono-L-PBF inklusive Kabelführung . . . . .	128
8.23	Steuerungseinheit der Baujobbeschallung mit Spannungsmessaufbau über Tastköpfe und ein Digitaloszilloskop . . . . .	129
8.24	Versuchsstand zur Pulverbeschallung im fertig umgerüsteten Aufbau . . . . .	130
8.25	Verteilung der Schallbeschleunigung in Abhängigkeit von a) Aufbauhöhe und Schalleistung und b) Hausner-Verhältnis und Schalleistung . . . . .	132
9.1	Exemplarische CT-Aufnahmen von a) einem unbeschallten MSH-Probenstück und b) einem mit weißem Rauschen beschallten Probenstück . . . . .	135
9.2	Metallographische Schliffbilder zum Vergleich der Ausbildung von Porosität in Standard- und Sono-L-PBF-Teilen . . . . .	136
9.3	a) Mittlere äquivalente Porendurchmesser, b) Porenflächen sowie c) Aspektverhältnisse der Poren in Abhängigkeit des L-PBF-Modus . . . . .	137
9.4	Verläufe der Kernrauheitsparameter $R_k$ und $R_{pk}$ über dem Überhangwinkel für Upskin- und Downskinflächen a)/b) Mittelwerte c)/d) Standardabweichungen .	139
9.5	Topographien von $0^\circ$ zur z-Richtung geneigten Flächen im Vergleich zwischen Standard- und Sono-L-PBF . . . . .	140
9.6	EBSD-Orientierungsbilder für verschiedene Standard- und Sono-L-PBF-Modi (Inverse Polfiguren bezüglich der y-Richtung) . . . . .	141
9.7	Polfiguren für verschiedene Standard- und Sono-L-PBF-Modi, berechnet aus gemessenen EBSD-Daten . . . . .	142
9.8	a) Mittlere äquivalente Korndurchmesser, b) Kornflächen sowie c) Aspektverhältnisse der Körner in Abhängigkeit des L-PBF-Modus . . . . .	143
9.9	Schematische Darstellung zur Anordnung und Ausrichtung der Würfelproben auf dem Sono-L-PBF-Substrat; kleine graue Kästen am Rand der Proben symbolisieren die mitgefertigte Probennummerierung . . . . .	147
9.10	Volumenenergiedichte der genutzten Parametersätze inklusive Kodierung und Einteilung nach Funktionsfähigkeit im Sono-L-PBF . . . . .	148

9.11 Wechselwirkungseffekte der variierten L-PBF-Parameter Pulverlagendicke $h$ , Laserleistung $P$ , Scangeschwindigkeit $v$ und Spurbstand $d$ mit Beschallung durch weißes Rauschen auf a) relative Dichten und b) über alle Messpositionen und -richtungen gemittelte $R_{pk}$ . . . . .	149
9.12 Differenzkurven der Mittelwerte und Streuungen einzelner Parametersätze im Vergleich MSH mit Beschallung durch weißes Rauschen, a)-b) Auftragung über der Volumenenergiedichte und c)-d) Auftragung über der theoretischen Baurate für beide Zielgrößen . . . . .	150
9.13 Baujobbedingte Formfehler bei Sono-L-PBF-Teilen a) Streifen, b) schiefe Ecke oben links und unvollständige Fügung sowie c) Wölbung . . . . .	153
9.14 Repräsentative LCS-Aufnahmen von Aufbauhöhen, in denen Formfehler auftreten; a)-b) Streifen, c)-d) unvollständige Fügung und e) schiefe Ecke; grüne und blaue Markierungen setzt die Software an erkannte Fehler . . . . .	155
11.1 Auslenkungskarten in Abhängigkeit von Hausner-Verhältnis und Schalleistung für a) 200 Hz und b) 1000 Hz Einzelfrequenzen . . . . .	191
11.2 Abgeschätzte Wandlertemperatur für a) die geplante vollfaktorielle und die b) tatsächlich durchgeführte teilfaktorielle DoE zur L-PBF-Parameterstudie mit Beschallung; grau: Bereich der Wandlerhavarie, gelb: Grenzbereich . . . . .	192
11.3 a) Faktoreffekt der Beschallung auf Bauteileigenschaften, b) Faktoreffekt der Beschallung auf Streuung in Bauteileigenschaften . . . . .	193
11.4 Relative Dichten sowie über alle Messstellen gemittelte Kernrauheitswerte $R_k$ und $R_{pk}$ über der Volumenenergiedichte $E_V$ a)-c) vergleichende Kurvenverläufe, d)-f) Differenzkurven für Mittelwerte und Streuungen; grau: Wandlerhavarie, gelb: Grenzbereich . . . . .	194
11.5 Relative Dichten sowie über alle Messstellen gemittelte Kernrauheitswerte $R_k$ und $R_{pk}$ über der theoretischen Baurate $R_{b,th}$ a)-c) vergleichende Kurvenverläufe, d)-f) Differenzkurven für Mittelwerte und Streuungen . . . . .	195

# Tabellenverzeichnis

3.1	Hauptgruppen konventioneller Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [14] . . . . .	8
3.2	Gegenüberstellung der Vorteile konventioneller und Additiver Fertigung nach [2]	9
3.3	Zusammenhang des qualitativen Fließverhaltens mit dem quantitativen Hausner-Verhältnis [69] . . . . .	24
3.4	Üblicherweise auftretende Porenbildungsmechanismen beim L-PBF . . . . .	28
3.5	In der Literatur dokumentierte Rauheitskennwerte von L-PBF-Teilen verschiedener Werkstoffe; Kommentare in Klammern beschreiben Scanmuster . . . . .	30
3.6	Einteilung von Schallbereichen bezüglich der Frequenz nach [137] . . . . .	35
3.7	Grundgleichungen von Schall bei senkrechtem Welleneinfall auf Grenzflächen [137, 140] mit Massendichte $\rho$ , mechanischen Moduln $E, G$ , Schalleistung $P_S$ , beschallter Fläche $A$ , Amplitude $u$ und Kreisfrequenz $\omega$ . . . . .	36
5.1	Peripheriegeräte der Additiven Fertigung . . . . .	49
5.2	Grundlegende Pulvereigenschaften gemäß Materialdatenblatt [67] . . . . .	51
5.3	Wichtigste Kenndaten der Pulverdämpfungsprüfstandes Tira TV51120-C am Fraunhofer IZfP . . . . .	57
5.4	Bemaßte Darstellungen der Standard-Testgeometrien dieser Arbeit . . . . .	59
6.1	Mechanische Eigenschaften für das Pulverbett nach Umrechnung mit Daten aus [158] und Bauteil oder Substrat aus Ansys . . . . .	78
7.1	Charakteristische Quantilsdurchmesser für AlSi10Mg-Frischpulver und Schmauch	86
7.2	Ergebnisse der Fließfähigkeitsmessungen für verschiedene Pulverchargen . .	87
7.3	Ergebnisse der Schüttdichtemessungen für verschiedene Frischpulverchargen	88
7.4	Parametersätze der Experimente zum Einfluss der Substratheizung bei konstanter Pulverlagendicke von $h = 30 \mu\text{m}$ . . . . .	92
7.5	Ergebnisse der Experimente zum Einfluss der Substratheizung bei konstanter Pulverlagendicke von $h = 30 \mu\text{m}$ , Daten für OSH und MSH . . . . .	94
8.1	Schallbedingte Hausnerverhältnisse für verschiedene Behälterfüllvolumina ( $d = 28 \text{ mm}$ , $h_{max} = 40,6 \text{ mm}$ ) und Schalleistungen, Primärverdichtung . . . . .	100
8.2	Schallbedingte Hausnerverhältnisse für verschiedene Behälterfüllvolumina ( $d = 28 \text{ mm}$ , $h_{max} = 40,6 \text{ mm}$ ) und Schalleistungen, Sekundärverdichtung . . . . .	101
8.3	Eigenschaften geeigneter Dämmstoffe für den Einsatz im BV-Stempel . . . . .	117
8.4	Stückliste aller Teile für die Umrüstung von Standard-L-PBF auf Sono-L-PBF in der Bauraumverkleinerung; Inventar: Bereits vorhandene Komponenten, intern: interne Herstellung oder Verarbeitung . . . . .	123
8.5	Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei Einzelfrequenzen von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12 . . . . .	126
8.6	Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei Überlagerung mit der Grundfrequenz von 200 Hz von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12 . . . . .	126

---

8.7	Frequenzabhängiger Beschallungseffekt bei breitbandiger Rauschanregung von AlSi10Mg-Pulver und Potentiometereinstellung der Endstufe bei Skalenteil 12 .	127
8.8	Schallbedingte Hausner-Verhältnisse in der umgerüsteten Maschine für verschiedene Beschallungsmodi und Schalleistungen bei vollständiger Füllung .	131
9.1	Archimedische Dichte von Standard-L-PBF-Bauteilen im Vergleich zum Sono-L-PBF mit verschiedenen Beschallungsmodi . . . . .	135
9.2	Tabellarische Zusammenfassung der am besten geeigneten Beschallungsmodi für hohe Bauteilqualitäten, Punktstände ergeben sich bei gleicher Gewichtung von 1 für den besten und 0,5 für den zweitbesten L-PBF-Modus . . . . .	145
9.3	Dekodierung der genutzten Parametersätze zum Screening des umgerüsteten Aufbaus . . . . .	146
9.4	Mittlere Geometrieabweichungen vom Soll für die genannten (Sono-)L-PBF-Modi . . . . .	152
9.5	Verteilung der beobachteten Formfehler des Sono-L-PBF auf die Substratpositionen . . . . .	154

# Anhang

## Anhang A - Herleitung der Porenrelevanz für Ermüdungseigenschaften

Porosität kann die Festigkeit eines Werkstoffes im Einsatz bedeutend schwächen, sodass eine prozesstechnische Vermeidung ohne energieintensive Nachbehandlungsschritte wie HIP der technischen Anwendbarkeit von L-PBF einen Schub verleihen kann. Betrachtungen der linear-elastischen Bruchmechanik und der Materialermüdung können helfen, den Einfluss der Porengrößen einzuordnen. Die linear-elastische Bruchmechanik findet bei spröde brechenden Werkstoffen Anwendung [191]. Der kritische Spannungsintensitätsfaktor  $K_{IC}$ , auch Bruchzähigkeit genannt, hängt von der kritischen Fehlergröße  $a_C$ , der Belastung  $\sigma$  und einem Geometriefaktor  $Y$  ab. Es gilt:

$$K_{IC} = Y \sigma \sqrt{\pi a_C} \Leftrightarrow Y \sigma = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a_C}} \quad (11.1)$$

Nach Gleichung 11.1 lässt sich die mechanische Spannung berechnen, die theoretisch anliegen müsste, damit ein Defekt kritisch wird. Für gängige Porengrößen von 10  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  und bei  $K_{IC} = 25,91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  [153] und  $Y = 1$  beträgt diese Spannung 1,5 GPa bis 4,6 GPa, also weit mehr als die mittlere Zugfestigkeit der additiv gefertigten Legierung von ca. 411 MPa [153]. Den Verlauf der Spannungen über der kritischen Fehlergröße gibt Abbildung 4.2 a) an. Im Ermüdungsfall, also beim Auftreten zyklischer Belastungen, wandelt sich Gleichung 11.1 in eine inkrementale Variante um, sodass gilt [191]:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (11.2)$$

Bis ein kritischer Defekt vorliegt, können z.B. Risse stabil wachsen. Innerhalb dieses Bereichs gilt das Paris-Erdogan-Gesetz für die Defektvergrößerung pro Lastwechsel  $\frac{da}{dN}$  je nach Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$  in einer Exponentialabhängigkeit von  $m = 2,5$  und einer Konstanten  $C = 5 \cdot 10^{-6}$  [154].

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (11.3)$$

Einsetzen von Gleichung 11.2 in Gleichung 11.3 liefert eine trennbare, nicht-lineare Differentialgleichung, die vom Belastungskollektiv  $\int \Delta \sigma^m dN$  bestimmt wird. Es folgt:

$$(C Y \sqrt{\pi})^m \Delta \sigma^m =: \alpha \Delta \sigma^m = a^{\frac{-m}{2}} \frac{da}{dN} \Rightarrow \alpha \int \Delta \sigma^m dN = \frac{-2}{m-2} a^{\frac{2-m}{2}} \quad (11.4)$$

Im Falle einer einstufigen Belastung ist  $\Delta \sigma(N) = \text{const.}$  löst sich das Integral zu  $\int \Delta \sigma^m dN = \Delta \sigma^m N$ , sodass sich der Zusammenhang mit der Defektgröße  $a$  zu Gleichung

chung 11.5 vereinfacht.

$$\Delta\sigma^m N = \frac{-2}{\alpha(m-2)} a^{\frac{2-m}{2}} =: f(a) \quad (11.5)$$

Diese Funktion der Fehlergröße dient nun im normierten Zustand auf einen Minimalfehler als ein Reskalierungsfaktor für die Basquin'sche Näherung bezüglich der Zeitfestigkeitskurve  $\Delta\sigma(N) = A N^b$  [192], wobei  $A = 750$  MPa und  $b = -0,1$  für L-PBF-AlSi10Mg gilt [45]. Die Normierung erfolgt mit Hilfe von  $f(a)$  für eine Minimalfehlergröße von einem Burgersvektor, der ungefähr der Gitterkonstante von  $a_0 \approx 0,2$  nm [193] entspricht. Durch Division der Basquin'schen Gleichung durch den Faktor  $\frac{f(a)}{f(a_0)}$  ergeben sich die Kurven in Abbildung 4.2 b).

## Anhang B - Empirische Modellierung der Verdichtungsverteilung im Pulverbett

Der Verlauf der Dichte im Pulverbett kann sich im Intervall zwischen Schüttdichte und Klopfdichte, also Hausner-Verhältnis mal Schüttdichte, bewegen und folgt in z-Richtung vermutlich dem Verlauf des akustischen Druckes, der die Verdichtung hervorruft. An der Oberfläche des Substrates, also in der ersten Pulverschicht in  $z' = 0$  erreicht die Pulverbettichte infolge der Schwingung den Wert  $H \cdot \rho_S$ . Zweite Randbedingung bietet der Grenzwert für unendliche Aufbauhöhen  $\lim_{z' \rightarrow \infty} \rho_{PB}(z') = \rho_S$ . Laut [143] folgt der Schalldruck im Fernfeld einer hyperbolischen Funktion, sodass folgt:

$$\rho_{PB}(z') = \rho_S + \frac{(H_0 - 1)\rho_S}{z' + 1} \quad (11.6)$$

Durch Division von Gleichung 11.6 durch die Schüttdichte geht der Ausdruck in das Hausner-Verhältnis über, wobei  $H_0$  das theoretische Hausnerverhältnis des Pulvers angibt. Es gilt:

$$H(z') = 1 + \frac{H_0 - 1}{z' + 1} \quad (11.7)$$

Innerhalb einer Pulverschicht besteht wegen der gekrümmten Wellenfronten eine radiale Abhängigkeit der Dichte  $\rho_{PB}(r)$ , wie die simulierten und beobachteten Verdichtungszone belegen. Es kann in der analytischen Betrachtung von Rotationssymmetrie ausgegangen werden, sodass in die hergeleitete Funktion nur die Radialposition ohne Winkelangabe einfließt. Für die Höhe der mit Radius  $R$  gekrümmten Pulveroberfläche nach Verdichtung gilt ausgehend von der Höhe  $z'_0$  im Zentrum der Beschichtungsebene:

$$\Delta z'(r) = R + \sqrt{R^2 - r^2} \quad (11.8)$$

Daraus ergibt sich für das radiale Hausnerverhältnis  $H(r)$ :

$$H(r) = \frac{\rho_{PB}(r)}{\rho_S} = \frac{V_S}{V(r)} = \frac{z'}{\Delta z'(r)} \quad (11.9)$$

Damit folgt für die Pulverbettichte in Radialrichtung:

$$\rho_{PB}(r) = \frac{z'}{(R + \sqrt{R^2 - r^2})} \rho_S = H(r) \rho_S \quad (11.10)$$

und für das Hauner-Verhältnis durch Koeffizientenvergleich, wobei die aktuelle Pulverbethöhe zu berücksichtigen ist:

$$H(r) = \frac{z'}{(R + \sqrt{R^2 - r^2})} \quad (11.11)$$

$H(r)$  gibt die Verdichtung in % an, sodass in der Zusammenfassung für die Ortsverteilung des Hausnerverhältnisses gelten muss:

$$H(r, z') = \left( \frac{H(r)}{100} + 1 \right) H(z') \quad (11.12)$$

Für die Primärverdichtung aus Tabelle 8.2 mit einem Hausner-Verhältnis von mindestens 1,14 ergibt sich bei einem mittleren Krümmungsradius der Pulveroberfläche nach der Verdichtung von 36,95 mm die örtliche Verdichtungsverteilung aus Abbildung 8.3, die schon auf das Substrat extrapoliert ist.

## Anhang C - Herleitung der Schallbeschleunigungsverteilung im Pulverbett

Auf Basis der Annahme, das Pulverbett sei ein kompaktes Kontinuum, lässt sich die Schallbeschleunigung  $a$  in Abhängigkeit von der Aufbauhöhe  $z'$ , dem Hausner-Verhältnis  $H$  und der Schallleistung  $P$  abschätzen. Mit Hilfe der Schüttdichte  $\rho_S = 1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und der theoretischen Dichte des AlSi10Mg-Pulvers  $\rho_{th} = 2,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ergeben sich Gewichtungsfaktoren zur Berechnung einer akustischen Impedanz des Pulverbetts gemäß folgender Mischungsregel. Diese beinhaltet die akustischen Impedanzen für AlSi10Mg  $Z_{Al} = 14,3 \text{ MRayl}$  und Argon  $Z_{Ar} = 5,38 \cdot 10^{-4} \text{ MRayl}$ .

$$Z_{PB}(H) = \frac{\rho_{th} - H \rho_S}{\rho_{th}} Z_{Ar} + \frac{H \rho_S}{\rho_{th}} Z_{Al} \quad (11.13)$$

Für die durch Schichtauftrag zunehmende Masse gilt:

$$m(z') = H \rho_S A z' \quad (11.14)$$

Für einen als konstant über der Beschallungsfläche  $A$  abstrahierten Druck gilt das Kräftegleichgewicht  $m a = F = p A$  mit dem akustischen Druck  $p$ . Daraus folgt für die schallbedingte Beschleunigung mit dem Transmissionskoeffizienten  $t = 0,0079$ :

$$a = \sqrt{\frac{Z_{PB}(H) t P}{A} \frac{1}{\rho_S z'}} \quad (11.15)$$

Zugehörige Beschleunigungskarten stehen in Abbildung 8.25. Zusätzlich lassen sich nun über den Zusammenhang  $a = u (2\pi f)^2$  Auslenkungen der Beschallung berechnen, die zu den Karten in Abbildung 11.1 führen. Für die zugehörige Anzahl an Schwingungen  $n$  ergibt sich für eine maximale Auslenkung von  $40 \mu\text{m}$   $n \geq 22500$  und so eine Verdichtungszeit bei 200 Hz Einzelfrequenz von  $t_{\text{verdicht}} \geq 112,5 \text{ s}$ . Wenn der Schall schon vor Baujobbeginn wirkt, kann das initiale Pulverbett verdichten und die folgenden Schichten brauchen bei omnipräsentem Schall aufgrund ihrer geringeren Höhe sicher kürzere Zeitspannen dafür.

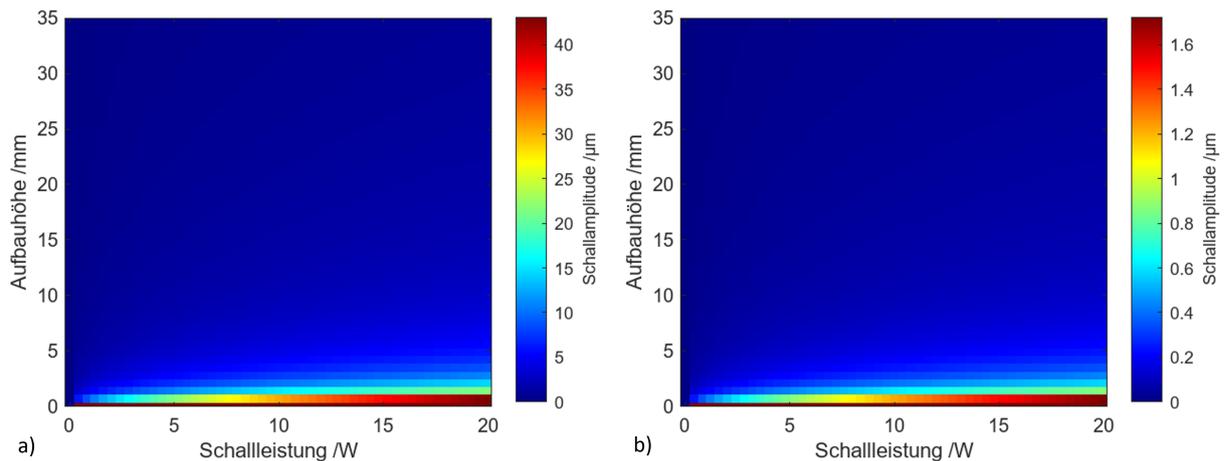


Abbildung 11.1: Auslenkungskarten in Abhängigkeit von Hausner-Verhältnis und Schalleistung für a) 200 Hz und b) 1000 Hz Einzelfrequenzen

## Anhang D - Abschätzung der Wandlertemperatur für Versuchspläne der Sono-Parameterstudie

Laut Herstellerangaben hält der gewählte Schallwandler Eliga 85977  $85^\circ\text{C}$  stand. Für ein besseres Verständnis, wie hoch die eingestrahlten Energien während des Bauvorgangs die Temperatur im Wandler ansteigen lassen, soll folgende Abschätzung dienen. Gemäß Thermodynamik bewirkt Energie, auch Enthalpie,  $\Delta H$  eine Temperaturerhöhung  $\Delta T$  mit den Proportionalitätskonstanten Masse  $m$  und spezifische Wärmekapazität  $c_p$ , sodass nach [194] gilt:

$$\Delta H = m c_p \Delta T \Leftrightarrow \Delta T = \frac{\Delta H}{m c_p} \quad (11.16)$$

An Stelle der Enthalpieänderung  $\Delta H$  geht die berechnete Gesamtenergie jedes Baujobs ein. Als mittlere Probenmasse fungiert der Mittelwert aller Probenwägungen an Luft aus der archimedischen Dichtemessung  $\bar{m} = 11,87 \text{ g}$  und die spezifische Wärmekapazität beträgt gemäß [94]  $c_p = 900 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ . Daraus resultiert die abgeschätzte Wandlertemperatur je Baujob umgerechnet in Grad Celsius der Diagramme in Abbildung 11.2.

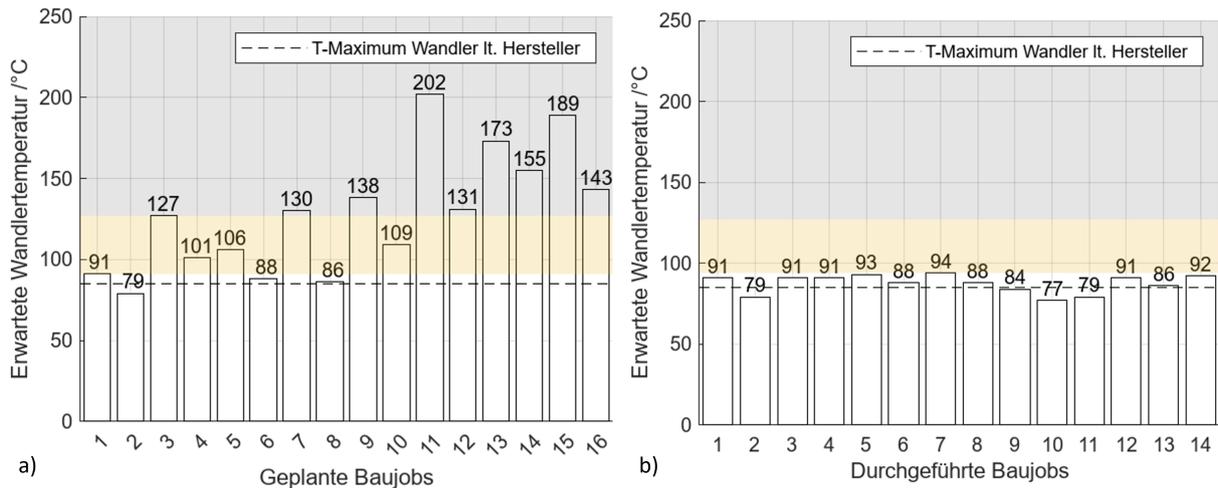


Abbildung 11.2: Abgeschätzte Wandlertemperatur für a) die geplante vollfaktorielle und die b) tatsächlich durchgeführte teilfaktorielle DoE zur L-PBF-Parameterstudie mit Beschallung; grau: Bereich der Wandlerhavarie, gelb: Grenzbereich

Offenbar liegt die Temperaturbeständigkeit jenseits der Herstellerangabe. Mit diesen Ergebnissen muss die Grenze zwischen 94 °C und 127 °C liegen, wobei eine weitere Eingrenzung sicherlich zur Zerstörung weiterer Wandler führen würde. Diese Abschätzung vernachlässigt etwaige Wärmeableitung durch das Korkteil in die Maschine, die ohnehin kaum stattfindet, sowie die Emission von Wärmestrahlung.

## Anhang E - Detaillierte Auswertung der Parameterstudien mit und ohne Beschallung

Eine genauere Aufschlüsselung des Faktoreffekts der Beschallung auf verschiedene Messpositionen und -richtung der Kernrauheiten  $R_k$  und  $R_{pk}$  stellt Abbildung 11.3 dar. Die meisten Effekte befinden sich im negativen Bereich, also führt Sono-L-PBF an all diesen Stellen zu glatteren Oberflächen. Die Beschallungseffekte auf Rauheitsstreuungen zeichnen ein durchwachseneres Bild. Höhere Streuungen in  $R_{pk}$  resultieren von seltener und zufälliger geschnittenen Partikelanhaftungen, die direkt zu einer stärkeren Streuung im homogenen Profil führen.

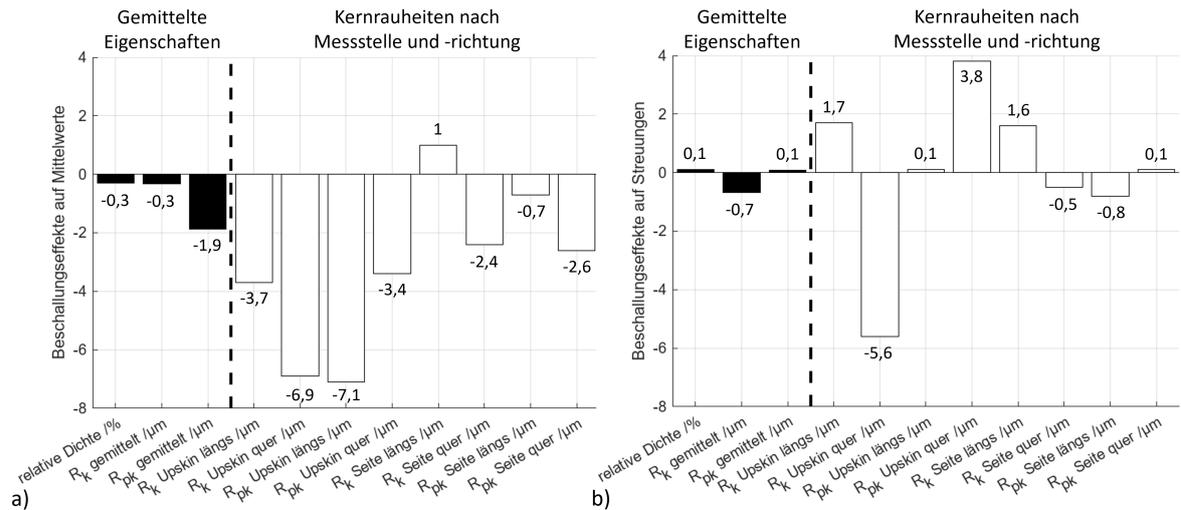


Abbildung 11.3: a) Faktoreffekt der Beschallung auf Bauteileigenschaften, b) Faktoreffekt der Beschallung auf Streuung in Bauteileigenschaften

Die Betrachtung der kollektiven Parameter Volumenenergiedichte und theoretische Baurate ergibt keinen klaren Trend und damit auch keine Hinweise auf eine prozessbeschleunigende Wirkung von Sono-L-PBF. Das belegen die Abbildungen 11.4 und 11.5 klar. Das trifft weder auf die direkten Darstellungen noch auf die Differenzkurven zu. Es zeigt sich viel mehr ein Optimum im mittleren Bereich der Bauraten sowohl für beschallte als auch für nicht beschallte Teile. Ähnliche Kurvenverläufe zwischen weißem Rauschen und MSH resultieren aus der gleichen Physik bezüglich Wärmeeintrag und lassen sich durch die gewählte Beschallung nur in Grenzen beeinflussen.

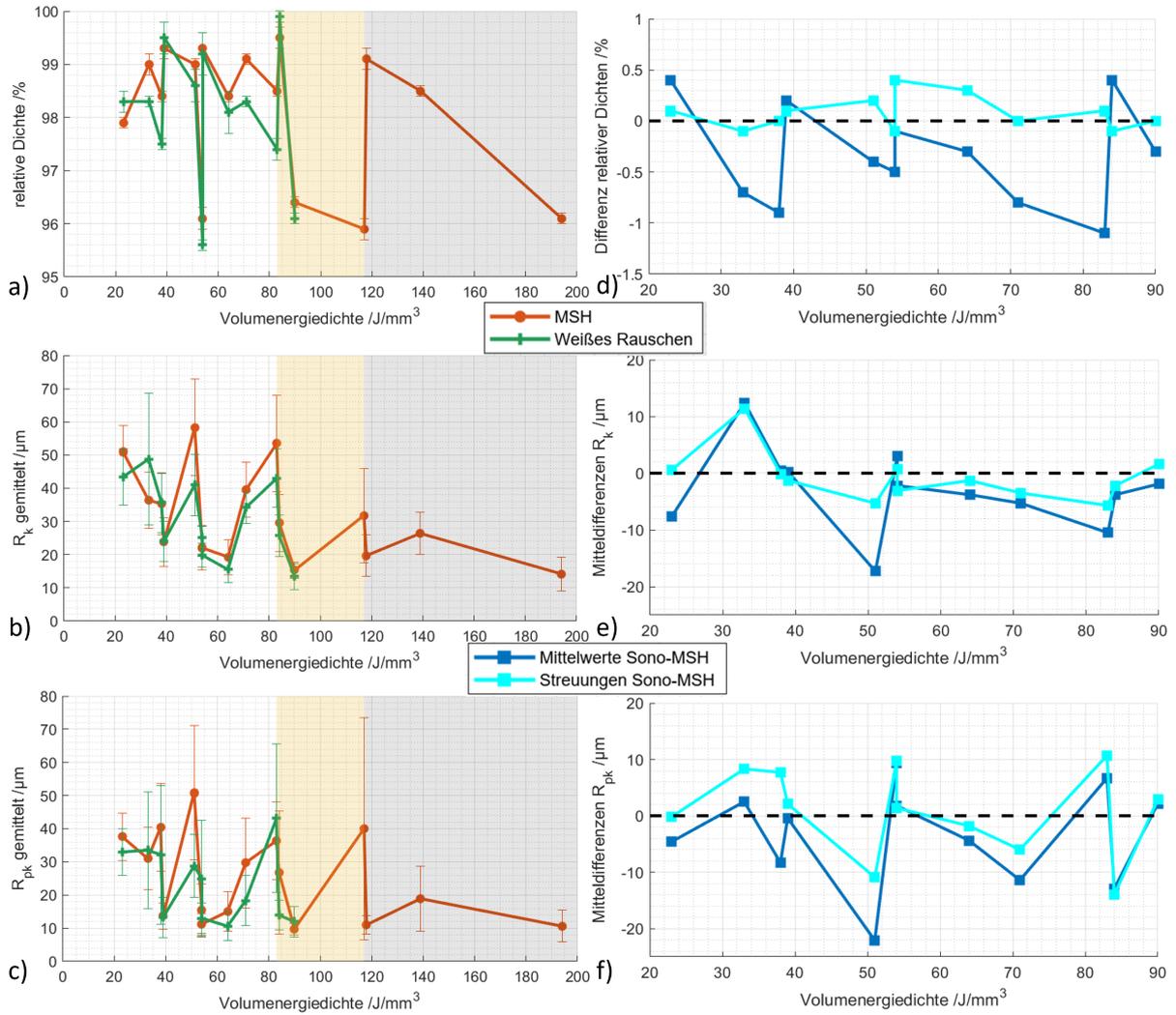


Abbildung 11.4: Relative Dichten sowie über alle Messstellen gemittelte Kernrauheitswerte  $R_k$  und  $R_{pk}$  über der Volumenenergiedichte  $E_V$  a)-c) vergleichende Kurvenverläufe, d)-f) Differenzkurven für Mittelwerte und Streuungen; grau: Wandlerhavarie, gelb: Grenzbereich

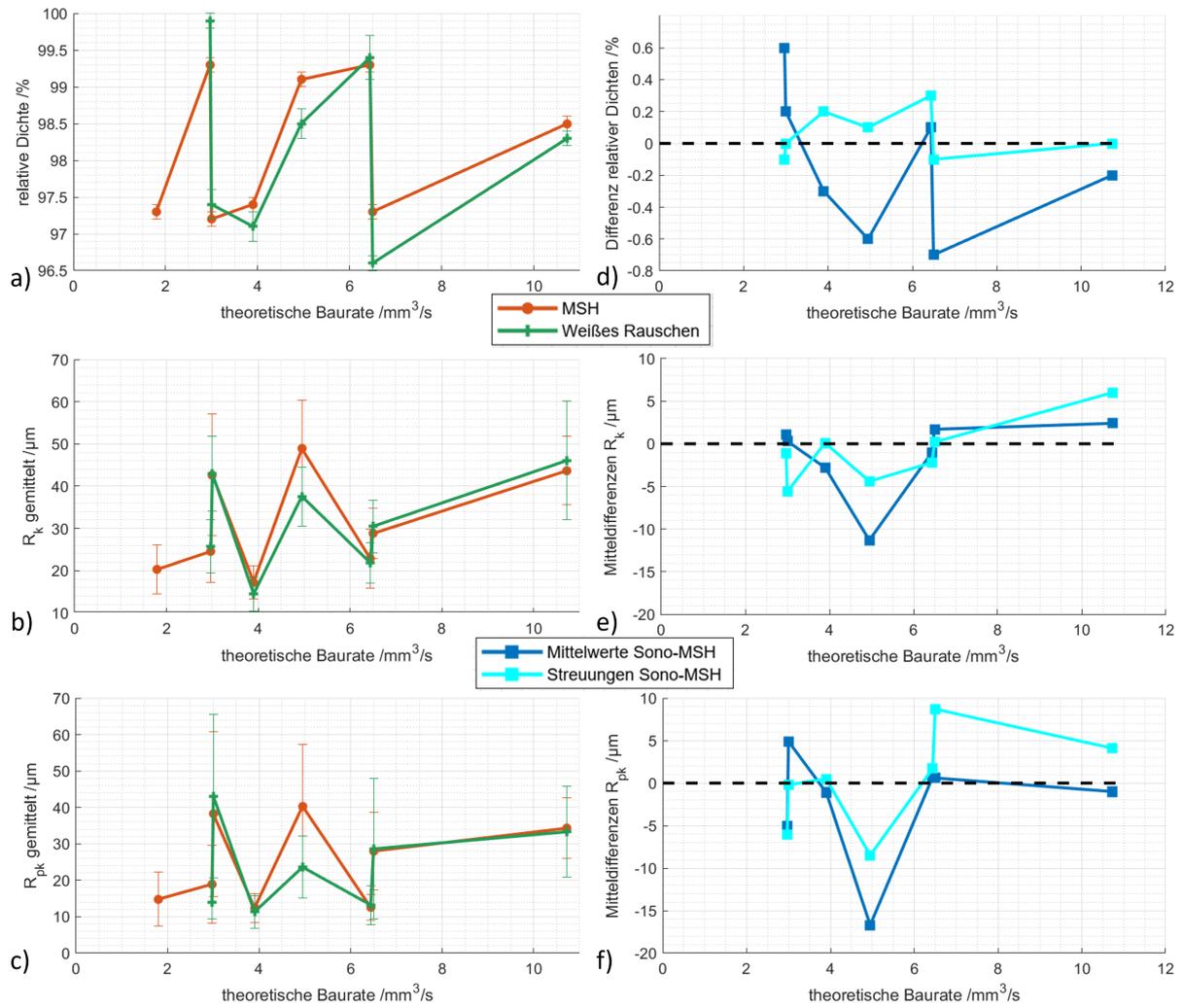


Abbildung 11.5: Relative Dichten sowie über alle Messstellen gemittelte Kernrauheitswerte  $R_k$  und  $R_{pk}$  über der theoretischen Baurate  $R_{b,th}$  a)-c) vergleichende Kurvenverläufe, d)-f) Differenzkurven für Mittelwerte und Streuungen