

Neuartige Ansätze zur Defekterkennung und Prozessanalyse durch Laser-Speckle-Photometrie und High-Speed-Videographie im PBF-LB/M-Verfahren

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und
Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Arno Elspaß, M. Sc.

aus

Oberhausen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
Prof. Dr.-Ing. Christian M. Seidel

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2024

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/82841

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20250109-081355-2



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.

DANKSAGUNG

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um all denjenigen meinen aufrichtigen Dank auszusprechen, die mich auf dem Weg zu meiner Dissertation unterstützt und inspiriert haben. Ohne ihre wertvolle Hilfe, Unterstützung und Ermutigung wäre diese Arbeit nicht das, was sie nun ist. Viele Einzelpersonen aus meiner Familie, meinem Freundes- und Bekanntenkreis sowie Arbeitskollegen und Vorgesetzte haben auf unterschiedliche Weise zu meinem Erfolg beigetragen. An dieser Stelle möchte ich einige Personen besonders hervorheben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Gerd Witt, dessen fachliche Anleitung, Unterstützung und wertvolle Ratschläge wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit haben. Ebenso möchte ich mich bei meinem Zweitgutachter, Herrn Professor Christian Seidel, für die Übernahme des Koreferats und die fachlichen Hinweise bedanken, die mir geholfen haben, neue Perspektiven zu gewinnen. Mein Dank gilt auch den restlichen Mitgliedern des Prüfungsausschusses.

Auch möchte ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen für das großartige Arbeitsklima sowie die vielen fachlichen Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank gilt dem Fachbereich Metallverarbeitung und dessen herausragenden Mitarbeitern: Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski, Dr.-Ing. Jan Wegner, Sebastian Platt, Norman Schnell und Hanna Schönraht. Auch in anspruchsvollen Zeiten und an langen Arbeitstagen wart ihr ein unglaublicher Rückhalt, der zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Meinen Eltern, Brigitte und Hans-Werner, gilt der größte Dank! Durch eure stetige Unterstützung konnte ich mich zu dem Menschen entwickeln, der ich heute bin. Danke auch dafür, dass ihr mir die Schwankungen meiner Launen, besonders während der Endphase beim Schreiben der Dissertation, verziehen habt. Gleichzeitig möchte ich mich auch bei meiner Tante Karin Springer bedanken, die mich immer wieder darin bestärkt hat, meine Ziele mit voller Leidenschaft zu verfolgen.

Zusätzlich möchte ich allen Freunden danken, die mir während der Dissertation auf unterschiedliche Weise Rückhalt geboten haben. Leider reicht der Platz nicht aus, um alle namentlich zu nennen, jedoch hat jeder von euch etwas dazu beigetragen! Danke an alle Jungs von der BSG-Sterkrade, insbesondere Simon, Krischan, Lars, Philip, Murat und den besten Trainer der Welt: Jürgen Kock! Danke an alle, die mich beim Klettern von der Arbeit abgelenkt und nie fallen lassen haben: Marc, Marius, Lea und viele weitere! Danke an Dennis und Hope für sportliche Ausgleichs an langen Tagen an der Tastatur! Danke auch an Schaham Schoar, der mich in der Entscheidung bestärkte, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fertigungstechnik zu arbeiten. Auch gilt ein Dank den restlichen Mitarbeitern der Universität Duisburg-Essen, wie den Mitarbeitern der mechanischen Werkstätten oder der Verwaltung.

KURZFASSUNG

Die additiven Fertigungsverfahren haben sich in den letzten Jahren von einer Technologie, die zur Fertigung von Anschauungsobjekten und Prototypen genutzt wurde, zu einer solchen entwickelt, mit der Endprodukte gefertigt werden. Das Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M), welches der höchsten technologischen Entwicklungsstufe zuzuordnen ist, wird beispielsweise für die Fertigung von Komponenten in der Medizin, Autoindustrie oder der Luft- und Raumfahrt angewandt. Dabei werden die hohen gestalterischen Freiheitsgrade genutzt, um bionische Strukturen für den Leichtbau oder individualisierte Komponenten in der Losgröße eins zu fertigen. PBF-LB/M-Bauteile werden somit auch in Bereichen eingesetzt, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Gesundheit von Menschen besitzen, die Qualitätsansprüche an diese ist deshalb hoch. Hochdynamische Prozessbedingungen führen im PBF-LB/M-Prozess bislang jedoch zu lokalen Ausprägungen von Defekten. Obwohl der schichtweise Aufbau der Bauteile geeignet ist, gibt es bislang keine Prozessmonitoringsysteme, mit denen alle entstehenden relevanten Defekte bestimmt werden könnten. Gleichzeitig existieren keine Richtlinien, wie beispielsweise für Gussteile (ASTM E446, ISO 11971 oder ASME B16.34), anhand derer akzeptierbare Defektgrößen bestimmt werden könnten.

Diese Arbeit trägt zum einen dazu bei, den Einfluss von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Komponenten besser bewerten zu können. Zum anderem wurden maximale Zugfestigkeiten, Bruchdehnungen und Dauerfestigkeiten an den Materialien EOS GP1 (1.4542) und 316L (1.4404) in Abhängigkeit von Defektgrößen bestimmt. Der Einfluss der Ausprägung von Defekten in Größe, Anzahl und Position auf die mechanischen Eigenschaften konnte nachgewiesen werden. Eine Betrachtung des Einflusses auf die Belastung der Bauteile parallel und orthogonal zur Aufbaurichtung wurde durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass Defekte einen größeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften in vertikaler Richtung besitzen.

Zum Zweiten wurden zwei Methoden zur in-situ-Analyse von Defekten im PBF-LB/M-Prozess angewandt und deren Potenzial zur Detektion von Defekten wurde untersucht. Die erste Methode basiert auf der Laser-Speckle-Photometrie. In-situ-Analysen zeigten auf, dass das Signal der Messungen mit Materialeigenschaften korreliert werden kann. Defekte, die durch Boole'sche Operationen mit Quadern, die eine Kantenlänge von 80 μm aufweisen, hervorgerufen werden, können dabei bestimmt werden. Die zweite Methode basiert auf der Auswertung von temperaturabhängigen Emissionen, die vom Schmelzbad ausgehen. Es konnte aufgezeigt werden, dass Korrelationen der Schmelzbadbreiten und -längen sowie Abkühlauern und Temperaturen mit den Intensitäten möglich sind. Eine Kombination der Schmelzbadcharakteristika erlaubt präzise Bestimmungen der Schmelzbadeigenschaften, von denen wiederum auf Defekte im Material zurückgeschlossen werden kann.

ABSTRACT

In recent years, additive manufacturing processes have evolved from technologies used for creating demonstration objects and prototypes to those capable of producing end products. The powder bed fusion of metals using laser beam (PBF-LB/M), which represents the highest technological development stage, is employed in the manufacturing of components in industries such as medical, automotive, and aerospace. The high design freedom allows for the creation of bionic structures for lightweight construction or individualized components in batch size one. PBF-LB/M parts are thus used in areas that have a direct or indirect impact on human health, necessitating high-quality standards. However, the highly dynamic process conditions in the PBF-LB/M process currently lead to localized defects. Despite the layer-wise construction of the parts, there are no process monitoring systems available that can detect all relevant defects. Additionally, there are no guidelines, such as those for cast parts (ASTM E446, ISO 11971, or ASME B16.34), to determine acceptable defect sizes.

This work contributes to better evaluating the impact of defects on the mechanical properties of PBF-LB/M fabricated components. The maximum tensile strengths, elongations at break, and fatigue strengths of materials EOS GP1 (1.4542) and 316L (1.4404) are determined as a function of defect sizes. The influence of the defect characteristics in terms of size, number, and position on the mechanical properties is demonstrated. An analysis of the impact on the loading of parts parallel and orthogonal to the build direction is performed, revealing that defects have a greater impact on the mechanical properties in the vertical direction.

Secondly, two methods for in-situ analysis of defects in the PBF-LB/M process are applied, and their potential for defect detection was investigated. The first method is based on laser-speckle-photometry. In-situ analyses show that the signal from the measurements can be correlated with material properties. Defects induced by Boolean operations with cubes having an edge length of 80 μm can be detected. The second method is based on the evaluation of temperature-dependent emissions from the melt pool. It is shown that melt pool widths and lengths, as well as cooling durations and correlations of intensities with temperatures, are possible. A combination of melt pool characteristics allows for precise determination of melt pool properties, which can be used to infer defects in the material.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bedeutung
AIF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJZ	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
CAT	Constant amplitude test
CCD	Charge-coupled device
CFR	Codes of Federal Regulations
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNN	Convolutional Neural Network
DED	Direct Energy Deposition
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsche Industrienorm
EN	Europäische Norm
FDA	Food and Drug Administration
FPS	Frames per Second – Bilder pro Sekunde
HSK	High-Speed-Kamera
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IKTS	(Fraunhofer) Institut für Keramische Technologien und Systeme
ISO	International Organization for Standardization – Internationale Organisation für Standardisierung
KI	Künstliche Intelligenz
LED	Light-emitting diode
LEP	Laser Foil Printing
LoF	Lack of Fusion
LS	Laser sintering
LSP	Laser-Speckle-Photometrie
MAT	Multiple amplitude test
mCT	Micro-Computertomographie
MEX	Material Extrusion
MJT	Material Jetting
PBF-LB/M	Powder bed fusion of metals using laser beam
ROI	Region of Interest
SHL	Sheet lamination
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPP	Vat photopolymerization

FORMELVERZEICHNIS

Griechische Notation

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	–	Absorptionsgrad
ε	–	Emissionsgrad
ε_V	–	Emissionsgradverhältnis – Quotientenpyrometer
ε_Z	%	Dehnung – Zugversuch
σ	N/mm^2	Spannung – Zugversuch
ΔL	mm	Längenänderung
λ	nm	Wellenlänge
λ_{max}	nm	Wellenlänge an der die Planck-Funktion das Maximum aufweist
ρ	–	Reflexionsgrad
ρ_V	g/cm^3	Dichte
ρ_{rel}	%	Relative Dichte
ρ_{theo}	%	Berechnete Dichte eines Probekörpers
τ_p	–	Transmissionsgrad
τ	–	Nummer eines Bildes aus einem Video

Lateinische Notation

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung – Zugversuch
A_{Bild}	mm^2	Gesamte Fläche eines Bildes
A_g	%	Gleichmaßdehnung – Zugversuch
a_{HSK}	mm	Arbeitsabstand des High-Speed-Kamera-Systems
A_K	mm^2	Gemessene Fläche des betrachteten Objektes
A_L	%	Lüdersdehnung – Zugversuch
A_{Mat}	mm^2	Fläche von Material in einem Bild – ohne Defekte
A_P	mm^2	Fläche
A_t	%	Gesamte Dehnung bei Bruch – Zugversuch
b	mK	Wien'sche Konstante
B_{HSK}	μm	Mit HSK-System gemessene Breite des Schmelzbades
$C(\tau)$	–	Wert der LSP-Korrelationsfunktion im Bild τ
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_O	–	Zirkularität
d_F	μm	Fokuspunktdurchmesser Laser der PBF-LB/M-Anlage
d_{min}	mm	Minstdurchmesser
d_S	mm	Schichtdicke

E	N/mm^2	E-Modul
E_S	J/mm	Streckenenergie
E_V	J/mm^3	Volumenenergiedichte
f	$1/s$	Aufnahmerate von Kameras
F	N	Kraft – Zugversuch
h	mm	Hatchabstand
h_P	Js	Planck-Konstante
I	–	Intensität
I_{liq}	–	Intensität an der das Material verflüssigt
I_M	–	Durchschnittliche Intensität im Bildbereich
I_{sol}	–	Intensität bei der das Material erstarrt
k	J/K	Boltzmann Konstante
L_0	mm	Ausgangslänge der Messstrecke
L_{HSK}	μm	Mit HSK-System gemessene Länge des Schmelzbades
M	–	Emittierte Strahlung eines realen Körpers
$M_{schwarz}$	–	Emittierten Strahlung eines schwarzen Körpers
M_λ^0	$W/(m^2 * \mu m)$	Spektrale Intensität nach Planck
$P(x, y)$	–	Pixel an der Position x und y
P_I	mW	Belichtungsleistung des LSP-Lasers
P_L	W	Laserleistung
R^2	–	Bestimmtheitsmaß
R_{eH}	N/mm^2	Obere Streckgrenze – Zugversuch
R_{eL}	N/mm^2	Untere Streckgrenze – Zugversuch
R_m	N/mm^2	Maximale Zugfestigkeit, ermittelt in Zugversuchen
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Dehngrenze bzw. Ersatzstreckgrenze – Zugversuch
T	K	Temperatur
T_L	K	Liquidustemperatur
T_S	K	Solidustemperatur
u_{HSK}	$\mu m/Pixel$	Umrechnungsfaktor von Pixeln zu einer wahren Länge
U_K	mm	Umfang eines flächeninhaltsgleichen Kreises
U_P	mm	Umfang des betrachteten Objektes
v_T	mm/s	Traversengeschwindigkeit während Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1
v_S	mm/s	Scangeschwindigkeit

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung.....	i
Kurzfassung.....	ii
Abstract.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	iv
Formelverzeichnis.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Additive Fertigung.....	5
2.2 Übersicht über den PBF-LB/M-Prozess.....	6
2.3 Verfahrensablauf des PBF-LB/M-Prozesses.....	7
2.4 Prozessirregularitäten und ihre Einflüsse auf die Bauteilqualität im PBF-LB/M.....	11
2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess.....	16
2.5.1 Bislang verwendete Prozessmonitoring-Systeme im PBF-LB/M.....	16
2.5.2 Laser-Speckle-Photometrie.....	20
2.5.3 Physikalische Grundlagen zur Detektion infraroter Wellenlängen im PBF-LB/M.....	24
3 Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellungen.....	28
3.1 Auswirkung von Defekten auf mechanische Eigenschaften.....	28
3.2 Potenziale von Messmethoden zur in-situ-Defektdetektion.....	28
4 Versuchsmethodik.....	29
4.1 Methoden für den PBF-LB/M-Prozess.....	29
4.1.1 Genutzte Fertigungsanlagen.....	29
4.1.2 Verarbeitete Materialsysteme.....	30
4.2 Analytische Methoden.....	32
4.2.1 Lichtmikroskopie – metallografische Präparation und Durchführung.....	32
4.2.2 Ermittelte Kennwerte zur Bewertung der Probenqualität.....	32
4.2.3 Mikro-Computertomografie.....	34
4.2.4 Zugversuche.....	35
4.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie.....	37
4.3.1 Hardware des Laser-Speckle-Photometrie-Systems.....	37
4.3.2 In-situ-Messungen mittels Laser-Speckle-Photometrie – Versuchsablauf.....	38
4.3.3 Fertigung von Probekörpern mit künstlich erzeugten Defekten.....	41
4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie.....	42
4.4.1 Hardware des Monitoringsystems.....	42
4.4.2 Integration der High-Speed-Kamera an der SLM 280HL.....	44
4.4.3 Mess- und Auswertemethodik mit dem HSK-System.....	45
4.4.4 Korrelation zwischen Oberflächentemperatur und detektierten Strahlungsintensitäten.....	51

5	Ergebnisse.....	53
5.1	Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542	53
5.1.1	Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4542.....	53
5.1.2	Auswirkungen von Defekten auf mechanische Eigenschaften	56
5.1.3	Zwischenfazit: Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften des Materials 1.4542.....	71
5.2	Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404.....	72
5.2.1	Relative Dichte über EV	73
5.2.2	Auswirkungen von Defekten auf statische mechanische Eigenschaften.....	73
5.2.3	Dynamische mechanische Eigenschaften	79
5.2.4	Zwischenfazit: Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften des Materials 1.4404.....	83
5.3	In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie	85
5.3.1	Steigerung der Messgenauigkeit des LSP-Systems	86
5.3.2	Steigerung der Reproduzierbarkeit des Messsystems (Laserleistung Belichtung)	90
5.3.3	Kalibration des LSP-Systems – Probekörper mit unterschiedlichen Dichten.....	92
5.3.4	Detektion lokaler Defekte mittels LSP-Systems.....	94
5.3.5	Bestimmung der Position von Defekten	100
5.3.6	Korrelation der LSP-Daten mit mechanischen Eigenschaften.....	102
5.3.7	Zwischenfazit – LSP-Messsystem	104
5.4	In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie.....	106
5.4.1	Detektion von Schmelzbadeigenschaften	107
5.4.2	In-situ-Detektion von Defekten mittels High-Speed-Kamera.....	116
5.4.3	Korrelation von Temperatur und Strahlungsintensitäten	119
5.4.4	Zwischenfazit – Potenzial des HSK-Systems zur Detektion von Anomalien und Defekten.....	123
6	Zusammenfassung	125
6.1	Auswirkungen von Defekten auf mechanische Eigenschaften	125
6.2	Potenziale von Messmethoden zur in-situ-Defektdetektion.....	126
7	Ausblick.....	129
8	Literaturverzeichnis.....	131
9	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	148
10	Anhang	153
11	Publikationsverzeichnis.....	161

1 EINLEITUNG

Die additive Fertigung (engl.: *additive manufacturing* – AM), oft als 3-D-Druck bezeichnet, hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt, die industrielle Prozesse und Produktentwicklungen revolutioniert hat. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren, bei denen Produkte beispielsweise durch spanende Bearbeitung und das damit verbundene Abtragen von Material entstehen, werden Produkte in additiven Verfahren schichtweise auf Grundlage digitaler Modelle gefertigt, was grundlegend eine höhere Komplexität und Materialeffizienz ermöglicht [1–3]. Gleichzeitig werden somit keine Formen für Gussprozesse oder Werkzeuge für spanende Verfahren benötigt, sodass die Entwicklungsdauer von Produkten reduziert sowie eine bedarfsgesteuerte Fertigung von bspw. Ersatzteilen ermöglicht wird [4, 5]. Richtungsabhängig prägen sich jedoch unterschiedliche mechanisch-technologische Eigenschaften an Bauteilen aus, die abhängig von der Orientierung während des Fertigungsprozesses sind [6, 7]. Verarbeitet werden können je Verfahren unterschiedliche Materialien wie Formsande, Kunststoffe oder Metalle. Die DIN EN ISO ASTM 52900 [8] fasst verschiedene AM-Verfahren zusammen und definiert die grundlegenden Terminologien sowie Konzepte der additiven Fertigungsverfahren, wodurch eine einheitliche Kommunikation und Weiterentwicklung in diesem Bereich ermöglicht wird. Die in dieser Arbeit genutzte Terminologie folgt deshalb ebendieser.

Besonders die additive Verarbeitung von metallischem Ausgangsmaterial und somit die Fertigung metallischer Komponenten hat in den vergangenen Jahren einen starken Aufschwung erfahren. Neben der Anzahl verkaufter AM-Systeme (Abbildung 1-1 a)) zeigt sich dies ebenso in den Erlösen, die durch Verkäufe des Ausgangsmaterials generiert werden (Abbildung 1-1 b)).

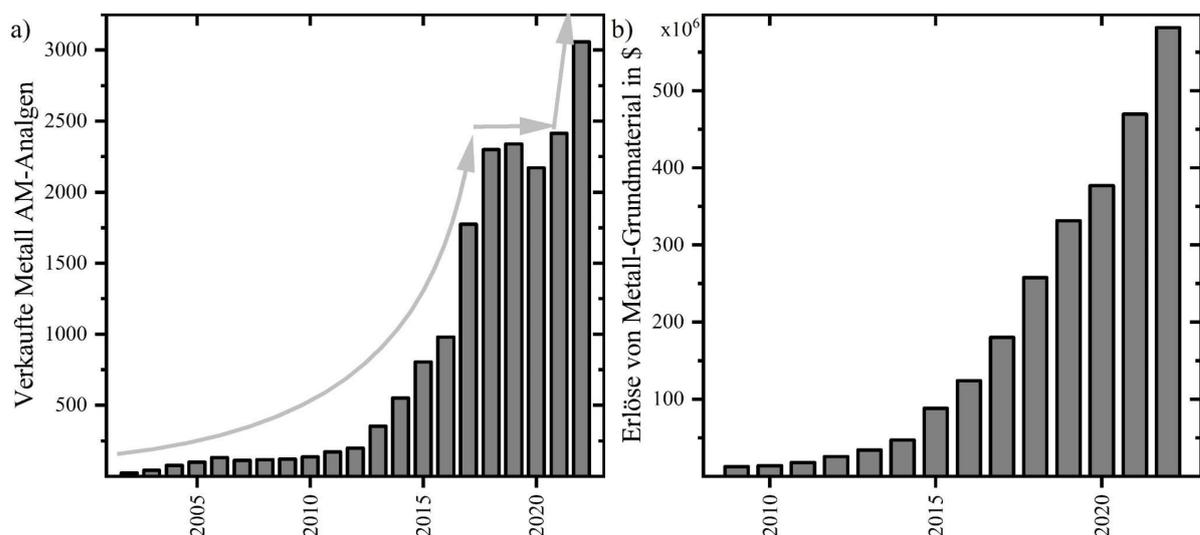


Abbildung 1-1: Wachstum des AM-Segementes der Herstellung von metallischen Komponenten: a) Verkauf von Systemen, mit denen Metall verarbeitet werden kann, in den Jahren 2002 bis 2022; b) Erlöse, die durch den Verkauf von Grundmaterialien für metallverarbeitende AM-Verfahren in den Jahren 2009 bis 2022 generiert wurden, nach Wohlers 2023 [4].

Auch wenn das Wachstum der verkauften Anlagen in den Jahren 2018 bis 2021 abzuflachen schien, im Jahr 2020 während der Corona-Krise sogar eine relative Schrumpfung der Verkäufe auftrat, so konnte

1 Einleitung

ein erneuter Aufschwung im Jahr 2022 festgestellt werden. Die Erlöse, die aus den Verkäufen der Grundmaterialien für diese Verfahren generiert wurden, stiegen hingegen stetig. Ebenso steigt auch der Anteil von AM-gefertigten Endverbrauchsteilen, der im Jahr 2023 30,5 % betrug und somit den Anteil von gefertigten Prototypen (27,7 %) überstieg. Anwendung finden die AM-Verfahren dabei in unterschiedlichen Industriebereichen, wie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Medizin-

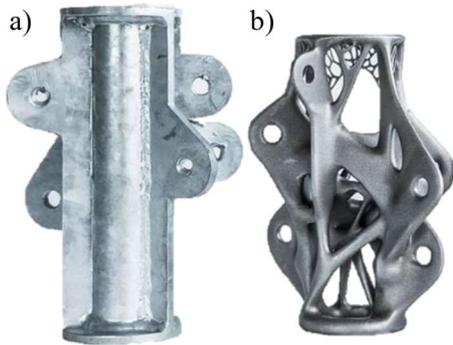


Abbildung 1-2: Optimierung der a) Geometrie konventioneller Komponenten für b) die additive Fertigung unter Berücksichtigung der Belastung zur Gewichtsreduzierung, aus [9].

technik, der energierzeugenden Industrie, Militärtechnik, Architektur und weiteren [4, 10–13]. Trotz des Wachstums gibt es auch Einschränkungen oder Hürden bei der weiteren Verbreitung der Technologie, eine davon sind die potenziell höheren Kosten von Metall-AM-gefertigten Bauteilen im Vergleich zu solchen, die in konventionellen Verfahren hergestellt werden. Deshalb gilt, dass die Mehrwerte, die sich aus den höheren Freiheitsgraden bei der Konstruktion von Bauteilen für die Herstellung mittels der AM-Technologie ergeben, die Mehrkosten übersteigen müssen. Besondere Vorteile resultieren beispielsweise durch Gewichts-

optimierungen von Bauteilen, die durch belastungsbasierte Bauteilauslegungen (bionische Strukturen) erzielt werden können, wie in Abbildung 1-2 a) und b) gezeigt, oder die Anwendung von Gitterstrukturen [14].

In Abbildung 1-3 ist die Kostenverteilung von metallischen Bauteilen nach Wohlers et al. [4] für die Jahre 2017 bis 2022 aufgetragen, aufgeteilt auf die drei typischen Prozessschritte von AM-Verfahren, den Pre-Prozess (alle Schritte vor der Fertigung), den eigentlichen Fertigungsprozess sowie den Post-Prozess (alle anschließenden Verfahren). Die Fertigungskosten nehmen seit jeher den größten Anteil

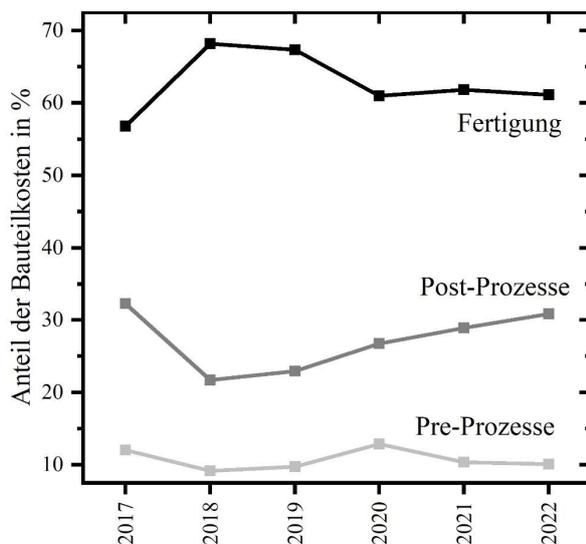


Abbildung 1-3: Prozentuale Verteilung der Stückkosten metallischer AM-Bauteile in den Jahren 2017 bis 2022, in Anlehnung an [4].

(> 50 %) der Kosten eines Bauteils ein, was auf die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten der Fertigungsanlagen zurückzuführen ist. Die Tendenz ist fallend, auch aufgrund vielseitiger Bemühungen zur Kostenreduzierung in diesen Bereichen. Bereits seit 2018 steigt jedoch der Anteil der Post-Prozesskosten. Zu den Post-Prozessen gehört nach Wohlers et al. [4] unter anderem das Entfernen von Bauteilen von der Bauplattform sowie von Supportstrukturen von diesen. Auch zählen Prozesse wie Wärme- oder Oberflächenbehandlungen dazu oder Verfahren zur Qualitätssicherung der Bauteile, beispielsweise mittels Mikro-Computertomografie

(mCT). Dem AM-Verfahren anschließende Qualitätssicherungsmaßnahmen steigern die Kosten der Produkte deutlich. Für Branchen mit höchsten Ansprüchen an die mechanischen Eigenschaften der Bauteile, wie die Luft- und Raumfahrt, die Kernenergie, der Automobilbau oder die Medizintechnik, sind solche Maßnahmen jedoch bislang nahezu unumgänglich [11, 12, 15–19]. Denn hohe Dynamiken innerhalb der Prozesse können zur Bildung typischer AM-Fehler, wie Poren, Risse und Verformungen aufgrund von Eigenspannungen, führen, welche einen deutlichen Einfluss auf mechanische Eigenschaften der Bauteile besitzen [20–24]. Beherrschbar sind diese Dynamiken bislang nicht vollumfänglich, da die Prozesse einer Vielzahl qualitätsbeeinflussender Faktoren unterliegen. Sehrt beschreibt in seiner Arbeit 299 unterschiedliche Einflussgrößen [25]. Trotz zahlreicher Entwicklungen von Prozess-Monitoringsystemen, die teilweise bereits durch die Hersteller vermarktet werden, können zum aktuellen Zeitpunkt nicht alle relevanten Defekte in AM-gefertigten Bauteilen zuverlässig detektiert werden. Größe, Form und Position der Defekte können oft nicht mit ausreichender Qualität detektiert werden, um daraus Kennwerte wie die mechanische Belastbarkeit der gefertigten Produkte abzuleiten [4]. Prozessregelungen oder Abbildungen digitaler Zwillinge in ausreichender Auflösung sind bislang nicht möglich. Dabei ist das Potenzial für das in-situ-Prozessmonitoring als hoch einzuschätzen, da der prozesstypische schichtweise Aufbau Analysen geringer Materialvolumina zulässt [22]. Die Entwicklung von Systemen, mit denen ein vollumfängliches in-situ-Monitoring möglich ist, kann dabei helfen, das Vertrauen in die Qualität gefertigter Komponenten zu steigern – eine zusätzliche Herausforderung, die die weitere Verbreitung der Technologie verzögert. Ebenso ergibt sich ein Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Verfahren, da Qualitätskontrollen im Post-Prozess entfallen würden. Zusätzlich können Fertigungskosten reduziert werden, indem die Fertigung von Bauteilen mit Defekten kritischer Größe frühzeitig abgebrochen wird. Ein Ziel ist die Reduktion von Ausschuss sowie eine Steigerung der Materialeffizienz, die auch ökologische Vorteile bietet. [26–28]

In der Industrie und in der Forschung wurde bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren angewandt, basierend auf Analysen diverser Messsignale [4, 13, 19, 28–30]. Bis 2022 lag der Fokus auf Methoden, bei denen die Sensoren on-axis verbaut wurden, die prägnantesten Ankündigungen der Industrieunternehmen zu Monitoringsystemen beziehen sich aktuell jedoch auf stationäre Systeme. Dabei ist die Analyse von Anomalien auf Millimeterskalen nahezu ausgereift; kleinere Defekte ($< 100 \mu\text{m}$), die unterhalb der Bauteiloberfläche im pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl-(PBF-LB/M)-Prozess auftreten, stellen bislang jedoch noch eine der größten Herausforderungen dar [4]. Als Ziel zukünftiger Forschung wird die Entwicklung von leistungsfähigen Systemen und Sensoren zur Detektion von kleinen Defekten beschrieben [12, 19, 31, 32]. Vorteile bei der Analyse von Defekten besitzen solche Systeme, mit denen multiple qualitätsbeeinflussende Eigenschaften während der Fertigung untersucht werden können und somit eine Kombination dieser zur Auswertung der Material- bzw. Bauteilqualität genutzt werden kann [32].

Zusätzlich besteht Bedarf, die Auswirkung von Defekten mit den resultierenden mechanischen Eigenschaften der Bauteile zu korrelieren, sodass eine Einschätzung der Nutzbarkeit von Komponenten

1 Einleitung

erfolgen kann [13, 33]. Anders als für die Qualitätsbewertung von Stahlgussteilen (ASTM E446, ISO 11971 oder ASME B16.34) gibt es bislang noch keine Normen oder Richtlinien, anhand derer tolerierbare Defektgrößen in Bauteilen abgeleitet werden könnten. In Gussteilen können nach ASTM E446 beispielsweise Gasporen mit einem Durchmesser bis ca. 1 mm – 2 mm je nach Schweregrad und Anwendungsbereich toleriert werden. [34–37]

In der vorliegenden Dissertation wird der Einfluss typischer Defektausprägungen im PBF-LB/M-Prozess auf mechanische Kennwerte untersucht, wie die maximale Zugfestigkeit, Bruchdehnung oder Dauerfestigkeit am Material EOS GP1 (1.4542) und 316L (1.4404). Weiterhin werden zwei Verfahren zum in-situ-Prozessmonitoring entwickelt und deren Eignung zur Detektion von Defekten bestimmt. Das erste System basiert auf der Laser-Speckle-Photometrie, einer vielversprechenden Methode, welche bislang genutzt wurde, um beispielsweise Durchblutungen von Augen, das Wachstum von Wurzelmasse, Schweißprozesse oder mechanische Eigenschaften von Keramiken, Metallen oder Kunststoffen zu bestimmen. Die Skalengröße, auf der die Defekte im PBF-LB/M-Prozess untersucht werden müssen, stellt bisweilen eine Herausforderung dar. [38–45]

Das zweite System basiert auf der Auswertung von temperaturabhängigen Emissionen des Schmelzbades im sichtbaren Wellenlängenbereich. Eine Methode, die bereits erfolgreich in der Forschung angewandt wurde. Das in dieser Arbeit entwickelte System bietet die höchste bislang genutzte räumliche Auflösung des Schmelzbades (1,44 μm Kantenlänge je Pixel) besonders in Kombination mit der zeitlichen Auflösung von 40 000 Bildern pro Sekunde. Diese Kombination verspricht ein hohes Potenzial, um Schmelzbadeigenschaften zu analysieren und von diesen auch auf kleine Defekte zurückschließen zu können [28].

2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

2.1 ADDITIVE FERTIGUNG

Die Anfänge der additiven Fertigung reichen in die frühen 1980er-Jahre zurück. Die erste dokumentierte Technik, die badbasierte Photopolymerisation (engl.: *vat photopolymerization* – VPP), wurde 1984 von Charles Hull entwickelt. Hull gründete später die Firma 3D Systems, die 1987 den ersten kommerziellen VPP-3-D-Drucker, den SLA-1, auf den Markt brachte. Die badbasierte Photopolymerisation nutzt ein ultraviolettes Laserlicht, um flüssiges Photopolymer schichtweise zu verfestigen, wodurch dreidimensionale Objekte entstehen. Angewendet wurden die Produkte zumeist als Prototypen oder Anschauungsmodelle [46].

In den folgenden Jahren wurden mehrere weitere additive Fertigungstechniken entwickelt, die in der DIN EN ISO ASTM 52900 klassifiziert sind. Zu diesen gehört das Verfahren der Materialextrusion (engl.: *material extrusion* – MEX), das 1988 von Scott Crump erfunden und durch die von ihm gegründete Firma Stratasys 1991 kommerzialisiert wurde. In MEX-Verfahren werden Objekte durch die Extrusion von geschmolzenem Thermoplast erzeugt, der schichtweise aufgetragen wird [47]. Das pulverbettbasierte Schmelzen von Polymeren mittels Laserstrahl (engl.: *powder bed fusion of plastics using a laser beam* – PBF-LB/P), ebenfalls in den späten 1980er-Jahren entwickelt, nutzt einen Laser, um pulverförmiges Material umzuschmelzen und dadurch feste Schichten zu erzeugen [48]. Eine weitere Technik ist die Schichtlaminiierung (engl.: *sheet lamination* – SHL), die in den frühen 1990er-Jahren entwickelt wurde und dünne Materialschichten, typischerweise Papier- oder Kunststoffschichten, schneidet und laminiert, um dreidimensionale Objekte zu erzeugen [49].

Ein bedeutender Meilenstein in der industriellen Nutzung der additiven Fertigung war die Entwicklung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (engl.: *powder bed fusion of metals using a laser beam* – PBF-LB/M). Diese Technik, früher auch als Laser-Strahlschmelzen (engl.: *laser beam melting* – LBM) bekannt, ermöglicht die Herstellung von Metallteilen durch selektives Schmelzen von Metallpulver mittels eines Lasers. Manriquez-Frayre und Bourell [50] gelang bereits im Jahr 1990 die Verarbeitung einer Kupfer-Blei-Legierung auf einer Forschungsanlage. In den späten 1990er-Jahren begannen Unternehmen wie EOS GmbH und Concept Laser (heute Teil von GE Additive) mit der Entwicklung und Kommerzialisierung dieser Technologie. Der PBF-LB/M-Prozess hat sich seitdem als eine der führenden AM-Techniken für die Produktion von hochpräzisen und komplexen Metallteilen etabliert [51].

In den 2000er-Jahren erlebte die additive Fertigung einen weiteren Aufschwung, unterstützt durch Fortschritte in der Materialwissenschaft und der digitalen Technik. Neue Materialien und verbesserte Anlagentechniken erweiterten das Anwendungsspektrum der additiven Fertigung erheblich. Technologien wie der Freistrah-Bindemittelauftrag (engl.: *binder jetting* – BJZ), Freistrah-Materialauftrag (engl.:

2.2 Übersicht über den PBF-LB/M-Prozess

material jetting – MJT) und Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (engl.: *directed energy deposition* – DED) wurden weiterentwickelt und fanden breite industrielle Anwendung [52, 53]. Ein weiterer wichtiger Schritt war die Integration der additiven Fertigung in die Serienproduktion. Unternehmen wie General Electric und Siemens begannen, additiv gefertigte Komponenten in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Energieerzeugung als Endprodukte einzusetzen. Dies markierte den Übergang von der Prototypenfertigung zur vollwertigen industriellen Produktion [54].

Die Geschichte der additiven Fertigung ist geprägt von kontinuierlicher Innovation und wachsender Akzeptanz in verschiedenen Industriezweigen. Mit den fortschreitenden Entwicklungen der AM-Prozesse, die auch durch die zunehmende Digitalisierung, Automatisierung sowie Nutzung von KI-Modellen getrieben werden, können die Grenzen des Möglichen in der additiven Fertigung weiterhin verschoben und neue Anwendungen erschlossen werden. Diese retrospektive Betrachtung zeigt, dass die additive Fertigung von einer visionären Idee zu einer zentralen Technologie in der modernen Industrie gereift ist, deren Potenzial jedoch noch nicht ausgeschöpft ist.

2.2 ÜBERSICHT ÜBER DEN PBF-LB/M-PROZESS

Das PBF-LB/M-Verfahren ist eine Schlüsseltechnologie im Bereich der AM-Verfahren zur Verarbeitung von metallischen, pulverförmigen Grundwerkstoffen. Verarbeitet werden bislang Materialien wie diverse Stähle, Titan-, Aluminium-, Nickelbasis- und Kobaltlegierungen sowie Edelmetalle [55–57]. Dabei zählen zu den Anwendern dieser Technologie die medizinische und dentale Industrie, die Luft- und Raumfahrt, die Automobilindustrie, der Werkzeugbau sowie die Konsumgüter produzierende Industrie. In der Medizintechnik werden mittels PBF-LB/M z. B. patientenspezifische Implantate und Prothesen hergestellt, die zu einer verbesserten Anpassung und Funktionalität führen [53, 58]. In der Luft- und Raumfahrt ermöglicht das PBF-LB/M die Produktion komplexer und leichter Bauteile, die zur Treibstoffeffizienz und Leistungssteigerung beitragen [16, 59]. Die Automobilindustrie nutzt AM-Verfahren für die Prototypenerstellung und die Herstellung von maßgeschneiderten Komponenten [53]. Besonders in Anwendungsgebieten, in denen die PBF-LB/M-gefertigten Produkte einen direkten Einfluss auf die körperliche Unversehrtheit von Menschen haben, wie in der Luft- und Raumfahrt sowie der medizinischen Industrie, sind die Ansprüche an die Qualität der Produkte hoch. Diese Anforderungen betreffen mehrere Aspekte, darunter Materialeigenschaften, Oberflächenqualität, mechanische Eigenschaften und die Einhaltung spezifischer Normen und Regularien. So wird in der Luft- und Raumfahrt beispielsweise besonders auf die Aspekte der Materialeigenschaften und -reinheit, mechanische Eigenschaften, Oberflächenqualität und die Maßgenauigkeit geachtet, dabei gilt die DIN EN 9100 [60] als Grundlage. Für medizinische Produkte liegt der Fokus auf der Biokompatibilität, Sterilisierbarkeit, Präzision und Oberflächenqualität sowie mechanischen Eigenschaften. Bei der Produktion mittels PBF-LB/M müssen dabei unter anderem die Normen ISO 13485 (in Amerika FDA 21 CFR Part 820) [18] und ISO 10993 [17] beachtet werden. Aufgrund der Anforderungen an die Reproduzierbarkeit mechanischer Eigenschaften sowie wegen des prozessinhärenten schichtweisen Aufbaus der Komponenten

wird in der Forschung und Industrie an Möglichkeiten zum In-line-Prozessmonitoring geforscht, genauer wird auf diese Methoden sowie den Stand der Technik jedoch erst in Abschnitt 2.5 eingegangen.

2.3 VERFAHRENSABLAUF DES PBF-LB/M-PROZESSES

Im Allgemeinen umfassen alle AM-Verfahren drei Phasen: die Pre-, In- und Post-Prozesse. Der Pre-Prozess umfasst alle dem eigentlichen Bauprozess vorangehenden Arbeitsschritte wie die Datenvorbereitung, Geometrierzeugung, Parametrisierung und die Schichtdatengenerierung. Hinzu kommt außerdem die Anlagenvorbereitung, welche beispielsweise die Befüllung mit dem Pulvermaterial einschließt. Der In-Prozess bezeichnet neben dem eigentlichen schichtweisen Bauprozess außerdem das Entpacken bzw. Entnehmen der Bauteile aus dem Bauraum. Der Post-Prozess schließt das Entfernen von nicht verschmolzenem Material und Stützstrukturen ein. Des Weiteren kann zur Einstellung gewünschter mechanischer Eigenschaften oder zur Reduzierung von Eigenspannungen in den gefertigten Bauteilen ein Einsatz von weiteren Verfahren, wie z. B. einer Wärmebehandlung, erforderlich sein. Auf die Pre- und Post-Prozesse wird in dieser Arbeit nicht genauer eingegangen, detaillierte Beschreibungen dieser Prozesse können jedoch in der Literatur nachgelesen werden, wie in der Zusammenfassung von PBF-LB/M-Prozessen von Yadroitsev et al. [22].

Ein typischer Aufbau einer PBF-LB/M-Anlage mit den wichtigsten Komponenten ist in Abbildung 2-1 gegeben. Die Verfahrensschritte von PBF-LB/M-Prozessen werden typischerweise in drei Phasen unterteilt, das Beschichten, Belichten und Absenken.

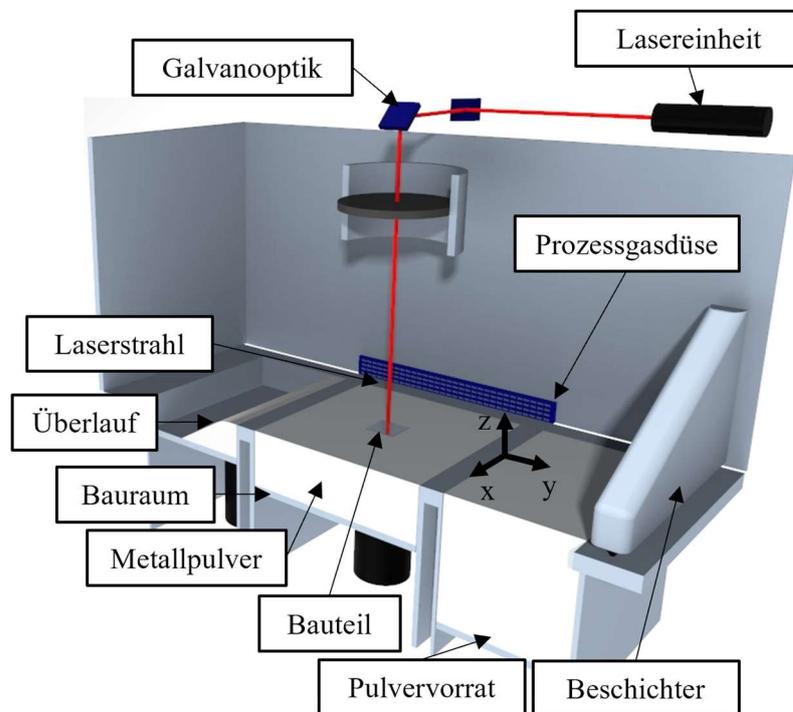


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten einer PBF-LB/M-Anlage sowie der drei verfahrensspezifischen Prozessschritte.

Während des ersten Prozessschrittes, des Beschichtens, wird die benötigte Pulvermenge entweder durch Anheben der Pulvervorratsplattform (Bottom-up-Prinzip – in Abbildung 2-1 dargestellt) oder durch eine Dosiereinheit aus einem Vorratsbehälter (Top-down-Prinzip), der oberhalb der Bauplatform positioniert ist, bereitgestellt. Ein Beschichtungsmechanismus, mit einer Klinge oder Rolle aus Material, welches auf den Bedarfsfall abgestimmt ist (Keramik, Metall, Kunststoff,

2.3 Verfahrensablauf des PBF-LB/M-Prozesses

Silikon oder Bürsten), verteilt das Pulver möglichst gleichmäßig auf der Bauplatte, überschüssig dosiertes Pulver wird in einen Überlauf befördert [61].

Zu beachten ist bei diesem Prozessschritt, dass nach Jansen et al. [62] die definierte Schichtdicke erst nach 6 bis 10 gefertigten Schichten vorliegt. Die Variationen der Schichtdicken resultieren zumeist aus der initialen manuellen Ausrichtung der Bauplatte. Diese muss vor Prozessbeginn im Abstand zum Beschichter, jedoch ebenso in Parallelität zur Horizontalen ausgerichtet werden.

Im zweiten Prozessschritt wird der Laserstrahl – zumeist werden Yb:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von ~ 1065 nm in den PBF-LB/M Anlagen verwendet – auf das Pulverbett fokussiert und mittels Galvanospiegel entlang der im Voraus definierten Scanvektoren geführt, die einen zweidimensionalen Querschnitt des zu fertigenden Bauteils ausfüllen. Bei ausreichender Energie, die bei diesem Prozessschritt in das Material eingekoppelt wird, erwärmt sich dieses bis zur oder über die Liquidustemperatur hinaus und wechselt die Phase vom festen in den flüssigen Zustand. Durch die Bewegung des Lasers prägen sich Schmelzbäder aus, die nach dem Erstarren des Materials als Schweißbahnen verbleiben. Die Scanvektoren werden so ausgelegt, dass sich in x/y-Ebene überlappende Schmelzspuren zu einer schmelzmetallurgischen Einheit verbinden, ebenso in z-Richtung. Während der Belichtung entstehen Prozessprodukte wie beispielsweise Kondensat, welches durch ein Verdampfen von Metall hervorgeht, herumfliegende Schmelztropfen oder lose Pulverpartikel, welche durch unterschiedliche physikalische Phänomene aus dem Pulverbett oder dem Schmelzbad geschleudert werden. Ein Teil dieser Prozessprodukte wird durch einen gerichteten Schutzgasstrom, dessen Geschwindigkeitsvektoren zumeist parallel zur Oberfläche der Bauplatte gerichtet sind, aus der Energieeinbringungszone entfernt, vgl. Abbildung 2-2. Unter Umständen können Interaktionen zwischen den Edukten und dem Laserstrahl auftreten, wodurch die Energie lokal reduziert, mit der das Material in der jeweiligen Schicht belichtet wird. [61, 63–66]

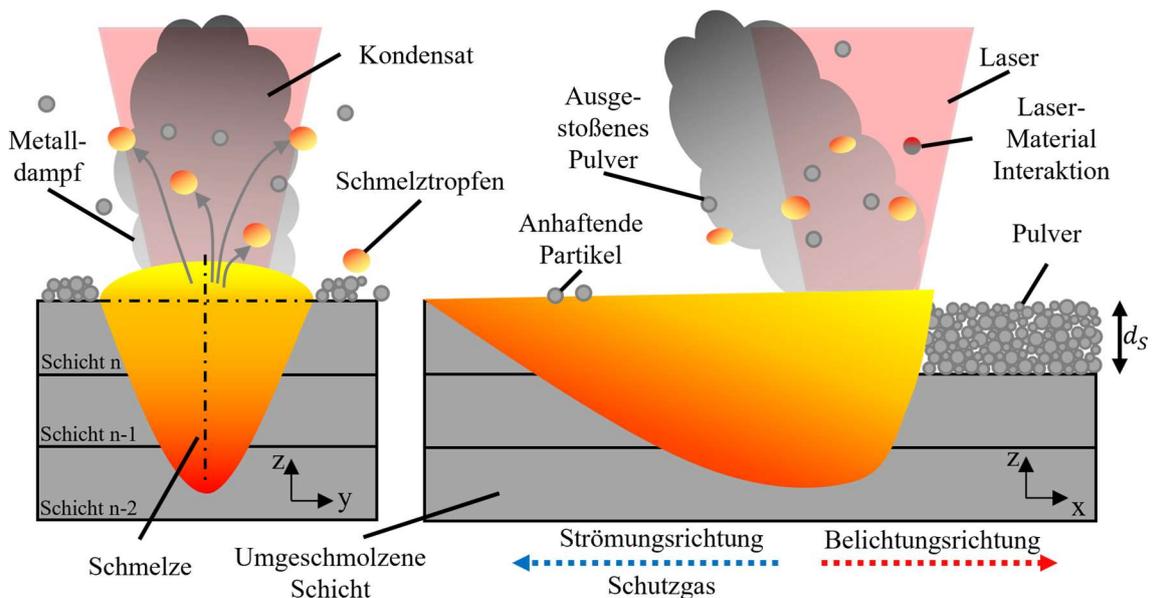


Abbildung 2-2: Typische Prozessprodukte im PBF-LB/M-Prozess: ausgestoßenes Pulver, Schmelztropfen, Metall-dampf, Kondensat sowie Interaktionen dieser Edukte mit dem Laserstrahl, in Anlehnung an [64].

Im dritten und letzten Prozessschritt folgt das Absenken der Bauplattform sowie des Pulvervorrates, sodass zunächst der Beschichter ohne Kollisionen mit den Komponenten im Bauraum in die Ausgangsposition verfahren kann. Anschließend wird durch erneutes Verfahren der Bauplattform die definierte Schichthöhe d_S eingestellt, eingezeichnet in Abbildung 2-2. Darauffolgend wird Prozessschritt eins bis drei zyklisch durchgeführt, bis alle Schichten, die zur Fertigung der Bauteile erzeugt werden müssen, belichtet wurden.

Für die Fertigung im PBF-LB/M-Prozess sowie besonders für das Umschmelzen des Materials in Prozessschritt 2 müssen material- und anlagenspezifische Parameter definiert werden. Darunter fallen solche wie die Scanstrategie, Temperatur der Bauplattform, Fokuslagen des Anlagenlasers, Prozessgasart oder Beschichtungsgeschwindigkeiten. Auf diese Parameter wird in diesem Abschnitt nicht weiter eingegangen, umfassende Beschreibungen finden sich in den Werken von Gebhardt et al. [53], Pei et al. [67] oder Yadroitsev et al. [22]. Die Parameter, die in der Literatur häufig als Prozessparameter des PBF-LB/M-Prozesses angegeben werden, sind in Formel (2-1) dargestellt [68–70]. Unter diese fallen die Laserleistung P_L in W , die Scangeschwindigkeit v_S in mm/s , mit der der Laser – durch beispielsweise Galvanometeroptiken – entlang der Scanvektoren geführt wird, ebenso wie der Abstand zwischen den Scanvektoren, der sogenannte Hatchabstand h in mm , sowie die gewählte Schichtdicke d_S in mm , mit der die Bauteile gefertigt werden. Aus diesen Parametern lässt sich nach Meiners [68] die sogenannte Volumenenergiedichte E_V in J/mm^3 ableiten, welche die theoretisch in ein Volumen eingebrachte Energie darstellt. Häufig wird diese als Vergleichsmaß für Prozessparameterkombinationen in der Literatur genutzt [71, 72]. Eine konkrete Zielgröße, anhand derer die Prozessparameter optimiert werden können, stellt sie jedoch nicht dar [73]. Denn nicht alle komplexen physikalischen Phänomene des PBF-LB/M werden dabei berücksichtigt. Beispielhaft werden solche nicht beachtet, die den Massen- und Wärmetransfer innerhalb des geschmolzenen Metallpools beeinflussen, wie z. B. Thermokapillarströmungen und hydrodynamische Instabilitäten [74]. Weiterhin hat die Laserleistung nach Keshavarzkermani et al. [75] einen stärkeren Einfluss auf die Dimensionen des Schmelzbades als beispielsweise die Scangeschwindigkeit und beeinflusst somit die Auswahl des Hatchabstandes stärker. Eine Übertragung der Prozessparameter von einer ersten zu einer anderen PBF-LB/M-Anlage, eventuell sogar unterschiedlicher Hersteller, nur anhand der Volumenenergiedichte oder ähnlicher Parameter ist somit nicht gewährleistet [76]. Dies gilt besonders, da der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls (d_L), der sich auf der Materialoberfläche ausprägt, von Anlage zu Anlage variieren kann. Trotzdem kann die E_V als erster Anhaltspunkt für Qualifizierungsstudien genutzt werden.

$$E_V = \frac{P_L}{v_S * h * d_S} \tag{2-1}$$

P_L	Laserleistung	in W	h	Hatchabstand	in mm
v_S	Scangeschwindigkeit	in mm/s	d_S	Schichtdicke	in mm
E_V	Volumenenergiedichte	in J/mm^3			

2.3 Verfahrensablauf des PBF-LB/M-Prozesses

Neben der Volumenenergiedichte wird die sogenannte Streckenenergie E_S in J/mm als Maß für den Energieeintrag genutzt, wobei diese aus den Parametern der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit berechnet wird, vgl. Formel (2-2).

$$E_S = \frac{P_L}{v_S} \quad (2-2)$$

P_L	Laserleistung	in W	v_S	Scangeschwindigkeit	in mm/s
E_S	Streckenenergie	in J/mm			

Die vorgestellten Prozessparameter sind für die defektfreie Verarbeitung im PBF-LB/M-Prozess ausschlaggebend und müssen für neue Materialien oder Übertragungen auf andere PBF-LB/M-Anlagen neu entwickelt oder angepasst werden.

In Abbildung 2-3 wird der Zusammenhang zwischen den gewählten Prozessparametern der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit schematisch in Bezug auf die resultierenden Materialeigenschaften bzw. das Auftreten von Defekten dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle restlichen Prozessparameter konstant gehalten werden. Ersichtlich wird, dass bei geringen Laserleistungen in Kombination mit hohen Scangeschwindigkeiten Defekte aus der Klasse Lack of Fusion – LoF (fehlende Verschmelzung) auftreten können, da die eingebrachte Volumenenergie zu gering ist, um das Material vollständig aufzuschmelzen. Keyhole-Porosität entsteht hingegen bei zu hoher eingebrachter Energie, wie sie durch eine Kombination hoher Laserleistungen bei geringen Scangeschwindigkeiten hervorgehen kann.

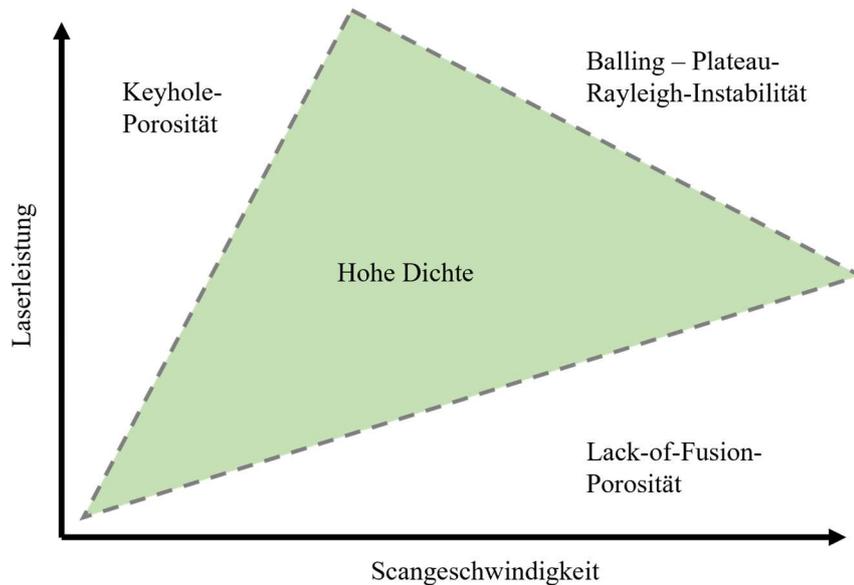


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Einflusses von Prozessparametern auf die resultierende Porosität: Keyhole-Defekte bei geringer Scangeschwindigkeit und hoher Laserleistung; Lack-of-Fusion-Defekte bei hohen Scangeschwindigkeiten und geringer Laserleistung; Balling bei hoher Scangeschwindigkeit und Laserleistung, in Anlehnung an [77].

Auch Kombinationen aus hohen Scangeschwindigkeiten und Laserleistungen können, obwohl theoretisch eine sinnvolle Volumenenergiedichte eingebracht wird, zu Ausprägungen von Defekten im Prozess führen, wie dem sogenannten Balling bzw. der Plateau-Rayleigh-Instabilität, dargestellt im oberen rechten Bereich. Möglichst defektfreies Material und somit solches mit hoher Dichte kann hergestellt werden, wenn die Kombination aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit zwischen den drei beschriebenen Bereichen definiert wird, schematisch dargestellt durch das grün eingefärbte Dreieck. [77, 78]

Die Ausprägungen dieser sowie weiterer Fehlerklassen, ebenso wie Ursachen und deren Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften von Bauteilen, werden im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

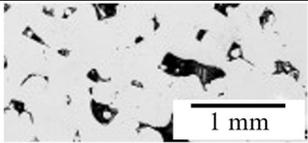
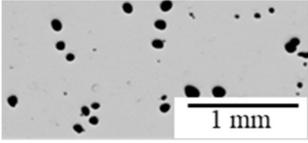
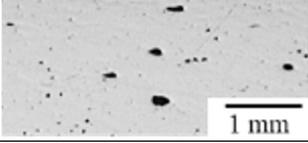
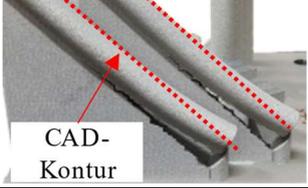
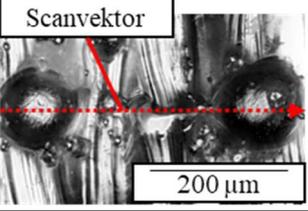
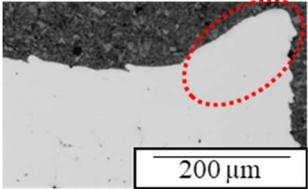
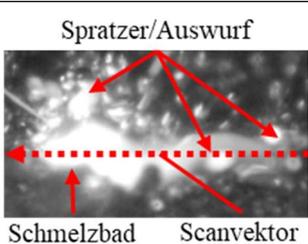
2.4 PROZESSIRREGULARITÄTEN UND IHRE EINFLÜSSE AUF DIE BAUTEILQUALITÄT IM PBF-LB/M

Die Qualität von PBF-LB/M-gefertigten Produkten ist von unterschiedlichen Faktoren und Prozessparametern abhängig, die bei falscher Auswahl zu Defektausprägungen im Material führen können. Typische Defekte, die im PBF-LB/M-Prozess auftreten können, sind in Tabelle 2-1 aufgeführt. Zu den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Defektklassen sind zusätzlich Fehler wie Risse und Delaminationen, Verformungen, Überhöhungen oder Spratzer bzw. Auswürfe von Partikeln dargestellt. Die Ursachen, die zu den einzelnen Defektarten aufgeführt sind, können dabei unter anderem auf prozesstypische hohe Dynamiken während des Umschmelzens zurückgeführt werden. Besonders die kurzen Zeitskalen bei der Belichtung der Materialien und das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der Schmelze führen zu hohen Abkühlraten, die in der Literatur zwischen $2 \times 10^5 \text{ K/s}$ und $1,6 \times 10^7 \text{ K/s}$ angegeben werden [79–83]. Die damit einhergehende schnelle Erstarrung der Schmelze führt beispielsweise zu Einschlüssen von Gasen und der Entstehung von Eigenspannungen, hervorgerufen durch lokale temperaturabhängige Volumenänderungen. Auch die hohen Dynamiken im Schmelzbad haben einen Einfluss auf die Defektausprägung. Ursächlich dafür ist beispielsweise der Marangoni-Effekt. Dieser beschreibt die Strömung innerhalb der Schmelze von Bereichen geringer Oberflächenspannungen zu solchen mit höheren Oberflächenspannungen [84, 85]. Weitere für den PBF-LB/M-Prozess typische Defekte sowie deren Ursachen können in der Richtlinie VDI 3405 Blatt 2.8 nachgelesen werden [86]. Auch wenn die Ursachen und Formen der Defekte unterschiedlich sind, so besitzen diese immer negative Auswirkungen auf die Prozessstabilität und/oder die mechanischen Eigenschaften von Komponenten [87–89]. Bei Defektarten wie großen Rissen oder Delaminationen droht zumeist sogar der totale Ausfall der Bauteile, da diese zu deutlich verfrühtem Versagen führen können. Defekte müssen für die sichere Anwendung der gefertigten Komponenten gänzlich vermieden oder zumindest detektiert werden, um deren Auswirkungen bewerten zu können. Dazu gehört, die ursprünglichen Phänomene der Defektausprägungen zu untersuchen und zu minimieren. Diese können unterschiedlich stark ausgeprägt sein und dadurch Einfluss auf den gesamten Bauraum besitzen oder lediglich lokal zu Variationen führen. Genannt werden beispielsweise verunreinigte Laserwindows, Kontaminationen des Metallpulvers,

2.4 Prozessirregularitäten und ihre Einflüsse auf die Bauteilqualität im PBF-LB/M

Scan- und Belichtungsstrategien, hohe Eigenspannungen, ungünstige Temperaturverteilungen, Defekte des Beschichters oder eine unzureichende Schutzgasversorgung [86].

Tabelle 2-1: Übersicht über verschiedene Defektarten, deren häufigste Ursachen sowie potenzielle Auswirkungen auf die resultierenden Produkte [19, 90].

Defektart	Häufige Ursachen	Potenzielle Auswirkungen	Bilder der Defekte
Lack-of-Fusion-Poren	Zu geringer Energieeintrag	Reduzierung der mechanischen und Ermüdungseigenschaften	
Gasporen	1. Gas aus dem Grundmaterial; 2. Durch Schmelze eingeschlossenes Gas	Reduzierung der Ermüdungseigenschaften	
Keyhole-Poren	Zu hoher Energieeintrag in das Material	Reduktion der mechanischen und Ermüdungseigenschaften	
Risse und Delaminationen	1. Eigenspannungen, die die lokale Zugfestigkeit überschreiten; 2. Unzureichender Verbund zwischen den Schichten	Ausfall/Versagen der Komponenten; Reduktion der mechanischen Eigenschaften	
Verformung (engl.: deformations)	Eigenspannungen, die die lokale Streckgrenze überschreiten	Abweichungen der Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie	
Balling	1. Zu niedriger/hoher Energieeintrag; 2. Oxidation der Oberfläche	Ausfall/Versagen der Komponenten; Hervorrufen anderer Defekte	
Überhöhungen (engl.: rippeling)	Instabilitäten während des Schichtauftrages	Ausfall/Versagen der Komponenten; Prozessabbrüche im PBF-LB/M	
Spratzer/Auswurf von Partikeln	1. Überhitztes Schmelzbad 2. Rückspuldruck und Schmelzfahne	Hervorrufen anderer Defekte	

Zur Vermeidung von Defektausprägungen werden Prozessbedingungen eingestellt, wie z. B. Strömungsgeschwindigkeiten des Prozessgases oder der Sauerstoffgehalt in der Anlage, aber auch optische Analysen des Pulverauftrages oder von Schmelzbadintensitäten durchgeführt, um Randbedingungen konstant zu halten. Ebenso müssen robuste Prozessparametersätze entwickelt werden, die ein möglichst großes Potenzial besitzen, sodass Schwankungen der Prozessbedingungen nicht zu Ausprägungen von Defekten führen. Wie in Tabelle 2-1 beschrieben oder in Abbildung 2-3 dargestellt, lassen sich davon Handlungsbedarfe zur Parameteroptimierung ableiten. Grundsätzlich können Defekte in Klassen nach dem Erscheinungsbild, wie im Folgenden beschrieben, unterteilt werden:

1. **Gasporen:** Sphärisch oder kugelförmig, gleichmäßig verteilt oder in Clustern.
2. **Keyhole-Poren:** Unregelmäßiger als Gasporen, oft länglich und entlang der Schmelzbadgrenzen mit glatten Oberflächen.
3. **Lack of Fusion:** Poren mit unregelmäßiger Oberfläche, oft zwischen den Schweißbahnen.
4. **(Thermische) Risse:** Längliche Risse, die typischerweise entlang der Erstarrungsrichtung verlaufen, weisen ein hohes Aspektverhältnis auf.

Um Defekte automatisiert hinsichtlich der Defektklassen einordnen zu können, kann deren Zirkularität bestimmt werden, ein Formfaktor, mit welchem die geometrische Gestalt eines Objektes in Relation zu einem Kreis beschrieben werden kann [91]. Die Zirkularität wird nach Gleichung (2-3) bestimmt. Dazu wird zunächst die Fläche A_K des Defekts ermittelt. Ausgehend von dieser Fläche wird der Umfang eines flächeninhaltsgleichen Kreises U_K ermittelt. Durch das Verhältnis von U_K zum Umfang des gemessenen Objektes U_P kann die Formabweichung zu einem Kreis beschrieben werden. Ein Wert der Zirkularität von 1 bedeutet dabei, dass die geometrische Form einen perfekten Kreis darstellt. Je niedriger der Wert von c_O ausfällt, desto weiter ist die Form von der eines Kreises entfernt. [92]

$$c_O = \frac{U_K}{U_P} = \frac{4 \times A_K \times \pi}{U_P^2} \quad (2-3)$$

U_K	Umfang des flächeninhaltsgleichen Kreises
U_P	Umfang des detektierten Objektes
A_K	Gemessene Fläche des Objektes

Für Gasporen ergibt sich somit, dass diese eine Zirkularität nahe 1 aufweisen; je unregelmäßiger die Defekte werden, desto stärker sinkt dieser Wert. Lange Risse weisen niedrige Werte nahe 0 auf, da diese einen geringen Flächeninhalt, aber relativ große Umfänge besitzen. LoF-Defekte befinden sich in der Mitte der beiden beschriebenen Defektklassen. Anhand der geometrischen Gestalt der Defekte bzw. der Sphärizität lässt sich zumeist auch deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften bewerten. Nach Al-Maharma et al. [93] besitzen Defekte, die eine unregelmäßige Form aufweisen, mit einer Zirkularität nahe 0, den größten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. In Veröffentlichungen, in denen der Zusammenhang zwischen genutzten Prozessparametern, resultierender Materialdichte und den

2.4 Prozessirregularitäten und ihre Einflüsse auf die Bauteilqualität im PBF-LB/M

mechanischen Eigenschaften untersucht wird, wird zumeist ein Ansatz genutzt, bei dem der gesamte Probekörper mit variierenden Prozessparametern gefertigt wird. Durch die Variation der Prozessparameter werden Defekte der Art LoF (zu geringer Energieeintrag), Gas- oder Keyhole-Poren (zu hoher Energieeintrag) stochastisch verteilt im Bauteil hervorgerufen. In allen Veröffentlichungen können Beeinflussungen einzelner mechanischer Eigenschaften, wie die maximale Zugfestigkeit, die Bruchdehnung, Härten und weitere, nachgewiesen werden [94–96]. Deutlicher fällt der Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften aus, wenn sie der Klasse der LoF zuzuordnen sind. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von Al-Maharma et al. [93] überein, die Defekte auch anhand der Position unterteilen.

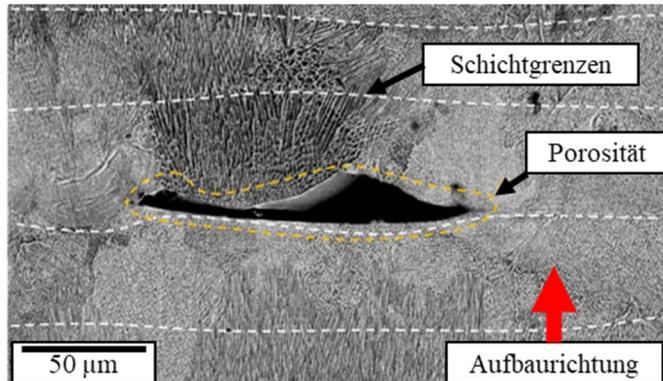


Abbildung 2-4: Rekonstruktion aus Xia et al. [97]: LoF-Defekt, der zwischen zwei Schichten ausgeprägt ist.

Dabei werden drei Bereiche unterschieden: Defekte treten im Vollmaterial auf, Defekte entstehen zwischen den Schichten oder diese treten an den Grenzflächen der Matrix auf. Den Defekten, die zwischen den Schichten auftreten (siehe Abbildung 2-4), wird der größte Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zugewiesen, besonders wenn Bauteile in Aufbaurichtung belastet werden. Solche Defekte (LoF-Klasse) treten zumeist auf, wenn zu wenig Energie in das Material eingebracht wird.

Auch wenn die meisten Defekte unterhalb des Schmelzbades auftreten, können diese zumeist von Anomalien der Schmelzbadcharakteristika oder durch Untersuchungen der Einzelspuren abgeleitet werden. In Abbildung 2-5 sind in a) und b) Veränderungen von Einzelspuren in Abhängigkeit von variierten Prozessparametern (Laserleistung und Schichtdicke) dargestellt, wobei Schmelzbadbreiten variieren und Anomalien, wie der Effekt des Ballings, bei sinkenden Volumenenergiedichten vermehrt auftreten. In c) ist hingegen eine Anomalie dargestellt, bei der die Schmelzbadbreite während der Fertigung der Schicht lokal variiert hat.

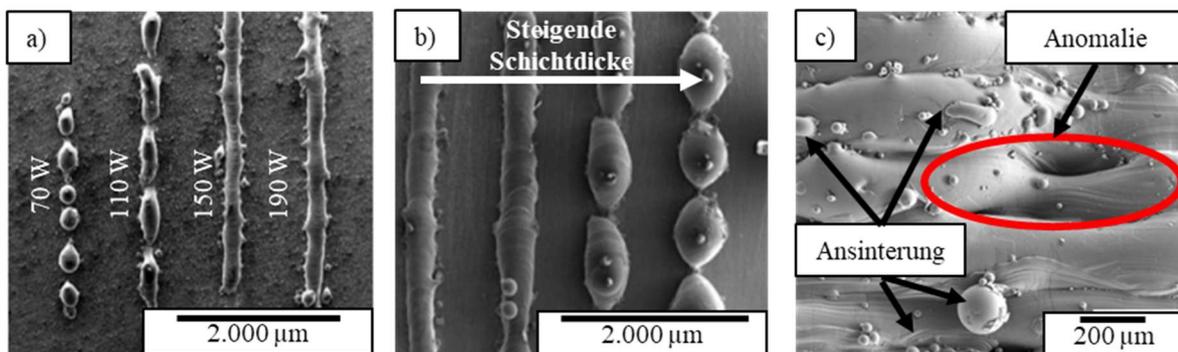


Abbildung 2-5: Anomalien der Schmelzbahnen: a) an Einzelspuren, durch Variation der Laserleistung; b) an Einzelspuren, durch Variation der Schichtdicke, beide rekonstruiert aus [98]; c) in einer belichteten Schicht [99].

Analysen der Schmelzbadgeometrie bzw. der resultierenden Einzelspuren können somit als geeignetes Mittel angesehen werden, um das Auftreten von Defekten zu untersuchen. Obwohl es bislang schon eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze gibt, ist bislang kein System bekannt, das die benötigten Anforderungen, wie beispielsweise lokale oder zeitliche Auflösungen, in Kombination mit einer Eignung zur Echtzeitmessung erfüllt oder mit dem mechanische Eigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Komponenten vorhergesagt werden kann. In unterschiedlichen Veröffentlichungen, in denen eine Literaturübersicht dargestellt wird, wird der Bedarf nach ebensolchen Systemen verdeutlicht, um den Prozess hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit weiter optimieren zu können. [90, 100, 101]

Dass ein solches System noch nicht existiert, ist auch auf weitere Einflussfaktoren zurückzuführen, die auf die mechanischen Eigenschaften von PBF-LB/M-Komponenten wirken. So untersuchen Bang et al. [102] den Einfluss von Prozessparametern auf die mechanischen Eigenschaften anhand des Materials SUS316L, einer modifizierten Legierung von 316L. Durch eine Erhöhung der Volumenenergiedichte können Keyhole-Poren hervorgerufen werden. Durch diese werden die maximale Zugfestigkeit sowie die Bruchdehnung reduziert, die Härte steigt jedoch an. Selbiges Verhalten kann auch an Proben festgestellt werden, die mit erhöhter Volumenenergiedichte gefertigt wurden, an denen jedoch keine Defekte ausgeprägt sind. Zurückgeführt werden kann dieses Verhalten auf einen steigenden Sauerstoffgehalt in den Proben sowie eine Vergrößerung der Körner.

Durch einen Vergleich der Veröffentlichungen von Donik et al. [103] und Sanchez-Avila et al. [104] kann die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Fokusbereich des genutzten Anlagenlasers und von der dimensionalen Ausprägung des Schmelzbades verdeutlicht werden. In beiden Arbeiten wird das Material 316L im PBF-LB/M-Prozess verarbeitet. Durch einen größeren Fokusbereich von 200 μm und die damit benötigten Anpassungen der Prozessparameter zur Erzeugung hoher Dichten wird eine höhere maximale Zugfestigkeit (936 MPa) erreicht als bei Durchmessern von 80 μm (711 MPa).

Mahmoudi et al. [105] zeigen auf, dass die mechanischen Eigenschaften des Materials 1.4542 bzw. GP1 von Schichtzeiten (t_s) und somit von Temperaturzyklen während der Fertigung abhängig sind. Die Autoren fertigten in zwei Prozessen vertikal ausgerichtete Probekörper für Zugversuche. Während der ersten Fertigungsreihe wurden 10 Proben ($t_s = 50\text{ s}$) aufgebaut, in der zweiten lediglich eine ($t_s = 10\text{ s}$). Dadurch resultieren veränderte Temperaturzyklen, wobei der Anteil von Austenit von 13,0 % auf 26,3 % in dem Probekörper steigt, der einzeln gefertigt wurde. Gleichzeitig steigen die maximale Zugfestigkeit sowie die Bruchdehnung der Probekörper an.

Afkhami et al. [76] zeigen am Material Ti6Al4V jedoch auf, dass die mechanischen Eigenschaften nicht nur von der Ausprägung von Defekten abhängen. Die Autoren weisen nach, dass die mechanischen Eigenschaften auch von den gewählten Prozessparametern und somit Schmelzbadcharakteristika beeinflusst werden. Dazu werden Eigenschaften von Probekörpern verglichen, die mit variierten Parametern gefertigt wurden, jedoch eine Dichte größer 99,98 % aufweisen. Zurückgeführt werden kann dieses

2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess

Phänomen auf variierte Temperaturzyklen, die die Ausprägung des Gefüges bzw. der resultierenden Korngrößen beeinflussen.

Kim et al. [106] können den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Defektausprägung und die mechanischen Eigenschaften am Material GP1 bzw. 1.4542 nachweisen. Die Dichte der gefertigten Komponenten nimmt in Abhängigkeit von der Pulverfeuchtigkeit um bis zu 7,86 % ab. Maximale Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen nehmen dabei um bis zu 21,25 % bzw. 15,02 % ab. Die hauptsächlich ausgeprägten Defekte sind sphärisch und können der Defektklasse der Gasporen zugewiesen werden. Vermutet wird, dass durch Verdampfungen der Restfeuchtigkeit Gase entstehen, die in der Schmelze eingeschlossen werden.

Die beschriebenen Phänomene und Ursachen decken nicht alle Faktoren ab, die zur Ausprägung von Defekten in PBF-LB/M-Prozessen führen können, zeigen jedoch die vorhandene Vielfalt auf. Damit sollten sie einen ausreichenden Überblick über die Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften bieten. Abgeleitet werden kann davon, dass Auswertungen mittels Monitoringsystemen der resultierenden mechanischen Eigenschaften selbst bei Probekörpern mit simpler Geometrie herausfordernd sind. Ein Überblick über bereits genutzte Systeme zur Detektion von Defekten im PBF-LB/M-Prozess sowie mögliche Methoden, die dazu genutzt werden können, wird im nächsten Abschnitt gegeben.

2.5 IN-SITU-PROZESSMONITORING FÜR DEN PBF-LB/M-PROZESS

In diesem Abschnitt wird ein vertiefter Einblick zu verschiedenen Prozess-Monitoringsystemen für den PBF-LB/M-Prozess gegeben, wobei diese nach Auflösungsgenauigkeit von Defekten sowie den genutzten Messsignalarten unterteilt werden. Weiterhin wird die Methodik der Laser-Speckle-Photometrie beschrieben, eine Messmethode mit Potenzial zur Erkennung von Defekten unterhalb der Oberfläche. Zusätzlich werden die physikalischen Grundlagen zur Detektion der vom Schmelzbad emittierten Intensitäten in Bezug auf thermische Emissionen behandelt, sodass die Funktion solcher Systeme nachvollzogen werden kann.

2.5.1 Bislang verwendete Prozessmonitoring-Systeme im PBF-LB/M

Das Verfahren des PBF-LB/M bietet durch den schichtweisen Aufbau die Möglichkeit, lokale Analysen der resultierenden Materialeigenschaften in situ (am Ort der Entstehung) durchzuführen [4, 7, 12, 19, 107]. Bereits in der Vergangenheit wurde diese Eigenschaft genutzt, um Ansätze zum Live-Monitoring von Bauteileigenschaften zu entwickeln und deren Potenziale bewertet. Nach Grasso et al. [28] lassen sich die vorhandenen Methoden zum Prozessmonitoring in fünf Beobachtungsebenen (Ebene 0 bis Ebene 4), je nach Auflösung der Phänomene, unterteilen. Auf Ebene 0 werden anlageneigene Sensoren zur Regelung von Umgebungsbedingungen im PBF-LB/M-Prozess genutzt, wie die Sauerstoffkonzentration, Prozessgastemperatur, Druck in der Prozesskammer oder Bauplattformtemperatur. Eine lokale Auflösung von Phänomenen wie Defekten, die die Materialeigenschaften von Bauteilen beeinflussen, ist somit nicht möglich. Je höher die Ebene des Monitorings ist, desto stärker ist die lokale Auflösung, sodass lokale Phänomene und Irregularitäten an Bauteilen genauer aufgelöst werden können. Ebene 1

beschreibt Messungen, die einmal (oder mehrmals) pro Schicht durchgeführt werden. Der Bereich, in dem Eigenschaften analysiert werden, kann sich dabei auf den gesamten Baubereich oder auf einen Bereich mit besonderem Interesse (engl.: *region of interest* – ROI) erstrecken. Dabei können zwei Gruppen von Prozesssignaturen betrachtet werden. Die erste bezieht sich auf Größen, die die Homogenität des Pulverbetts repräsentieren und/oder Verunreinigungen im Pulverbett detektieren. Die zweite betrifft entweder geometrische und dimensionale Merkmale der gefertigten Schicht oder deren Oberflächentopografie. Auf Ebene 2 werden Prozesssignaturen erfasst, während der Laser innerhalb des Baubereiches fokussiert wird, um die aktuelle Schicht zu erzeugen. Hierbei können unter anderem die Laser-Material-Wechselwirkung sowie die thermische Historie des Prozesses oder dessen Nebenprodukte wie Spritzer und Schmauch beobachtet werden. In Ebene 3 werden lokale Phänomene durch zweidimensionale Analysen in der x/y-Ebene am höchsten aufgelöst. Als Beispiel für diese Untersuchung nennen Grasso et al. die Analyse von Schmelzbadeigenschaften, welche es ermöglichen, die Ausprägung von Defekten lokal zu untersuchen. Anders als in den bisher vorgestellten Ebenen werden in Ebene 4 keine zweidimensionalen Messungen durchgeführt, sondern solche, die das gefertigte Volumen der Schichten bewerten. Messmethoden, die diese Kriterien erfüllen, können zumeist nur an speziellen Prototyp-Maschinenkonfigurationen durchgeführt werden. So werden zum Beispiel Querschnitt-Röntgenbildgebung, aber auch Ultraschall- und Schallemissionen genannt, die durch die Freisetzung elastischer und plastischer Verformungen im erstarrten Material verursacht werden. Grundlegend erhöhen sich die Datenmenge sowie die Komplexität und der zeitliche Aufwand für die Auswertung mit jeder Ebene. So sind Messmethoden der vierten Ebene bislang nicht für die industrielle Anwendung nutzbar. Der Bedarf und das Forschungsinteresse an Prozess-Monitoringsystemen für den PBF-LB/M-Prozess können durch die steigende Anzahl an Veröffentlichungen in diesem Bereich abgeleitet werden.

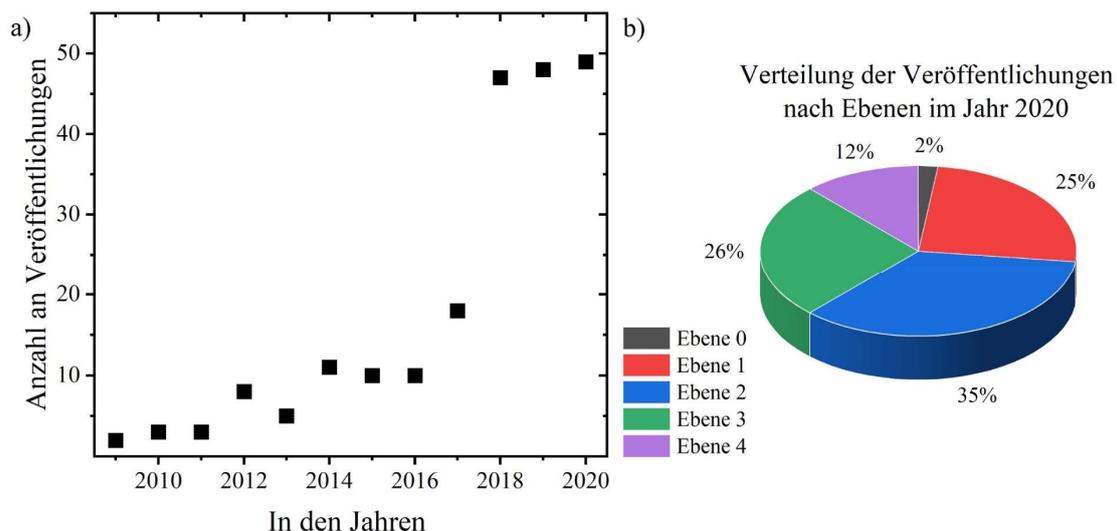


Abbildung 2-6: a) Anzahl von Veröffentlichungen mit dem Schwerpunkt in-situ-Erfassen und/oder in-situ-Überwachung im PBF-LB/M-Prozess in den Jahren 2010 bis 2020; b) Verteilung der im Jahr 2020 veröffentlichten Ergebnisse hinsichtlich der betrachteten Ebene, in Anlehnung an [28, 108].

2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess

In Abbildung 2-6 a) ist die Anzahl der Veröffentlichungen pro Jahr von 2009 bis 2020 aufgetragen, wobei ein starker Anstieg zwischen dem Jahr 2017 und 2018 ersichtlich wird. Den höchsten Anteil an der Entwicklung haben Systeme der Ebene 2 mit 35 %, Ebene 3 folgt mit einem Anteil von 26 %.

Neben der Klassifizierung der Prozess-Monitoringsysteme hinsichtlich der Auflösungsebene können diese nach Herzog et al. [19] durch die Art der genutzten Signale unterteilt werden. Dabei unterscheiden die Autoren folgende Messsignale:

1. **Sichtbares Licht:** Ermöglicht hochauflösende Bilder des Fertigungsprozesses mit High-Speed-Kameras. Je nach Auflösung der Kameras und Objektive können Defekte auf unterschiedlichen Skalen detektiert werden.
2. **Thermische Emission:** Ermöglicht die Überwachung von Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von emittierten Intensitäten auf unterschiedlichen Skalen, um Defekte wie Risse und Poren zu erkennen. Eine Beschreibung der Grundlagen dieser Messmethode erfolgt in Unterabschnitt 2.5.3.
3. **Lichtintensität:** Fotodioden erfassen die Lichtintensität eines schmalen Wellenlängenbereiches, wobei eine Auswertung in Echtzeit ermöglicht wird.
4. **Atomare Emissionsspektren:** Durch die lokal hohe eingebrachte Energie entstehen hohe Temperaturen im Schmelzbad, die Verdampfungen und die Entstehung von Plasma begünstigen können. Das Emissionsspektrum des Plasmas wird analysiert und die chemische Zusammensetzung bestimmt.
5. **Akustische Wellen:** Schallwellen werden während des Bauprozesses analysiert, um Defekte wie Poren und Risse im Inneren der Bauteile detektieren zu können.

Messsysteme, die keines der aufgezeigten Messsignale nutzen, werden unter ‚andere‘ gelistet. Zusätzlich stellen die Autoren in prozentualen Anteilen dar, wie häufig die unterschiedlichen Signalarten für Prozess-Monitoringsysteme in Veröffentlichungen in den Jahren von 2017 bis 2023 genutzt wurden,

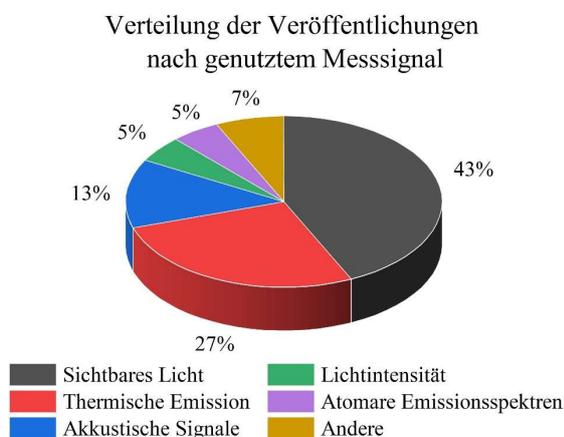


Abbildung 2-7: Verteilung der Veröffentlichungen im Bereich des Prozessmonitorings in Abhängigkeit von den genutzten Messsignalen von 2017 bis 2023, in Anlehnung an [19].

vgl. Abbildung 2-7. Deutlich wird, dass der Anteil von Systemen, die sichtbare Wellenlängen oder thermische Emissionen analysieren, mehr als die Hälfte (70 %) der entwickelten Systeme ausmacht. Der große Anteil dieser Systeme in der Forschung wird mit den potenziellen Stärken dieser begründet, zu denen beispielsweise die hohe lokale Auflösung mit bis zu wenigen µm pro Pixel gehören kann. Ebenso ermöglichen die Systeme Mehrfachauswertungen von Charakteristiken anhand der eingehenden Messsignale. So können Parameter wie

Schmelzbadbreiten und -längen, lokale thermische Historien oder Ausprägungen des Schmelzbades in der Betrachtungsebene abgeleitet werden, sodass eine möglichst große Menge an Daten zur Bewertung der resultierenden Materialeigenschaften genutzt werden kann. Laut Xiong et al. [32] besitzen solche Systeme ein hohes Potenzial zur Detektion von Defekten.

Goossens et al. [109] haben beispielsweise eine Methode zur Analyse der Schmelzbadbreiten entwickelt, bei der infrarote Wellenlängen mittels einer koaxial ausgerichteten Hochgeschwindigkeitskamera detektiert werden. In den Experimenten kam eine EoSens® 3CL Hochgeschwindigkeitskamera von Mikrotron GmbH zum Einsatz, die Videos mit einer Bildrate von 20 000 FPS, einer Belichtungszeit von 50 μ s und einer räumlichen Auflösung von 11,8 μ m x 11,8 μ m pro Pixel aufzeichnete. Es wurde gezeigt, dass die Breiten der Schmelzbäder, die mit verschiedenen Kombinationen von Prozessparametern (Scangeschwindigkeit von 400 mm/s bis 1 100 mm/s; Laserleistung von 100 W bis 600 W) erzeugt wurden, mit einem durchschnittlichen Fehler von -2,8 % und einer Standardabweichung von 18,5 % bestimmt werden können. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass die Schmelzbadbreiten je nach Parameterkombination um bis zu -54,05 % unterschätzt oder um bis zu 35,59 % überschätzt werden können. Die Autoren erkennen als Ursache dafür auch die lokale Auflösung als mögliche Fehlerquelle und verweisen auf die Relation zwischen der räumlichen Auflösung eines Pixels und der erwarteten Schmelzbadbreite, das 10,32 % beträgt.

Yuan et al. [111] untersuchten mit einer High-Speed-Kamera die Schmelzbadbreite und die Kontinuität am Material 316L auf einer Aconity LAB Systems Anlage der Firma Aconity3D. Dazu wurden Videos mit einer Rate von $f = 1\,000\text{ FPS}$ bei einer Auflösung eines Pixels von 14 μ m Kantenlänge aufgenommen, in welchen der sichtbare Wellenlängenbereich das Signal darstellte. Zusätzlich musste eine Hoch-Intensitäts-LED genutzt werden, um den Bildbereich ausreichend auszuleuchten. Kamera und LED waren in den Strahlengang integriert. Die Auswertung der Schmelzbadbreiten erfolgte mit einem Convolutional-Neural-Network (CNN)-Ansatz, wobei eine Genauigkeit der Werte mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,93$ angegeben wird. Die Kontinuität der Schmelzbahnen wird in 93,1 % der Fälle korrekt erkannt.

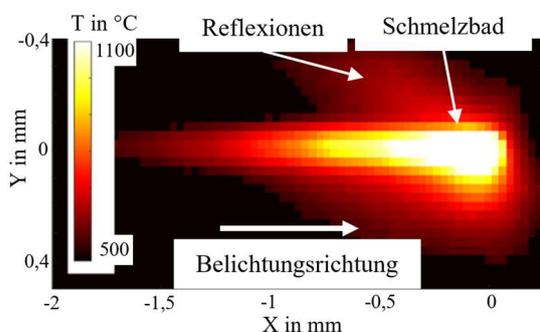


Abbildung 2-8: Strahlungsprofil des Schmelzbades im PBF-LB/M während der Belichtung einer Substratplatte, rekonstruiert aus [110].

Lane et al. [110] führten Untersuchungen zur Analyse der Schmelzbahnbreiten und -längen mit einer High-Speed-Kamera an einer PBF-LB/M-Forschungsanlage (Additive Manufacturing Metrology Testbed – AMMT) durch. Dabei wurden Einzelspuren mit drei unterschiedlichen Parametersätzen (1. Referenz mit $P_L = 195\text{ W}$; $v_S = 800\text{ mm/s}$ 2. Erhöhung der Volumenenergiedichte um 54 %, 3. Reduzierung der Volumenenergiedichte um 33,33 %) auf einer Substratplatte aus einer Nickel-

basis-Superlegierung 625 (IN625) analysiert. Dabei wurde mit der High-Speed-Kamera ein infraroter

2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess

Wellenlängenbereich von $850 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ betrachtet und eine Korrelation der Intensitäten mit realen Temperaturen anhand eines schwarzen Strahlers durchgeführt, vgl. Abbildung 2-8. In der Arbeit wird dargestellt, dass somit Temperaturen in einem Bereich zwischen $1\ 000 \text{ °C}$ und $1\ 650 \text{ °C}$ bei einer Belichtungszeit von $20 \text{ }\mu\text{s}$ und 900 °C und $1\ 350 \text{ °C}$ bei $100 \text{ }\mu\text{s}$ aufgelöst werden können. Die Auflösung (zeitlich) entspricht $f = 10\ 000 \text{ FPS}$ beziehungsweise $3,28 \text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge pro Pixel. Die Autoren führen an, dass trotz der vereinfachten Messungen (Belichtung der Substratplatten ohne Pulvermaterial), welche für die Kalibrierung von Simulationsmodellen genutzt werden, Abweichungen durch optische Unschärfen von bis zu $28,8 \text{ }\mu\text{m}$ entstehen können.

Ein Überblick der bislang verwendeten Signalarten für die in-situ-Detektion von Defekten sowie deren lokaler und zeitlicher Auflösung ist in Tabelle 2-2 gegeben. Die Ergebnisse von Lane et al. [110] sind dabei nicht aufgeführt, da sich diese lediglich auf Messungen ohne Pulvermaterial beziehen. Die höchsten lokalen Auflösungen, die in der Literatur ermittelt wurden, betragen $14 \text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge je Pixel, wobei eine zeitliche Auflösung von $10\ 000 \text{ FPS}$ genutzt wurde.

Tabelle 2-2: Lokale und zeitliche Auflösungen verschiedener optischer Messsysteme, eingesetzt in PBF-LB/M-Prozessen.

Signalart	Sensor	Analyseebene	Auflösung in $\mu\text{m}/\text{Pixel}$	Aufnahmeraten in FPS	Quellen
Sichtbare Wellenlängen	Einzelne Bilder / Videos	Schmelzbad	14 – 340	60 – 100 000	[112–115]
Infrarote Wellenlängen	Pyrometer	Schmelzbad	3,96 – 21	9 300 – 100 000	[116–118]
	Infrarote Bildgebung	Schmelzbad	30 – 760	50 – 90 000	[110, 119, 120]

Eine vielversprechende, bislang für den PBF-LB/M-Prozess noch nicht angewandte Methode zur Detektion von Defekten stellt die Laser-Speckle-Photometrie (LSP) dar, ein optisches, zerstörungsfreies Prüfverfahren. Die Messmethode und die bisherigen Anwendungsgebiete werden im nächsten Unterabschnitt im Detail vorgestellt.

2.5.2 Laser-Speckle-Photometrie

Die LSP ist eine Messmethode, die auf der eindimensionalen Auswertung von Speckle-Mustern basiert. Die grundlegende Theorie, ebenso wie eine mathematische Herleitung dieser Muster, wird in den Arbeiten von Dainty [121] und Rabal [122] vertieft beschrieben. Ein Speckle-Muster ist ein Interferenzmuster, das entsteht, wenn kohärentes Licht – im sichtbaren Wellenlängenbereich – von einer unebenen Oberfläche reflektiert wird und auf eine Beobachtungsebene trifft. Durch die Reflexion des Lichtes an einer Probenoberfläche, mit statistisch verteilten Rauheitsspitzen und -tälern, prägen sich in der Beobachtungsebene statistisch verteilte lokale Intensitätsmaxima und -minima aus, wie in Abbildung 2-9 a) und b) dargestellt. Wie in diesen Abbildungen ersichtlich, ist der Einfallswinkel des kohärenten Lichtes ein entscheidender Faktor für die Ausprägung der Speckle-Muster. So können Intensitätsmaxima entstehen, wenn durch Rauheiten Licht auf die Beobachtungsebene reflektiert wird. Minima hingegen

resultieren, wenn durch Rauheitsspitzen Bereiche hervorgehen, die durch diese verdunkelt werden, skizziert in Abbildung 2-9 a) mit grüner bzw. roter Linie. Die Beobachtungsebene, den Bereich, in dem die Intensität des reflektierten kohärenten Lichtes ausgewertet wird, stellt bei der LSP-Messung zumeist ein CMOS- oder CCD-Sensor von Kameras dar [121, 123].

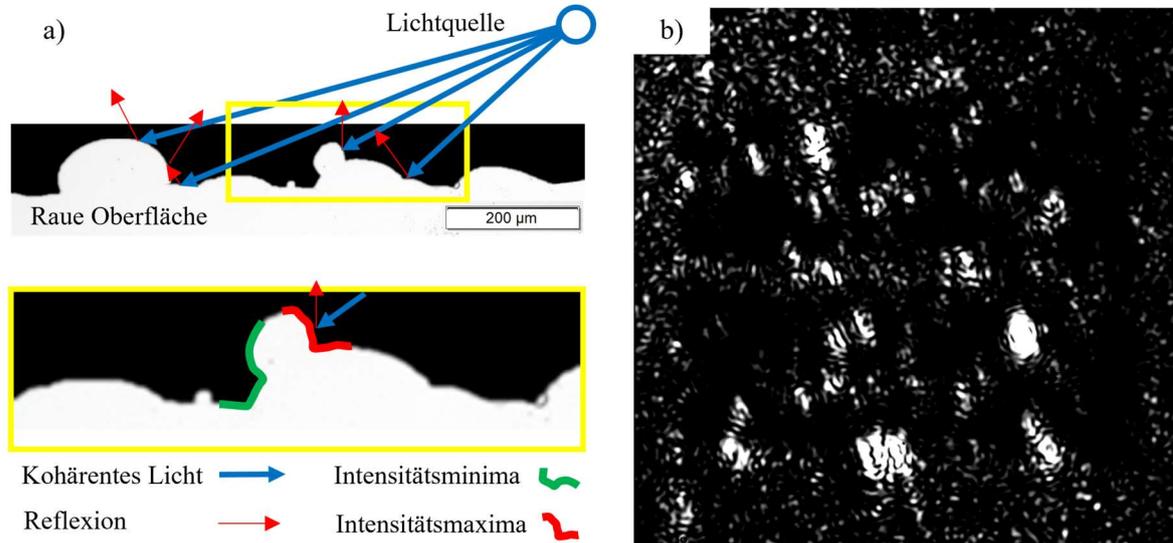


Abbildung 2-9: a) Reflexion von kohärentem Licht auf einer rauhen Oberfläche sowie die daraus resultierenden Bereiche mit Intensitätsminima und -maxima b) Resultierendes Bild aus der Beleuchtung einer rauhen Oberfläche mit kohärentem Licht.

Die LSP kann somit in die 1. Kategorie der Sensoren nach Herzog et al. [19] eingeteilt werden, in solche, die Intensitäten im sichtbaren Wellenlängenbereich analysieren.

Die Auswertung von Speckle-Mustern lässt sich in statische und dynamische Analysen unterteilen, vgl. Abbildung 2-10. Im statischen Fall werden die durchschnittliche Intensität sowie deren Verteilung eines Bildes analysiert, um erste Erkenntnisse über die Oberflächentopografie der betrachteten Probe gewinnen zu können. Dafür werden in der Regel alle Pixel respektive Intensitäten im Bild ausgewertet.

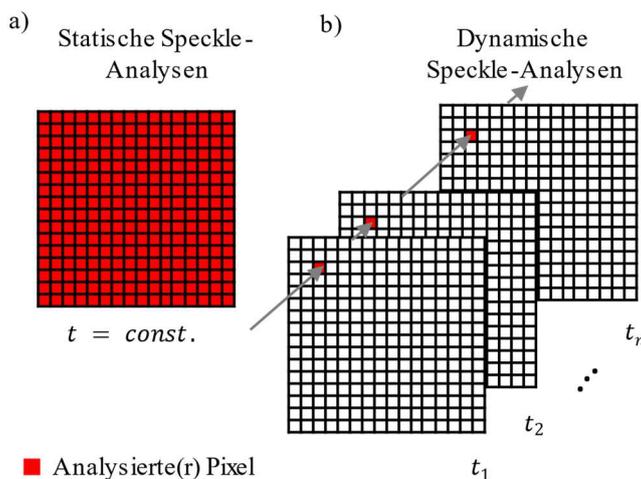


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Auswertemöglichkeiten von Speckle-Mustern a) statische Analyse eines Pixels in einem Bild, b) dynamische Analyse eines Pixels anhand aufeinanderfolgender Bilder (t_1 bis t_n).

Horvath et al. [124] nutzten diesen Zusammenhang, um Oberflächenrauheiten metallischer Probekörper zu bestimmen, indem der im Bildausschnitt gemittelte Intensitätswert, ebenso wie die Standardabweichung, mit den Rauheiten korreliert wurde. Zur Analyse weiterführender Materialeigenschaften, wie der Dichte oder des Spannungszustands des Materials, müssen hingegen zeitliche Veränderungen der Speckle-Muster, die sogenannten

2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess

quasistatischen Speckle-Dynamiken, ausgewertet werden, siehe Abbildung 2-10 b). Hierzu werden Videosequenzen aufgezeichnet, bei gleichzeitig erfolgender reproduzierbarer thermischer oder mechanischer Anregung der Oberfläche. Durch die hervorgerufene Ausdehnung der Oberfläche wird die Reflexion des kohärenten Lichtes auf der Oberfläche beeinflusst. Die Speckle-Muster weisen dabei eine zeitliche Veränderung ebenso wie bei der anschließenden Schrumpfung auf. Hierbei wird ausgenutzt, dass die lokale thermisch oder mechanisch angeregte Ausdehnung des Probekörpers in einem engen Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften des Materials steht, sodass die Speckle-Änderungen charakteristisch für das Material und dessen Zustand sind. [39, 125, 126]

Grundsätzlich gilt, dass mit der LSP alle Materialien oder Prozesse analysiert werden können, die eine induzierte oder eigens angetriebene zeitliche Veränderung der Oberflächentopografie aufweisen. Somit ist es auch möglich, z. B. Wachstumsprozesse von Biomasse, wie Wurzeln unter der Erdoberfläche, zu untersuchen.

Weitere Anwendungs- bzw. Forschungsbereiche der LSP-Technik sind bislang:

- Analyse der okulären Durchblutung des Auges durch Speckle-Flowgraphy in der Medizintechnik [38]
- Analyse des Wachstums von Pflanzen bzw. der Masse von Wurzeln [39, 42]
- Inline-Monitoring der Qualität von Schweißprozessen [40, 127]
- Ansätze zur Detektion von Materialeigenschaften an Bauteilen aus Keramiken [41, 128, 129], Metallen [43, 130, 131] oder Kunststoffen [44]
- Ex-situ-Porositätsanalysen PBF-LB/M-gefertigter Komponenten [45, 132]

Deutlich wird dabei das große Potenzial der LSP zur Bestimmung lokaler Eigenschaften auf unterschiedlichen Skalenebenen, wobei Phänomene auf Skalen, wie das Auftreten kleiner Defekte in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten, bislang noch nicht untersucht wurden. Ebensolche Untersuchungen sind Teil dieser Arbeit. Versuche zur Integration der LSP-Messtechnik in den PBF-LB/M-Prozess und Aus- sowie Bewertungen des Signals in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften werden in den Ergebnissen (Abschnitt 5.3) diskutiert. Eine Anpassung der Messmethode an die Anforderungen im PBF-LB/M-Verfahren ist durch eine gezielte Auswahl an Objektiven sowie Kameras möglich und verspricht eine hohe Flexibilität in der Anwendung. Ein schematischer Aufbau des Prüfstandes, der in Zusammenarbeit mit Dang et al. [132] für die ex-situ-Analyse von PBF-LB/M-gefertigten Komponenten angewandt wurde, ist in Abbildung 2-11 dargestellt. Nach diesem Aufbau werden drei Hauptkomponenten benötigt, um eine LSP-Messung durchführen zu können:

1. Ein **Speckle-Laser**, typisch mit einer Wellenlänge von $532\text{ nm} - 650\text{ nm}$, zur Belichtung der Werkstückoberfläche und somit zur Erzeugung der statischen Speckle-Muster.
2. Ein **Kamerasystem mit einem CCD- oder CMOS-Sensor**, ausgestattet mit einer für den Anwendungsfall **geeigneten Optik**, zur Aufzeichnung der Speckle-Muster.

3. Eine geeignete Hardware, z. B. ein **kontinuierlicher oder gepulster Laser**, zur thermischen Anregung der Werkstückoberfläche.

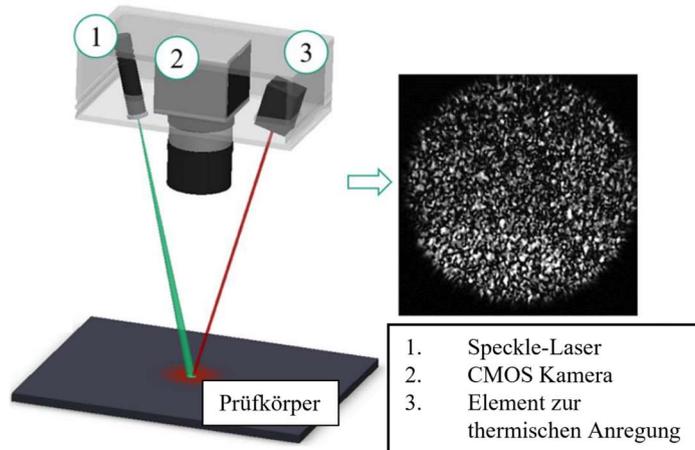


Abbildung 2-11: Schematischer Aufbau eines Laser-Speckle-Photometrie-Messsystems mit dessen Hauptkomponenten sowie ein beispielhaftes Bild von Speckle-Mustern, in Anlehnung an [132].

Zusätzlich zu den dargestellten Komponenten wird ein Computer zur Auswertung benötigt. Die Auswertung der Daten erfolgt manuell und bislang sequenziell nach der Datenaufnahme. Dabei muss z. B. der Auswertebereich im Bildbereich definiert werden. [129, 132]

Der erste Schritt zur Auswertung der LSP-Daten stellt die Ermittlung des Intensitätswertes I eines jeden Pixels $P(x, y, \tau)$ im definierten Auswertebereich und in jedem auszuwertenden Bild bzw. in jedem Frame τ des Videos dar. Anschließend wird dieser Wert in Abhängigkeit von der Position sowie dem Frame gespeichert als $I(x, y, \tau)$. Die Intensitätswerte, die von der High-Speed-Kamera mit CMOS-Sensor aufgenommen werden, können zwischen 0 und 255 variieren. Der Wert 0 (schwarzer Pixel) ist gleichbedeutend mit einer Intensität, die geringer ist als die vom CMOS-Sensor detektierbare. Der Wert von 255 (weißer Pixel) hingegen weist auf eine Strahlung hin, die maximal detektierbar oder sogar höher ist. Für die beiden beschriebenen Werte ist eine absolute Aussage über deren Eigenschaften somit nicht möglich.

Ein Ansatz, der von Dang [133] angewandt wird, um die quasistatischen Speckle-Dynamiken auszuwerten, ist in Formel (2-4) dargestellt. Der Wert $C(\tau)$ beschreibt dabei die normierte Änderung der Intensitäten im Auswertebereich, welche durch Start- und Endwert entlang der x - bzw. y -Achse definiert sind, zum Zeitpunkt τ . Im Nenner des Bruches wird zunächst die Differenz zwischen den Intensitäten zum betrachteten Zeitpunkt τ und der ursprünglichen Intensität ($\tau = 0$) gebildet. Der Betrag der Änderung wird durch die Intensität zum Zeitpunkt $\tau = 0$ geteilt, wodurch der Einfluss der initialen Intensitätsverteilung auf das Messsignal berücksichtigt werden soll.

2.5 In-situ-Prozessmonitoring für den PBF-LB/M-Prozess

$$C(\tau)|_{\tau=1}^{\tau_{max}=n} = \sum_{x_{start}}^{x_{end}} \sum_{y_{start}}^{y_{end}} \frac{\langle |I(\tau, x, y) - I(0, x, y)| \rangle}{\langle I(0, x, y) \rangle} \quad (2-4)$$

Um die Funktionswerte der LSP-Messungen unabhängig von der Intensität im ersten Frame darstellen zu können sowie ein Grundrauschen des Messsignals, welches einen Offset der $C(\tau = 0)$ hervorruft, minimieren zu können, subtrahiert Dang [133] den Messwert zum Zeitpunkt $\tau = 0$, wie in Formel (2-5) dargestellt. Auf die ex-situ-Messungen von Probekörpern mit variierenden Dichten wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, bei bestehendem Interesse wird auf die Arbeit von Dang verwiesen.

$$C(\tau)|_{\tau=1}^{\tau_{max}=n} = \sum_{x_{start}}^{x_{end}} \sum_{y_{start}}^{y_{end}} \frac{\langle |I(\tau, x, y) - I(0, x, y)| \rangle}{\langle I(0, x, y) \rangle} - C(\tau = 0) \quad (2-5)$$

2.5.3 Physikalische Grundlagen zur Detektion infraroter Wellenlängen im PBF-LB/M

Prozess-Monitoringsysteme, mit welchen die Qualität additiv gefertigter Komponenten anhand thermischer Emissionen bewertet werden, nutzen den Zusammenhang zwischen Temperaturen von Körpern und der damit korrelierenden emittierten Intensität aus. Denn grundsätzlich emittiert jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von 0 K elektromagnetische beziehungsweise thermische Strahlung. Dieser Zusammenhang wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Es gibt an, wie viel Energie pro Zeit- und Flächeneinheit in jedem Bereich des elektromagnetischen Spektrums (z. B. Infrarot, sichtbares Licht oder UV-Strahlung) in Abhängigkeit von der Temperatur emittiert wird, siehe Abbildung 2-12. Mathematisch kann dieser Zusammenhang in verschiedenen Varianten dargestellt werden, wobei die Form durch die gewählte Abhängigkeit von der Frequenz, Wellenlänge, Intensität der Strahlung abhängt, aber auch davon, ob Strahlengröße, Energiedichte oder Photonenzahl beschrieben werden soll. Die Planck-Funktion für die spektralspezifische Intensität M_λ^0 eines schwarzen Strahlers ist in Formel (2-6) aufgeführt.

$$M_\lambda^0(\lambda, T) dA_p d\lambda = \frac{2\pi h_p c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h_p c / \lambda k T} - 1} dA_p d\lambda \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (2-6)$$

h_p	Planck-Konstante	Js	λ	Wellenlänge	nm
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s	k	Boltzmann-Konstante	J/K
A_p	Fläche	mm^2	T	Temperatur	K

Hierbei steht h_p in Js für das Planck'sche Wirkungsquantum, c für die Lichtgeschwindigkeit in m/s , k für die Boltzmann-Konstante in J/K , A_p für die Größe der betrachteten Fläche in mm^2 , λ für den Wellenlängenbereich in nm und T für die Temperatur des Körpers in K [134–136]. Anhand der Planck-Funktion kann abgeleitet werden, dass das Integral der spektralen Intensität der Strahlung mit steigender Temperatur des Körpers zunimmt. Ebenso vergrößert sich das Intervall, in dem Strahlung emittiert wird, wobei mit steigender Temperatur Intensitäten mit immer kürzeren Wellenlängen hervorgehen. Dabei

prägt sich ein temperaturabhängiges Maximum der emittierten Strahlung an einer Wellenlänge λ_{max} aus, siehe Abbildung 2-12.

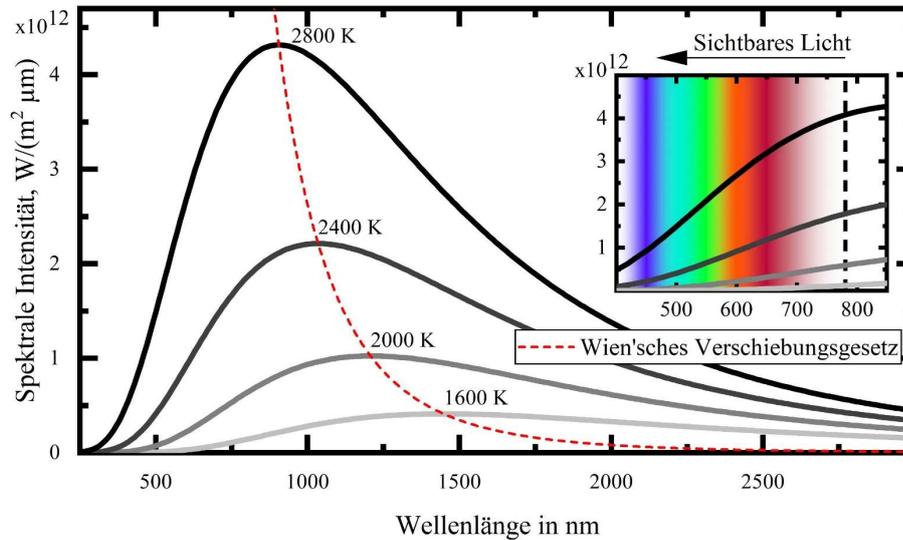


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der emittierten Intensitäten eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge in nm und der Temperatur in K, nach Formel (2-6). Ebenso aufgetragen sind das Wien'sche Verschiebungsgesetz nach Formel (2-7) sowie die resultierenden Farben der Strahlungen bei variierenden Wellenlängen.

Die Wellenlänge λ_{max} , an dem das Maximum der Planck-Funktion vorliegt, kann durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschrieben werden, welches in Formel (2-7) dargestellt ist.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \tag{2-7}$$

Der Parameter b stellt dabei die Wien'sche Konstante dar, welche $b = 2,897 \cdot 10^{-3}$ in mK entspricht. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz besagt, dass die Wellenlänge des Maximums der Planck-Funktion umgekehrt proportional zur Temperatur des Körpers ist. Zu beobachten ist dieser Zusammenhang bei glühenden Probekörpern. Je höher die Temperatur eines Körpers wird, desto bläulicher erscheint die emittierte Farbe. Zurückzuführen ist dies auf den Wellenlängenbereich, in dem Licht blau wahrgenommen wird, der von ca. 420 nm bis ca. 490 nm reicht. Bei geringeren Temperaturen erscheint die emittierte Intensität rötlich (Wellenlängen von ca. 650 nm bis ca. 780 nm), vergleiche Abbildung 2-12.

Auch Planck ermittelte, dass die spektrale Energiedichte der Strahlung, die von einem schwarzen Körper ausgesendet wird, proportional zur Frequenz und zur Temperatur ist. Ein schwarzer Körper ist ein ideales Modell eines Körpers, der alle Strahlung, die auf ihn trifft, vollständig absorbiert und keine Strahlung reflektiert oder durchlässt. Der schwarze Körper wird weiterhin als Referenz zur Bestimmung des Emissionsgrades genutzt. Ein idealer schwarzer Körper emittiert die maximale mögliche Strahlung für eine gegebene Temperatur, unabhängig von der Wellenlänge. Der Emissionsgrad ε eines realen Körpers wird als Verhältnis der von ihm emittierten Strahlung (M) zu der von einem idealen schwarzen Körper bei gleicher Temperatur emittierten Strahlung definiert, vgl. Formel (2-8).

$$\varepsilon = \frac{M}{M_{\text{schwarz}}} \quad (2-8)$$

Der Emissionsgrad kann somit theoretisch in einem Wertebereich zwischen 0 und 1 liegen. Dabei würden Körper, die einen Emissionsgrad von 0 aufweisen, einem so bezeichneten weißen Körper zugeordnet, welcher jedoch nur theoretisch existiert. Ein weißer Körper wäre ein solcher, der alle einfallende Strahlung reflektiert und gleichzeitig keine Strahlung emittiert. Beispiele für Körper, die einem weißen Körper in ihren Eigenschaften nahekommen, sind Hochleistungsspiegel zur Reflexion von Intensitäten. Körper, die einen Emissionsgrad zwischen 0 und 1 aufweisen, werden indes als graue Körper bezeichnet. Der Emissionsgrad eines Körpers kann nach dem Kirchhoffschen Gesetz gleich dem Absorptionsgrad α , dem Anteil an Intensität, die ein Körper von einer aufgetragenen Strahlung aufnehmen kann, gesetzt werden. Dabei gilt nach Formel (2-9), dass die Absorption dem Emissionsgrad entspricht.

$$\alpha = \varepsilon \quad (2-9)$$

Ein Körper, der viel Strahlung emittiert, ist somit auch ein solcher, der ein hohes Maß an einfallender Strahlung absorbiert. Der restliche Anteil, der nicht absorbierten Strahlung, wird entweder reflektiert ρ oder transmittiert τ_p . Dabei entspricht die Summe dieser Werte immer 1, vgl. Formel (2-10).

$$\alpha + \rho + \tau_p = 1 \quad (2-10)$$

Für opake (undurchsichtige) Körper bzw. Materialien, sowie im PBF-LB/M genutzt, entfällt der Anteil der Transmission ($\tau_p = 0$). Reflexion und Absorption stehen somit in einem direkten Verhältnis, wobei gilt, dass die nicht absorbierte Strahlung reflektiert wird, dargestellt in Formel (2-11).

$$\rho = 1 - \alpha \quad (2-11)$$

Zu beachten ist dabei, dass die von einem Körper ausgehende Intensität I im gesamten Wellenlängenbereich immer der Summe aus dem reflektierten Anteil der eingehenden Strahlung sowie dem emittierten Anteil der thermischen Strahlung entspricht, verdeutlicht in Formel (2-12).

$$I = \rho + \varepsilon \quad (2-12)$$

Schematisch dargestellt ist dieser Zusammenhang in Abbildung 2-13. Da für Analysen der Schmelzbadtemperaturen davon ausgegangen wird, dass lediglich temperaturabhängige Emissionen detektiert werden, muss die reflektierte Strahlung des Anlagenlasers gefiltert werden. In Ansätzen, in denen High-Speed-Videographie mit CMOS-Sensoren zur Bestimmung unterschiedlicher Schmelzbadcharakteristika eingesetzt wird, werden deshalb Filter genutzt, die lediglich Intensitäten mit definierten Wellenlängen transmittieren, vgl. Abbildung 2-8. Lane et al. [110] nutzen hierzu beispielsweise Filter mit einer Bandweite der transmittierten Wellen von 830 nm bis 850 nm. Die gewählten Wellenlängenbereiche,

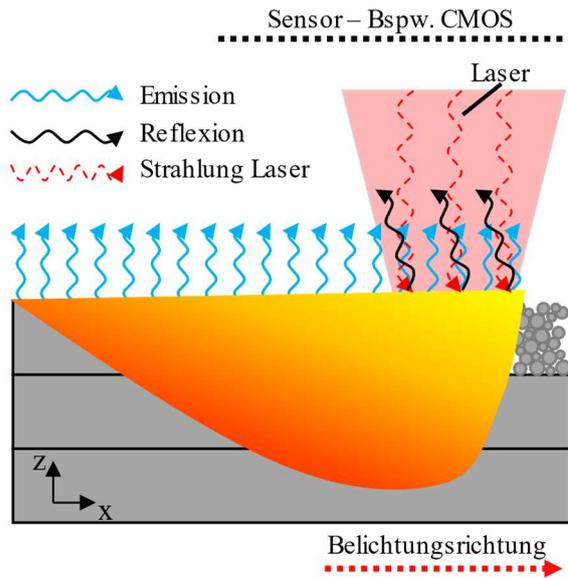


Abbildung 2-13: Übersicht der Intensitäten, die von einem Schmelzbad im PBF-LB/M-Prozess ausgehen.

die ausgewertet werden, bestimmen nach dem Planck'schen Gesetz die Temperaturbereiche, die ermittelt werden können. Die beiden vorgestellten Messmethoden, die LSP und die Analyse von Emissionen des Schmelzbades mittels High-Speed-Kamera, wurden in dieser Arbeit ausgewählt, um deren Potenzial zur Detektion von Defekten in situ im PBF-LB/M-Prozess zu untersuchen. Besonders für die zuletzt genannte Methode stellt sich die Frage, welches Potenzial Erhöhungen räumlicher und zeitlicher Auflösungen besitzen. Die konkreten Fragestellungen, die sich für beide Systeme ableiten, sind nachfolgend beschrieben.

3 ZIELSETZUNG UND WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN

3.1 AUSWIRKUNG VON DEFEKTEN AUF MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Die Vielzahl an Ursachen, die zu lokalen Ausprägungen von Defekten im PBF-LB/M führen, können während der Fertigung im PBF-LB/M nicht vollumfänglich erfasst werden. Obwohl häufig schon für die Pre-Prozesse einzuhaltende Maßnahmen definiert werden, um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen, können Unregelmäßigkeiten während der Prozesse zur Ausprägung lokaler Defekte führen. Verunreinigungen oder Beschädigungen wie Kratzer auf dem Lasereintrittsglas, veränderte Geschwindigkeitsprofile des Prozessgases, Beschädigungen der Klingen von Beschichtern, aber auch Verunreinigungen oder lokal erhöhte Feuchtigkeitsgehalte von Pulvern können unter anderem Ursachen darstellen. Um zielgerichtet Prozessmonitoring-Systeme entwickeln zu können, muss der Einfluss von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Für diese Dissertation leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

- Wie wirken sich die Größe, Position und Anzahl von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus?
- Ab welcher Größe sind Defekte in Bauteilen für die Anwendung tolerierbar?
- Welche mechanischen Eigenschaften werden hauptsächlich von Defekten beeinflusst?
- Wie unterscheidet sich der Einfluss von Defekten auf das Materialversagen in horizontaler und vertikaler Belastungsrichtung?

3.2 POTENZIALE VON MESSMETHODEN ZUR IN-SITU-DEFEKTDETEKTION

Obwohl die Entwicklung von Prozess-Monitoringsystemen durch die Forschung ebenso wie in der Industrie stets und mit hoher Motivation vorangetrieben wird, gelingt nur selten die reproduzierbare Vorhersage der Entstehung von kleineren Defekten ($< 200 \mu\text{m}$) in Größe, Form und Lage. In dieser Dissertation werden die LSP-Methode sowie ein Ansatz zur High-Speed-Videographie (HSV) angewandt, um in-situ-Defekte während der Fertigung im PBF-LB/M-Prozess ermitteln zu können. Die folgenden Forschungsfragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden:

- Welches Potenzial besitzt die LSP-Methode zur Schaffung technologischer Fortschritte, um Defekte in PBF-LB/M-Prozessen in-situ detektieren zu können?
- Welches Potenzial besitzt eine Steigerung der lokalen und zeitlichen Auflösung der HSV zur Detektion von Defekten im PBF-LB/M?

4 VERSUCHSMETHODIK

4.1 METHODEN FÜR DEN PBF-LB/M-PROZESS

4.1.1 Genutzte Fertigungsanlagen

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zwei PBF-LB/M-Anlagen für die experimentellen Untersuchungen genutzt: eine EOSINT M270, hergestellt von der EOS GmbH, und eine SLM 280 HL der Firma SLM Solutions Group AG (heute Nikon SLM Solutions AG).

Die EOS M270, dargestellt in Abbildung 4-1 a), besitzt einen Yb-Faserlaser mit einer variablen Ausgangsleistung von maximal $P_L = 200 \text{ W}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Über einen Hochgeschwindigkeits-Scanner (bis zu $7,0 \text{ m/s}$) und mit einer F-Theta-Linse wird der generierte Laserstrahl auf die Bauplattform respektive das pulverförmige Ausgangsmaterial fokussiert. Im Voraus ist eine manuelle Einstellung des Fokusdurchmessers stufenweise zwischen $100 \mu\text{m}$ und $500 \mu\text{m}$ möglich. Das Bauvolumen von $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$ (in x-, y-, z-Richtung) ermöglicht die variable Fertigung von Bauteilen unterschiedlicher Größen. Nach dem Bottom-up-Prinzip erfolgt die Bereitstellung der benötigten Pulvermenge pro Schicht, wozu der Pulvervorrat um eine definierte Höhe verfahren wird. Die Verteilung des Pulvers über die Bauplattform erfolgt anschließend mit dem Beschichter. Der verwendete Beschichter wurde am Lehrstuhl für Fertigungstechnik neu konstruiert, sodass Silikonschnüre mit einem Durchmesser von 10 mm als Klingen verwendet werden können.

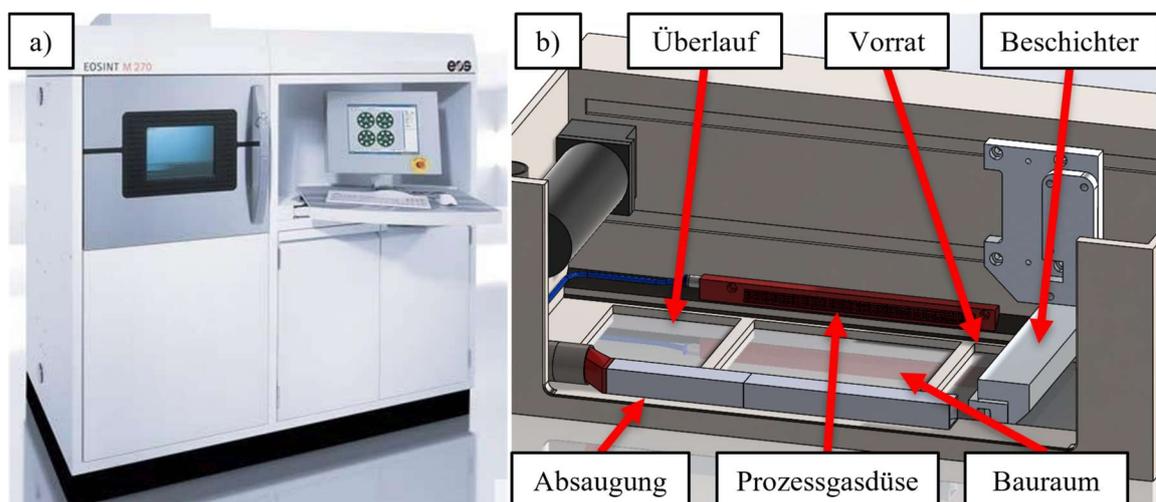


Abbildung 4-1: a) PBF-LB/M-Fertigungsanlage EOS M270 der EOS GmbH aus [137]; b) Schematische Darstellung des Bauraumes der EOS M270 nach durchgeführter Anpassung des Prozessgasstromes mit neuer Prozessgasdüse und Absaugung.

Weitere Änderungen im Vergleich zur Grundausstattung der EOS M270 wurden im Rahmen dieser Dissertation an der Prozessgasführung vorgenommen. Der Prozessgasstrom (Stickstoff), welcher im Originalzustand aus einer Düse um das Lasereintrittsfenster von der Decke der Anlage mit Drall auf die Bauplattform gerichtet ist, wurde optimiert, sodass ein möglichst gleichmäßiger und laminarer Prozessgasstrom parallel über das Baufeld geführt wird (siehe Abbildung 4-1 b)). Dadurch soll eine möglichst

4.1 Methoden für den PBF-LB/M-Prozess

effektive, reproduzierbare sowie homogene Bewegung von Prozessprodukten in Richtung der Absaugung erreicht werden, welche besonders für optische Messverfahren, wie die Laser-Speckle-Photometrie, ein wichtiger Faktor sein kann.

Die SLM 280 HL besitzt zwei unabhängig voneinander operierende Yb-Faserlaser, welche jeweils eine variable, maximale Ausgangsleistung von 700 W besitzen. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung der Laser weicht leicht von der der EOS M270 ab und liegt bei $\lambda = 1\,040\text{ nm}$. Durch den verbauten XY-Scanner können Scangeschwindigkeiten bis zu 15 m/s erreicht werden, wobei der Fokussdurchmesser des Laserstrahls mittels Vario-Scanner adaptiv in einem Bereich zwischen 80 μm und 120 μm variiert werden kann. Der leicht größere Bauraum von 280 mm x 280 mm x 365 mm ermöglicht in Kombination mit der parallelen Nutzung beider Laser sowie einer Optimierung der Belichtungsparameter hinsichtlich Fertigungsdauern eine wirtschaftlichere Fertigung. Mit dem Top-down-Prinzip erfolgt die Bereitstellung des Pulvers: Das Ausgangsmaterial wird in einen Vorratstank eingefüllt und über eine Welle, versehen mit Nuten, in definierter Menge bereitgestellt. Der Beschichter mit einer Silikonklinge verteilt das Material auf der Bauplattform. Über eine Sinterwand sowie eine Prozessgasdüse wird der Prozessgasstrom parallel zur Plattform und orthogonal zur Beschichtungsrichtung über die Bauplattform geführt.

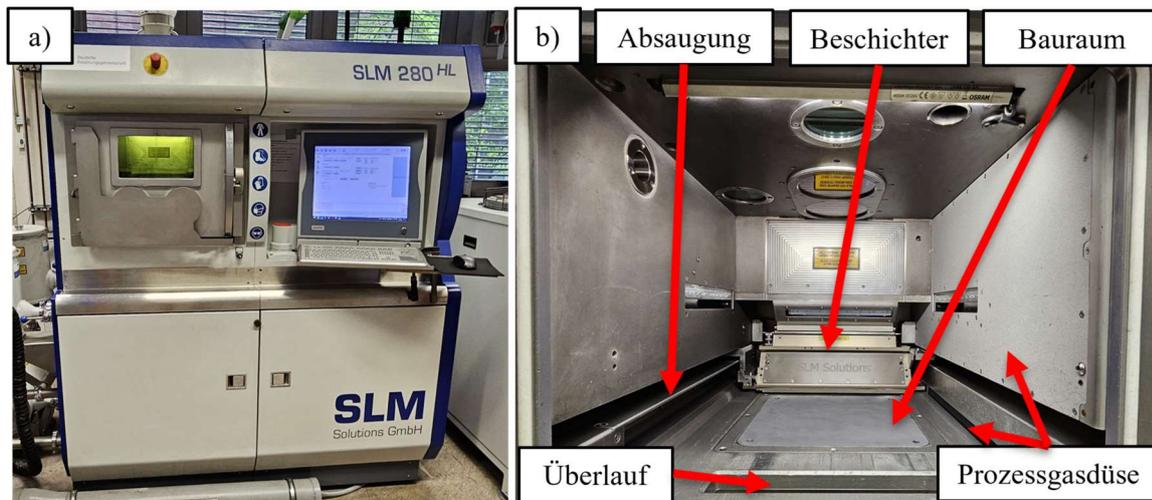


Abbildung 4-2: a) PBF-LB/M-Fertigungsanlage SLM 280 HL des Anlagenherstellers Nikon SLM Solutions AG; b) Bauraum der Anlage mit den wichtigsten Komponenten.

Ausgewählte Eigenschaften der beiden für diese Versuche genutzten Anlagen sind in Tabelle T 1 im Anhang zusammengefasst.

4.1.2 Verarbeitete Materialsysteme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Materialsysteme genutzt. Zum einen wurde auf der EOS M270 (siehe 4.1.1) das Material EOS GP1 der Firma EOS GmbH verarbeitet, ein nichtrostender martensitischer Stahl, welcher der europäischen Werkstoffnummer 1.4542 entspricht. Die Materialauswahl wurde innerhalb eines AIF-IGF-Forschungsprojektes „In-situ-Überwachung und Optimierung additiver Laser-Strahlschmelzprozesse durch Speckle-Sensorik“ mit dem Förderkennzeichen 20079 N

in Abstimmung mit Forschungs- und Industriepartnern getroffen. Das Material wird aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit häufig für medizinische Instrumente eingesetzt [76].

Auf der SLM 280 HL hingegen wurde das Material DEW Printdur 4404 (316L) der Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG verarbeitet. Dieses Material entspricht ebenfalls einem nichtrostenden Stahl, bildet jedoch ein austenitisches Gefüge aus und ist der europäischen Werkstoffnummer 1.4404 zuzuordnen. Die Materialauswahl ist dabei auf das Forschungsvorhaben „*Untersuchung der Laser-Material-Wechselwirkung von funktionalisierten diamantimprägnierten Metallmatrix-Verbunden im Laser-Strahlschmelzen*“ – WI 2118/17-1, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), zurückzuführen. Anwendung findet das duktile Material mit hoher Korrosionsbeständigkeit unter anderem in der Automobil-, Lebensmittel- und chemischen Industrie sowie der Luft- und Raumfahrt [76]. Die Grenzen für die chemischen Zusammensetzungen beider Legierungen sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung der verarbeiteten Materialien EOS GP1 und DEW 316L nach den jeweiligen Datenblättern.

Konzentration der jeweiligen Elemente in Atom-%												
Material		Fe	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Mo	Nb	C	P	S
EOS GP1 [138]	Min	Bal.	15,00	3,00	3,00				0,15			
	Max		17,50	5,00	5,00	1,00	1,00	0,50	0,45	0,07		
DEW 316L [139]	Min	Bal.	16,00	10,00				2,00				
	Max		18,00	14,00		2,00	1,00	3,00		0,03	0,03	0,10

Weitere physikalische und mechanische Eigenschaften der beiden Legierungen sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Für die Untersuchungen mittels HSK-System sind die Liquidus- und Solidustemperatur wichtig, da anhand dieser die Schmelzbadbreiten und -längen abgeleitet werden können.

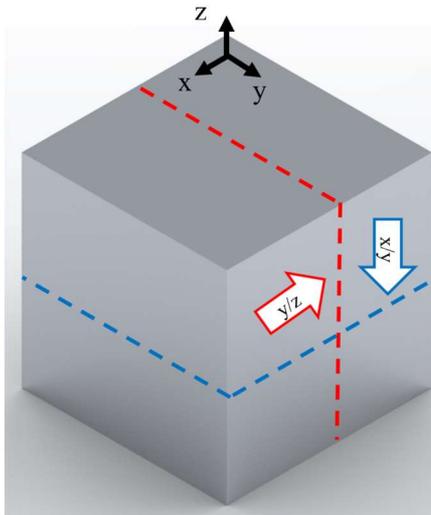
Tabelle 4-2: Ausgewählte mechanische Eigenschaften der verarbeiteten Materialien EOS GP1 und DEW Printdur 4404 bzw. DEW 316L.

Eigenschaft	EOS GP1 [138]		DEW 316L [139]	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Zugfestigkeit R_m in MPa	930 ± 50	960 ± 50	655 ± 15 [140]	605 ± 50
Bruchdehnung A in %	31 ± 5	35 ± 5	36 ± 5 [140]	45
Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	586 ± 50	570 ± 50	555 ± 15 [140]	490 ± 50
Solidustemperatur T_S in °C	1 245 – 1 440 [141, 142]		1 392 – 1 401 [143–145]	
Liquidustemperatur T_L in °C	1 429 – 1 440 [141, 142]		1 400 – 1 445 [143–146]	
Dichte ρ_V in g/cm ³	7,8		7,9	

4.2 ANALYTISCHE METHODEN

4.2.1 Lichtmikroskopie – metallografische Präparation und Durchführung

Um Materialeigenschaften von gefertigten PBF-LB/M-Probekörpern bewerten zu können, eignet sich das optische Verfahren der Lichtmikroskopie. Mit diesem kann festgestellt werden, ob prozesstypische Defekte wie LoF-Defekte, Gasporen oder Risse in den Probekörpern vorhanden sind. Bevor lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt werden können,



- - - Trennebene parallel zur y/z-Ebene
- - - Trennebene parallel zur x/y-Ebene

Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Trennebenen, von denen die Ausrichtung der Schlibfbilder abgeleitet werden kann.

müssen die Probekörper zunächst metallografisch präpariert werden. Hierzu zählt das Trennen der Probekörper, das Einbetten, das Schleifen und abschließend das Polieren der Probekörper. Das Trennen der Probekörper erfolgte, sofern im Folgenden nicht anders beschrieben, parallel zur Aufbau- richtung (y/z-Ebene), dargestellt in Abbildung 4-3.

Die Präparation der Proben wurde am Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Zum Trennen der Probekörper wurde eine Nasstrennmaschine des Modells Accutom 50 der Firma Struers genutzt. Durch die kontinuierliche Spülung der Schnittstelle mit Wasser kann thermische Energie abgeführt und somit die Möglichkeit einer Überhitzung der Probe und einer damit einhergehenden Veränderung der Eigenschaften minimiert werden. Nach dem Trennen wurden die Probekörper mittels

Warmeinbettverfahren in einer Simpliment 1000 Presse der Firma Buehler eingebettet. Anschließend wurden die Probekörper in mehreren Stufen (SiC-Schleifscheiben in den Körnungen 220, 500, 800 und 1 200) auf einem Ecomet-4-Schleifautomaten im Gegenlauf geschliffen. Auch während dieses Bearbeitungsschrittes wurde Wasser als Kühlmedium genutzt. Die Politur der Oberflächen stellte den letzten Prozessschritt dar und wurde in zwei Stufen auf einem RotoForce-4-Polierautomat der Firma Struers durchgeführt. In beiden Stufen wurden Diamantdispensionen (6 μm und 1 μm) aufgetragen, welche als Abrasivstoff dienten, zusätzlich jeweils der Kühlschmierstoff DP-Lubricant Blue zur Abfuhr von Wärme.

Nach der Präparation der Proben erfolgte die lichtmikroskopische Analyse der Proben mittels BX51M der Firma Olympus Europa SE & Co. KG [147] sowie der Software Stream Essentials.

4.2.2 Ermittelte Kennwerte zur Bewertung der Probenqualität

Aus den generierten Schlibfbildern aus Unterabschnitt 4.2.1 lassen sich unterschiedliche Parameter zur Bewertung der Qualität ableiten, wie die relative Dichte, aber auch die Größe (in y/z-Richtung oder Flächenanteil), Form und Lage einzelner Defekte. Um möglichst hohe Reproduzierbarkeiten bei der Auswertung von Schlibfbildern erhalten zu können, wurde ein MATLAB-Tool, basierend auf der

Programmiersprache C++, entwickelt, mit dem sich große Datenmengen automatisiert auswerten lassen. Eine Übersicht der im Programm vorhandenen Funktionen ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Darstellung des Funktionsumfangs des auf C++ basierten Tools zur Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten.

Funktionsname	Funktion
Crop image	Zuschneiden des Bildes, sodass der Maßstab aus dem Auswertebereich entfernt wird.
Gray threshold	Automatisierte Ermittlung eines Grauwertes, ab welchem ein Pixel als Defekt detektiert wird, vgl. Abbildung 4-4 a) und c).
Remove Reflection	Analyse von Einschlüssen in Defekten ohne Kontakt zum Vollmaterial, diese Bereiche werden anschließend als Defekt definiert, vgl. Abbildung 4-4 c).
Density	Berechnung der relativen Dichte im Auswertebereich.
XY-Length	Analyse der Ausprägung jedes einzelnen Defektes in x- und y-Richtung, vgl. Abbildung 4-4 d).
Max/Min Diameter	Analyse maximaler und minimaler Feret-Durchmesser jedes Defektes.
Circularity	Analyse der Zirkularität eines jeden Defektes.
Save Image & Data	Speichern aller Bilder (.png) und Daten (.csv).

Die Funktionen, die in Zeile 1 bis 3 beschrieben sind, werden dabei für jede der darauffolgenden Funktionen angewandt und sind beispielhaft in Abbildung 4-4 a) bis c) dargestellt.

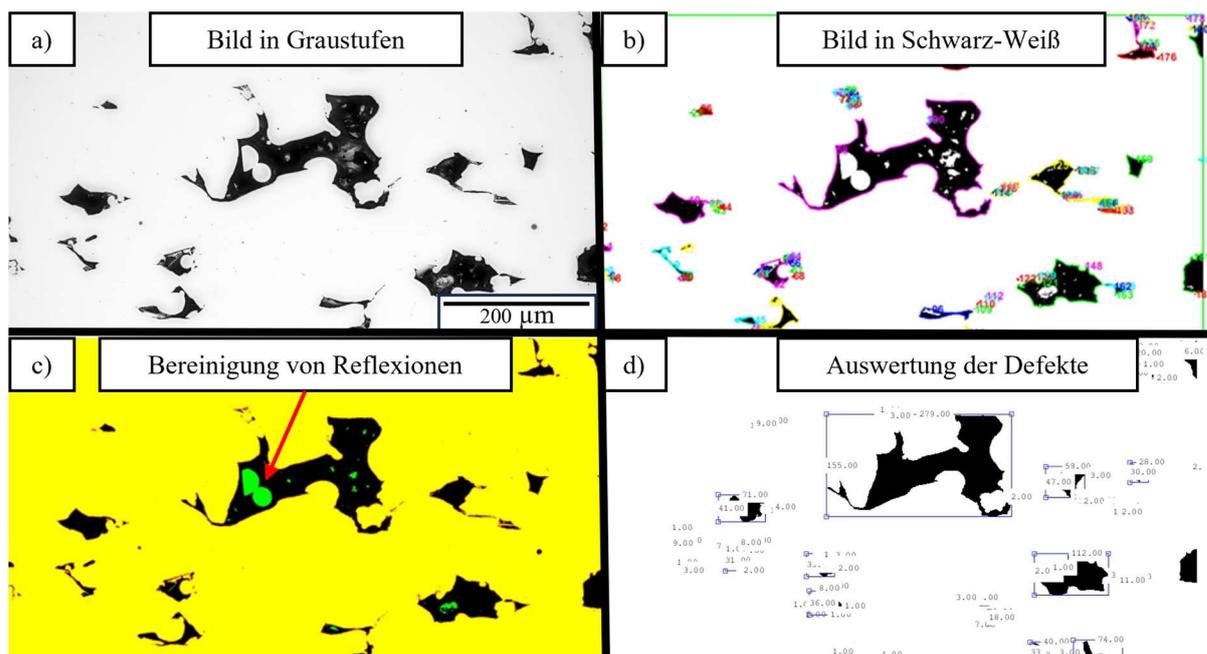


Abbildung 4-4: Darstellung des Verfahrens zur Auswertung von Mikroskopie-Aufnahmen zur Bestimmung unterschiedlicher Kennwerte. a) Mikroskopie-Aufnahme; b) Transformation in ein schwarz-weißes Bild und Detektion sowie Anzeige von Defekten; c) Detektion und Entfernen von Reflexionen innerhalb von Defekten; d) Resultierendes Bild mit Analyse der Defektausdehnungen in x- und y-Richtung.

Um die Eignung von Prozessparametersätzen im PBF-LB/M-Prozess zur Fertigung von Komponenten respektive die Qualität des Materials bewerten zu können, wird häufig der Kennwert der relativen Dichte genutzt: ρ_{rel} . Diese ist definiert als das Verhältnis von vorhandenem Material im Bildbereich (A_{Mat} – vgl. Abbildung 4-4 c) weißer Bereich) zur gesamten Fläche des Bildbereiches (A_{Bild}), siehe Formel 4-1.

$$\rho_{rel} = \frac{A_{Mat}}{A_{Bild}} \times 100 \% \quad (4-1)$$

Da die relative Dichte jedoch keine konkrete Aussage über die Defektgrößen, lokalen Verteilungen sowie deren Art zulässt, werden in dieser Arbeit noch weitere Charakteristika untersucht. Hierzu zählen die maximale Ausprägung jedes Defektes in der Ebene entlang der Bildkanten (Abbildung 4-4 d)), der minimale und maximale Feret-Durchmesser [148], die Fläche des Defektes A_{Def} und die Zirkularität C der Defekte, vgl. Abschnitt 2.4 und Formel 2-1.

4.2.3 Mikro-Computertomografie

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Methodik ist geeignet, um das Auftreten von Defekten in Probekörpern grundsätzlich zu bewerten, und wird mit zunehmender Datenmenge genauer. Sollen jedoch konkrete Zusammenhänge zwischen Signalen eines in-situ-Messsystems und dem betrachteten Material hergestellt werden, so besitzen Verfahren wie die Mikro-Computertomografie deutliche Vorteile, wie die Möglichkeit, Defekte dreidimensional abzubilden. Zur Bewertung von LSP-Signalen wurden Probekörper vermessen und anschließend mittels mCT analysiert. Abbildung 4-5 zeigt einen für diese Untersuchungen konstruierten Probekörper. Auf insgesamt sechs Ebenen sind jeweils neun Quader aus dem Grundkörper gebootet. In die entstandenen Hohlräume wurden neue CAD-Modelle in zwei unterschiedlichen Varianten eingebracht, sodass Defekte gezielt hervorgerufen werden konnten: 1. Das Modell füllt den Hohlraum vollständig aus, die zugewiesenen Prozessparametersätze werden jedoch variiert; 2. Die Geometrie der Modelle wurde durch Boole'sche Operationen manipuliert, sodass definierte Volumen entstehen, die nicht belichtet werden. Die Auswahl der eingebrachten quaderförmigen Modelle hängt jeweils von den Defekten ab, die provoziert werden sollen. In dieser Abbildung sind beispielhaft Quader dargestellt, an denen Boole'sche Operationen durchgeführt wurden, um durchgehende Defekte mit definierter Anzahl, Breite, Höhe und Position hervorrufen zu können. Die Messungen mittels LSP-Messsystem – Verfahren detaillierter beschrieben in Kapitel 4.3 – wurden jeweils an dem in der Mitte befindlichen Quader durchgeführt. Die gefertigten Probekörper wurden mit einem Mikro-Computertomografen des Modells FF35 CT der Fa. Xylon International GmbH analysiert, mit einer Auflösung von 42,25 Voxel/mm bzw. 0,023 mm/Voxel in x/y/z-Richtung. Für das gesamte Volumen des Probekörpers ergibt sich eine Gesamtanzahl von $470,55 \times 10^6$ Voxeln. Die Auswertung des somit generierten Datensatzes wurde anschließend mit der Software VGSTUDIO MAX der Firma Volumegraphics durchgeführt.

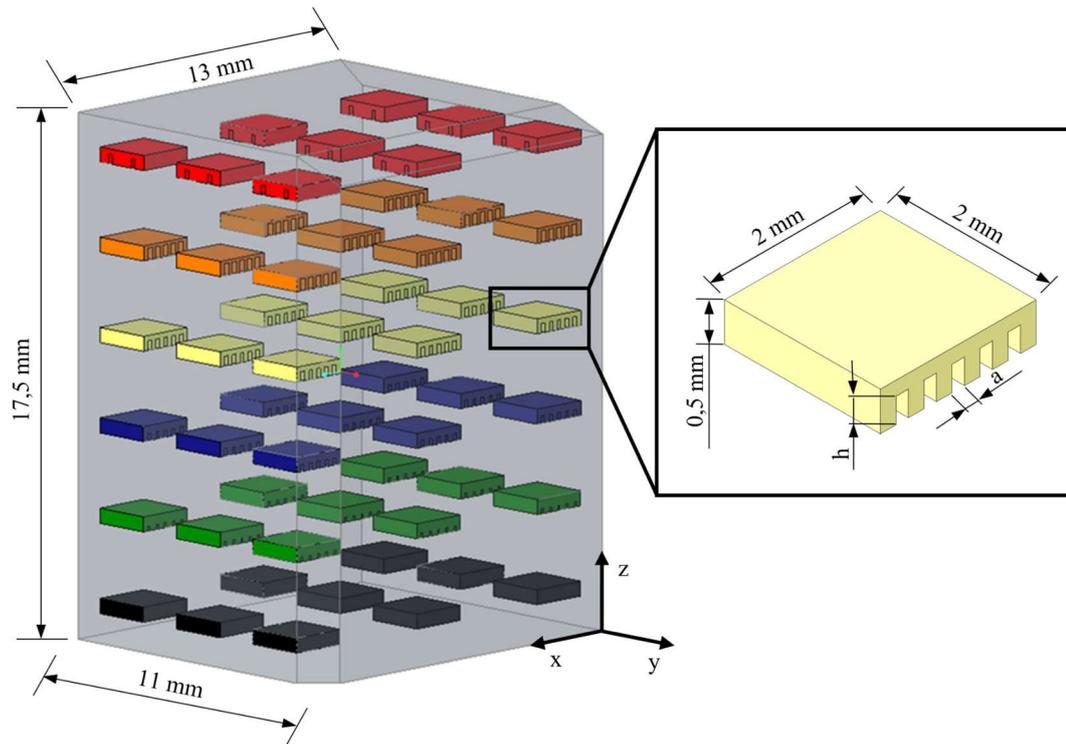


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung eines Designs für einen Probekörper, der mittels PBF-LB/M-Verfahren auf einer EOS M270 gefertigt wurde. Die Farben definieren unterschiedliche CAD-Modelle zur Einbringung von Defekten. Die Probekörper wurden gleichzeitig mittels LSP-Messsystem und anschließend mittels Mikro-Computertomografen analysiert.

4.2.4 Zugversuche

Zur Analyse statischer mechanischer Eigenschaften wurden Zugproben nach DIN 50125 – C 5 x 25 [149] aus zylinderförmigen Rohlingen mit den Maßen $\varnothing 12 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ mittels spanender Verfahren gefertigt. Um die anisotropen Eigenschaften des Laser-Strahlschmelzens berücksichtigen zu können, wurden Zugstabrohlinge horizontal sowie vertikal ausgerichtet gefertigt. Die Maße der Zugstäbe sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

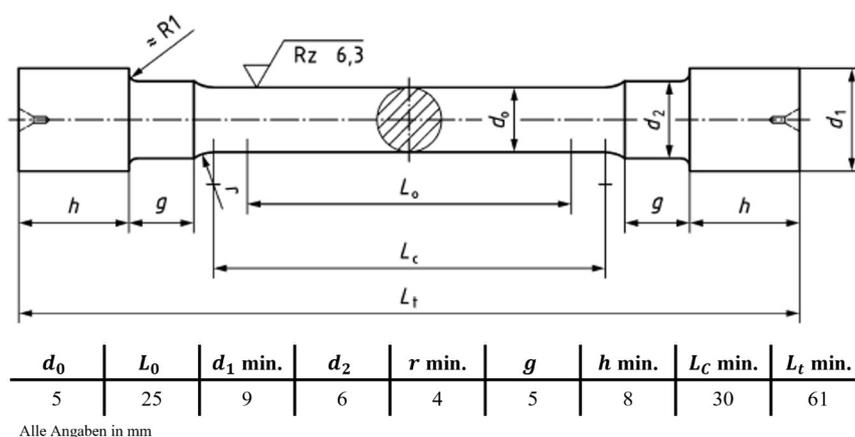


Abbildung 4-6: Form der in dieser Dissertation gewählten Zugstäbe nach DIN 50125 - C 5 x 25 [149].

Die Zugprüfungen nach DIN EN ISO 6892-1, mit einer Traversengeschwindigkeit von $v_T = 0,11 \text{ mm/s}$, wurden auf einer Zugprüfmaschine des Typs RM 100 der Firma Schenck Trebel

4.2 Analytische Methoden

durchgeführt. Zur Aufnahme von Messdaten wurde die Software Daisylab 13.0 genutzt und eine Datenaufnahmerate von 2 Hz eingestellt. Während der Versuche wurden die auf die Probe wirkende Kraft F in N und die Ausdehnung der Probe ΔL in mm aufgezeichnet. Um die aus den Versuchen resultierende Spannung σ in N/mm² bzw. MPa in den Proben zu bestimmen, muss die Kraft F durch die Querschnittsfläche der Probe dividiert werden. Zur Bestimmung der Querschnittsfläche erfolgte noch vor den Zugversuchen die Ermittlung des minimalen Durchmessers der Proben d_{min} in mm mittels Lasermikrometer. Die Berechnung der Spannung kann somit nach Formel (4-2) erfolgen [150]:

$$\sigma = \frac{F}{(d_{min}/2)^2 * \pi} \quad (4-2)$$

Die Dehnung ε_z in % der Probe lässt sich durch den Quotienten aus der Längenänderung und der Ausgangslänge der Messstrecke L_0 , welcher mit 100 % multipliziert wird, bestimmen (siehe Formel (4-3)).

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 \% \quad (4-3)$$

Wird die Spannung über der Dehnung aufgetragen, so resultiert das bekannte Spannungs-Dehnungs-Diagramm wie in Abbildung 4-7 dargestellt. In diesem sind die typischen Phasen während des Zugversuches ebenso wie die ermittelbaren Kennwerte dargestellt. R_m beschreibt dabei die maximale Zugfestigkeit der Probe, R_{eH} die obere und R_{eL} die untere Streckgrenze. A_L stellt die Lüdersdehnung, A_g die Gleichmaßdehnung und A_t die gesamte Dehnung der Probe während des Bruches dar. Zur Bestimmung der Werte A_L , A_g und A_t wird an den jeweiligen Punkten eine parallele Gerade zur Hooke'schen Gerade angelegt, die dem E-Modul entspricht.

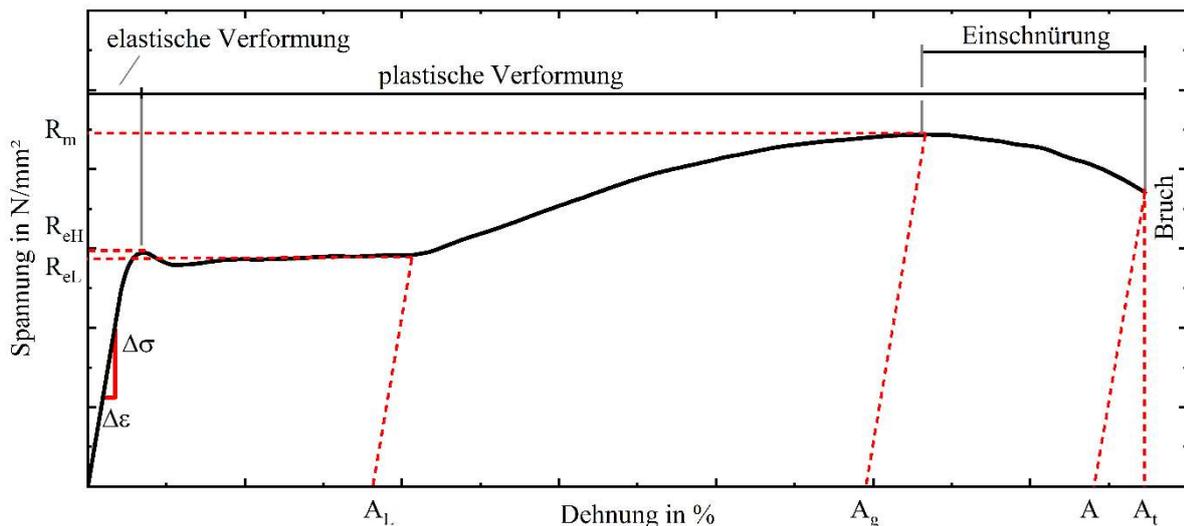


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung eines typischen Spannungs-Dehnungs-Diagramms einer Probe mit ausgeprägter Streckgrenze.

Das E-Modul E kann mit Formel (4-4) im konstanten Bereich der elastischen Verformung bestimmt werden.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_z} = const. \quad (4-4)$$

Für die Zugversuche wurden Zugstabrohlinge im PBF-LB/M-Verfahren gefertigt, welche zumeist definiert defektbehaftet sind. Eine Beschreibung der Art der eingebrachten Defekte erfolgt in den jeweiligen Abschnitten.

4.3 IN-SITU-MONITORING MITTELS LASER-SPECKLE-PHOTOMETRIE

Das in dieser Arbeit genutzte LSP-System zur Bewertung von Materialeigenschaften wurde im Rahmen des AiF-IGF-Forschungsvorhabens „*In-situ-Überwachung und Optimierung additiver Laser-Strahlschmelzprozesse durch Speckle-Sensorik – AddiSpeck*“ mit der Projektnummer 20079BG in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) für in-situ-LSP-Messungen in PBF-LB/M-Prozessen an einer EOS M270 ausgelegt. Die Systemeigenschaften sowie die angewandte Messmethodik sind in den folgenden Unterabschnitten dargestellt.

4.3.1 Hardware des Laser-Speckle-Photometrie-Systems

Die für die Integration des LSP-Messsystems in den PBF-LB/M-Prozess verwendeten Komponenten sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Anders als in Unterabschnitt 2.5.2 beschrieben und in Abbildung 2-11 dargestellt, entfällt für die durchgeführten Versuche eine zusätzliche Komponente zur thermischen Anregung der Oberfläche. Die Anregung wird mittels des Anlagenlasers der verwendeten PBF-LB/M-Anlage (EOS M270 - Unterabschnitt 4.1.1) vorgenommen. Genauer wird die Messmethodik in Unterabschnitt 4.3.2 dargestellt.

Tabelle 4-4: Verwendete Hardwarekomponenten und deren Merkmale für die Versuche zur Laser-Speckle-Photometrie

Komponente	Eigenschaften
High-Speed-Kamera Photron GmbH ¹ Fastcam Mini AX50 ² [151]	CMOS-Sensor – monochrome Ausführung Pixelgröße auf Sensor: 20 µm x 20 µm Lichtempfindlichkeit: ISO 50 000 Max. Auflösung: 1 024 x 1 024 Pixel Max. Aufnahmezeit bei max. Auflösung f : 2 000 FPS Max. Aufnahmezeit f_{max} : 170 000 FPS bei 128 x 16 Pixel Interner Speicher: 8 GB Minimale Belichtungszeit: 1 µs
Optik Navitar Inc. ¹ 12X Distanz Makro Zoom ² [152]	Arbeitsabstand: 320 mm – 360 mm Resultierende Auflösung: 5,65 µm/Pixel (bei 6 000 FPS bzw. 512 x 512 Pixel)
Speckle-Laser Novanta Europe GmbH. ¹ Opus 532 ² [153]	Wellenlänge λ : 532 nm Ausgangsleistung: von 0 mW bis zu 6 000 mW Strahldurchmesser: 1,85 ± 0,2 mm
Bandpassfilter 2 Midwest Optical Systems, Inc. ¹ BP525 Light Green Bandpass Filter ² [154]	Nutzbare Wellenlänge λ : 500 nm – 555 nm Toleranz: ± 10 nm Höchste Transmission: ≥ 90 %

¹: Hersteller ²: Bezeichnung

4.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Die Positionierung des LSP-Messsystems erfolgt nach dem in Abbildung 4-8 dargestellten Schema. Die High-Speed-Kamera Fastcam Mini AX50 der Firma Photron GmbH sowie der Laser zur Erzeugung der Speckle-Muster Opus 532 Novanta Europe GmbH werden außerhalb des Bauraumes der EOS M270 mittels einer Halterung, welche nicht dargestellt ist, schwingungsgedämpft positioniert. Somit soll vermieden werden, dass durch Schwingungen des Systems Änderungen der Speckle-Muster detektiert werden, die in keinem Zusammenhang mit der Anregung der Oberfläche stehen. Mit der Halterung kann das LSP-System manuell über Linearachsen entlang der x-, y- und z-Achse präzise auf den zu betrachtenden Bereich ausgerichtet werden. Aufgrund des Messabstandes von 320 mm bis 360 mm des LSP-Messsystems, der sich durch die Auswahl der Komponenten des Objektivs ergibt, werden Untersuchungen von Probekörpern nahe der Tür des Bauraumes durchgeführt, vgl. Abbildung 4-8. Aufgrund der gewählten Position befindet sich zwischen dem Kameraobjektiv sowie dem Speckle-Laser und dem Messobjekt das sogenannte Laser-Window. Die mit der Kamera detektierte Intensität und somit die Werte der Korrelationsfunktion sind somit von diesem beeinflusst. Ein direkter Vergleich der Speckle-Dynamiken und somit des Messsignals innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen ist möglich, eine Übertragung auf andere Messsituationen hingegen nicht.

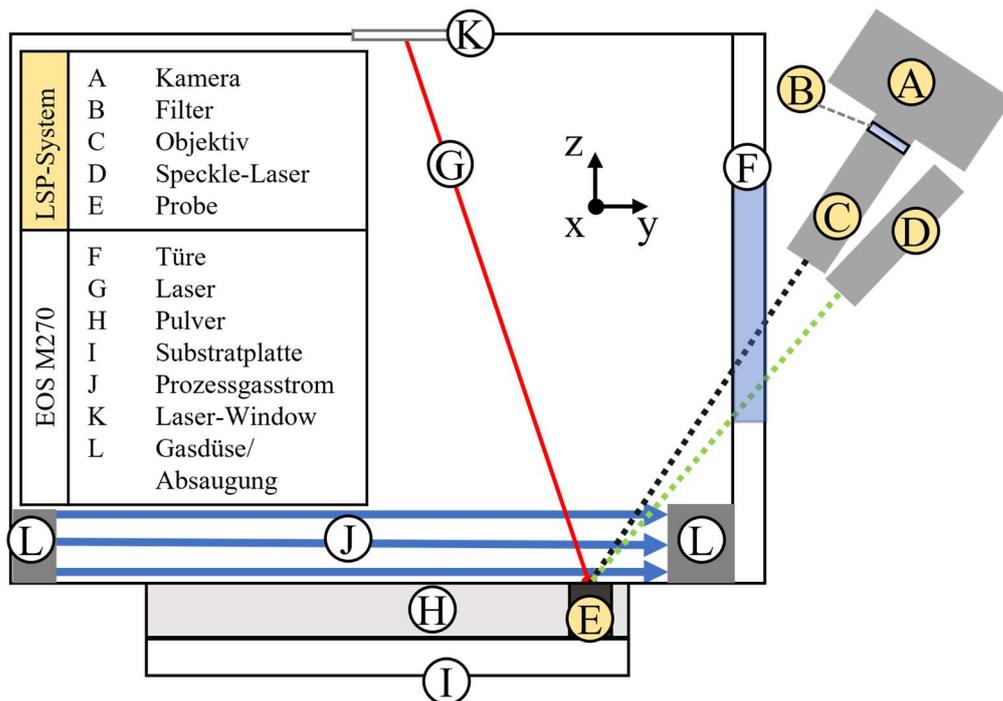


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Positionierung des LSP-Systems vor dem Laser-Window einer EOS M270 PBF-LB/M Anlage. Ebenso gezeigt sind die Hauptkomponenten des LSP sowie PBF-LB/M-Systems.

4.3.2 In-situ-Messungen mittels Laser-Speckle-Photometrie – Versuchsablauf

Während der Fertigung von Bauteilen im PBF-LB/M-Prozess können unterschiedliche Phänomene auftreten, die Analysen der Bauteiloberflächen mittels optischer Verfahren behindern bzw. verfälschen können. Zur Reduzierung des Einflusses solcher Phänomene und somit zur Steigerung der

Messgenauigkeit werden für die LSP-Messungen folgende Messbedingungen definiert. Messungen mittels LSP-Messsystem erfolgen erst ab Schichtnummern größer 50, um einen Einfluss von inkonsistenten Schichthöhen zu vermeiden, die nach Jansen et al. [62] in den ersten 6–10 Schichten auftreten können. Zusätzlich können Nebenprodukte wie Schmauch, das Aufwirbeln des pulverförmigen Grundmaterials

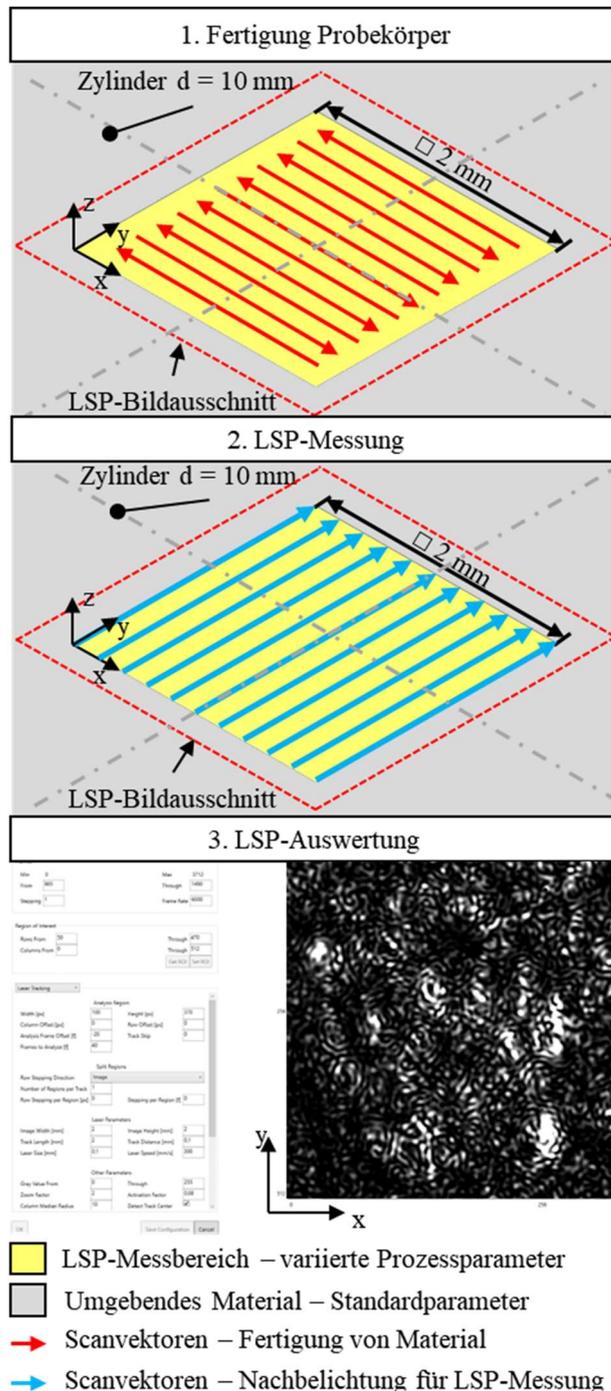


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines LSP-Messzyklus in drei Stufen: 1. Fertigung des auszuwertenden Materials; 2. Nachbelichtung und LSP-Messung; 3. Transfer der Daten und Auswertung in LSP-Software.

oder das Auswerfen von aufgeschmolzenem Material aus dem Schmelzbad, welches durch den Bildbereich geschleudert wird, das LSP-Messsignal beeinflussen, vgl. Abschnitt 2.3 oder Abbildung 2-2. Dies kann je nach Art des Eduktes und dessen Winkel zum LSP-Messsystem zu einer zeitlich begrenzten lokalen Verdunkelung (Partikel, Schmauch etc.) oder Überbelichtung (Schmelztropfen) führen. Die vom Fraunhofer IKTS entwickelte Auswertesoftware ermöglicht jedoch bislang nicht, solche Phänomene zu detektieren respektive zu filtern, sodass das Messergebnis erheblich beeinflusst werden könnte. Um diese Phänomene und deren Einflüsse auf das LSP-Signal minimieren zu können, werden die Messungen mittels LSP von der Fertigung im PBF-L/M-Prozess entkoppelt. Ebenso erfolgt die Auswertung der aufgezeichneten Videos bislang nicht ohne manuelle Eingriffe und somit auch nicht in Echtzeit. Die LSP-Messung kann folglich als dreistufiger Prozess beschrieben werden, der Ablauf einer solchen Messung ist schematisch in Abbildung 4-9 dargestellt. In einem ersten Schritt wird ein definierter Bereich – Quader mit der Kantenlänge 2 mm – mit einer Scanstrategie belichtet, die die gewünschten Materialeigenschaften hervorruft. Die Scanvektoren (rote Pfeile) werden in diesem Bereich, abweichend von Standardprozessen, konstant in x-Richtung orientiert. Somit soll ein

4.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

möglicher Einfluss rotierter Schmelzbahnen auf das Reflexionsverhalten der Oberfläche ausgeschlossen werden, wodurch die vom LSP-System detektierten Intensitäten variieren könnten.

Wenn Schritt 1 abgeschlossen ist, wird eine Belichtungspause von $\Delta t = 5 \text{ s}$ erzwungen. Diese wird eingebracht, um sicherstellen zu können, dass das zuvor gefertigte Material abgekühlt ist und somit keine Speckle-Dynamiken durch ebendieses hervorgerufen werden. Weiterhin kann somit erreicht werden, dass sämtliche Prozessedukte, die während des ersten Prozessschrittes entstanden sind, aus dem LSP-Bildbereich abgeführt wurden. Anschließend beginnt der zweite Prozessschritt, dabei wird der Auswertebereich des LSP-Messsystems erneut belichtet und die LSP-Messung zeitgleich durchgeführt. Dabei sind die Scanvektoren parallel zur y-Achse ausgerichtet (blaue Pfeile). Die Belichtung dient dem Zweck der Anregung der Oberfläche und somit einer Änderung der Speckle-Muster. Um deutliche Ausprägungen des LSP-Messsignals hervorrufen zu können, müssen möglichst starke Änderungen der Speckle-Muster provoziert werden. Dies gelingt, indem eine starke thermische Anregung der Oberfläche und somit auch Ausdehnung über die Belichtung hervorgerufen wird. Gleichzeitig muss dabei jedoch verhindert werden, dass das belichtete Material auf- bzw. umgeschmolzen wird, da ansonsten die im Voraus eingestellten Eigenschaften des Probekörpers verändert werden könnten. Ebenso könnte ein Aufschmelzen der Oberfläche zu einer Änderung der Topografie führen, wodurch wiederum eine Änderung der Speckle-Muster hervorgerufen wird, die nicht in Korrelation zu den Materialeigenschaften steht.

Zusätzlich sollen die Parameter so gewählt sein, dass keine Reflexionen des Anlagenlasers detektiert werden können, da die LSP-Messungen dadurch verfälscht werden könnten. Aus diesem Grund wurde ein Parametersatz entwickelt, dargestellt in Tabelle 4-5, welcher eine möglichst starke Anregung der Oberfläche unter Berücksichtigung dieser Punkte ermöglicht. Die Belichtung zur Anregung der Speckle-Muster wird orthogonal zur Ausrichtung der Schmelzbahnen vorgenommen (y-Richtung), um einen Einfluss von lokalen Schweißbahnanomalien zu reduzieren. Ein Hatchabstand von 0,1 mm soll eine hohe Auflösung des LSP-Systems ermöglichen. Die Scangeschwindigkeit von $v_s = 300 \text{ mm/s}$ wurde während der Ermittlung des Parametersatzes zur Anregung der Oberfläche festgelegt. Sie wurde von der minimalen Menge an Bildern (τ_{LSP}) abgeleitet, die für die Auswertung notwendig sind. Ein bildlicher Vergleich des Einflusses des dargestellten Prozessparametersatzes mit einem, bei dem die Volumenenergiedichte erhöht wurde, ist im Anhang in Abbildung A 2 dargestellt.

Tabelle 4-5: Verwendete Prozessparameter zur Anregung der Speckle-Muster im Bereich der LSP-Messungen sowie Einstellungen der LSP-Kamera

Parameter	PBF-LB/M-Prozess						LSP-Messung
	P_L in W	v_s in mm/s	h in mm	d in mm	b in mm	Scanstrategie	f_{LSP} in Hz
Wert	15	300	0,1	0,02	100	y-Richtung	6 000

Die Anzahl der resultierenden Bilder in Abhängigkeit von der Länge eines Scanvektors L_{Scan} , der Scangeschwindigkeit v_S und der eingestellten Aufnahmezeit der LSP-Kamera $f_{LSP} = 6\,000$ in 1/s (FPS) kann mit Formel (4-5) berechnet werden.

$$\tau_{LSP} = \frac{L_{Scan}}{v_S} * f_{LSP} \quad (4-5)$$

In Schritt 3 erfolgen die Bearbeitung, der Export und die Auswertung der LSP-Videos. Obwohl die Generierung der Messdaten bereits automatisiert ist – LSP-Messungen werden durch das Abgreifen von Steuerungssignalen des Analgenlasers ausgelöst –, bleibt die Datenverarbeitung ein manuelles Verfahren. Die Videos der LSP-Aufnahmen, welche sich nach der Messung auf dem Speichermedium der High-Speed-Kamera befinden, müssen manuell in der Software Fastcam Photron Viewer zugeschnitten werden, sodass lediglich Bilder, in denen die Nachbelichtung bzw. eine Änderung der Speckle-Muster stattfindet, exportiert werden. Nachfolgend werden diese Videos auf einer Working-Station mittels Software, entwickelt und lizenziert vom Fraunhofer IKTS, ausgewertet. Dafür müssen unterschiedliche Parameter des PBF-LB/M-Prozesses, wie die Scangeschwindigkeit, der Hatchabstand der Nachbelichtung oder die gewählte Aufnahmezeit, definiert werden, ebenso wie der Messbereich (gelber Bereich in Abbildung 4-9), der im Video ausgewertet werden soll.

Die Auswertung der Videos erfolgt in den beschriebenen Bereichen nach Formel (2-5), die Grundlagen der LSP-Messungen können in Unterabschnitt 2.5.2 nachgelesen werden. Die Ergebnisse, die für jeden einzelnen Scanvektor in einem Bildbereich separat gespeichert werden, werden in einer .csv-Datei abgelegt. Dadurch, dass die betrachteten Bereiche Abmaße von 2 mm x 2 mm besitzen, ein Versatz der Scanvektoren der Nachbelichtung von 0,1 mm zur Kontur eingestellt und ein Hatchabstand von 0,1 mm gewählt wurde, ergeben sich insgesamt 19 auswertbare Bereiche je Messstelle.

4.3.3 Fertigung von Probekörpern mit künstlich erzeugten Defekten

Tabelle 4-6: Standard-Prozessparameter zur Fertigung von EOS GP1 auf der EOS M270.

Parameter	Wert
P_L	195 W
v_S	1 000 mm/s
h	0,1 mm
d	0,02 mm
b	100 mm
d_L	0,1 mm
Scanstrategie	Rotiert, alterniert, x-, y-
Material	EOS GP1
Prozessgas	Stickstoff

Im Rahmen dieser Dissertation werden unterschiedliche Strategien zur Erzeugung von Defekten angewandt. Ziel ist es dabei, die verschiedenen Ursachen der daraus resultierenden Fehlerbilder abzubilden und zu bewerten. Darunter zählen stochastisch verteilte Defekte im gesamten Probekörpervolumen, die beispielsweise durch Abweichungen des Prozessgasstromes und die damit verbundene Laser-Prozessedukt-Interaktion oder verunreinigte Lasereintrittsfenster hervorgerufen werden können. Zur Abbildung dieser Fehlerbilder werden die Prozessparametersätze definiert variiert, sodass Reduzierungen oder Erhöhungen der Volumenenergiedichte hervorgerufen werden. Eine Beschreibung der vorgenommenen Anpassungen erfolgt der Übersicht halber

in den jeweiligen Unterabschnitten.

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

Eine zweite Klasse der hervorgerufenen Defekte sind in dieser Arbeit solche, die als ‚lokale Defekte‘ beschrieben werden. Lokale Defekte können in PBF-LB/M-Prozessen auftreten, sobald sich lokale Prozessanomalien ausprägen. Die Ablagerung großer und/oder stark oxidiertes Pulverpartikel auf der Bauteiloberfläche, Beschädigungen des Beschichters und der damit verbundene fehlerhafte Materialauftrag, turbulente Strömungen des Prozessgases oder Kratzer auf dem Lasereintrittsfenster können solche Defekte hervorrufen. In dieser Arbeit sollen solche Defekte in Größe und Position definiert hervorgerufen werden, sodass die Sensitivität von Messsignalen beim Auftreten der Defekte untersucht werden kann. Hierzu werden Boole'sche Operationen in den CAD-Modellen der Probekörper durchgeführt. Auch für diese Defektklasse werden die genauen Ausführungen der Übersicht halber in den jeweiligen Unterabschnitten.

Die Prozessparameter, die standardmäßig für die Fertigung des Materials GP1 auf der EOS M270, beide von der EOS GmbH, genutzt werden, sind in Tabelle 4-6 aufgelistet.

4.4 IN-SITU-MONITORING MITTELS HIGH-SPEED-VIDEOGRAPHIE

Das in-situ-Monitoringsystem, basierend auf dem Verfahren der High-Speed-Videographie, wurde für die am Lehrstuhl für Fertigungstechnik vorhandene SLM 280HL der Firma SLM Solutions Group AG entwickelt. Die Auswertung von Schmelzbadcharakteristika basiert auf der Detektion von Strahlungsintensitäten, welche nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz temperaturabhängig sind. Wie in Unterabschnitt 2.5.1 und 2.5.3 dargestellt, wird dieser Zusammenhang bereits in der Industrie und Forschung genutzt, um lokal veränderte Abkühlraten auf größeren Skalenebenen zu detektieren und somit auf mögliche Prozessdefekte zu schließen. Das in dieser Arbeit etablierte System erweitert den Stand der Technik, indem es die Analyse der Schmelzbadeneigenschaften auf der bislang kleinsten bekannten Skala ermöglicht. Die Kantenlänge eines Pixels entspricht $1,44 \mu\text{m}$ (Literatur: $14 \mu\text{m}$, vgl. Tabelle 2-2), wobei eine Aufnahmezeit bis zu 800 000 FPS genutzt werden kann. Die hierzu speziell ausgewählte Hardware, die Integration des Messsystems in die Anlage, der mittels Python programmierte, automatisierte Auswertalgorithmus sowie die Korrelation zwischen realen Temperaturen und den detektierten Strahlungsintensitäten werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

4.4.1 Hardware des Monitoringsystems

Während der PBF-LB/M-Fertigung werden in Abhängigkeit von den Prozessparametern Schmelzbäder variierender geometrischer Ausprägungen mit hohen Dynamiken erzeugt. Das relativ hohe Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen des Schmelzbades führt dazu, dass vergleichsweise hohe Abkühlraten hervorgehen. So konnten Wang et al. beispielsweise Abkühlraten zwischen $4,8 \times 10^6 \text{ K/s}$ und $8,0 \times 10^5 \text{ K/s}$ für unterschiedliche Parameterkombinationen am Material 316L bestimmen [155].

Da die Auswertemethodik der High-Speed-Videographie auf der Analyse lokaler emittierter Strahlungsintensitäten des Schmelzbades basiert, müssen zeitlich und örtlich hochauflösende Systeme angewandt werden. Alle verwendeten Komponenten, die für das HSK-System ausgewählt wurden, sind in Tabelle 4-7 mit den jeweiligen maßgeblichen Eigenschaften dargestellt.

Für die Untersuchungen wurde eine Nova Fastcam S6-800K-M-16GB der Firma Photron GmbH angeschafft. Diese weist eine hohe Lichtempfindlichkeit von ISO 64 000 in der monochromen Ausführung des CMOS-Sensors mit einer maximalen Auflösung von 1 024 x 1 024 Pixeln auf. Bei einer Aufnahme- rate von 40 000 FPS können noch 896 x 124 Pixel, bei der maximalen Aufnahmerate von 800 000 FPS noch 128 x 96 Pixel genutzt werden. Um neben der zeitlichen auch eine hohe räumliche Auflösung realisieren zu können, wurde ein 12X Distanz Makro Zoom Objektiv der Firma Navitar Inc. genutzt. Durch die Kombination der Optiken und der High-Speed-Kamera ergibt sich ein Arbeitsabstand von 73 mm – 85 mm. Die resultierende räumliche Auflösung beträgt 1,44 μm x 1,44 μm pro Pixel. Zusätzlich zu diesen beiden Komponenten wurde ein Kurzpassfilter SP785 Near-IR Dichroic Shortpass der Firma Midwest Optical Systems, Inc. verwendet. Intensitäten in einem Wellenlängenbereich von 425 nm bis 770 nm können diesen mit geringem Verlust transmittieren, Strahlung restlicher Wellenlängen wird reflektiert. Die Transmissionsrate des Filters I_{E_SP785} ist in Abbildung 4-10 als graue Kurve über der Wellenlänge dargestellt. Durch Anwendung des Filters kann der Einfluss möglicher Reflexionen des Anlagenlasers (Wellenlänge ca. 1 040 nm) auf das Messsignal reduziert werden.

Tabelle 4-7 Verwendete Hardwarekomponenten und deren Merkmale für die Versuche zur High-Speed-Video- graphie

Komponente	Eigenschaften
High-Speed-Kamera Photron GmbH ¹ Nova Fastcam S6-800K-M-16GB ² [156]	CMOS-Sensor – monochrome Ausführung Pixelgröße auf Sensor: 20 μm x 20 μm Lichtempfindlichkeit: ISO 64 000 Max. Auflösung: 1 024 x 1 024 Pixel Max. Aufnahmerate bei max. Auflösung f : 6 400 FPS Max. Aufnahmerate f_{max} : 800 000 FPS bei 128 x 16 Pixel Auflösung bei 40 000 FPS: 896 x 124 Pixel Interner Speicher: 16 GB Minimale Belichtungszeit: 0,2 μs
Optik Navitar Inc. ¹ 12X Distanz Makro Zoom ² [152]	Arbeitsabstand: 73 mm – 85 mm Resultierende Auflösung: 1,44 μm /Pixel
Kurzpassfilter Midwest Optical Systems, Inc. ¹ SP785 Near-IR Dichroic Shortpass ² [157]	Nutzbare Wellenlänge λ : 425 nm – 770 nm Toleranz: ± 10 nm Höchste Transmission: ≥ 90 %

¹: Hersteller ²: Bezeichnung

In Abbildung 4-10 ist die Sensitivität des Kamerasensors für die Detektion von Intensitäten abhängig von der Wellenlänge dargestellt – I_{E_Sensor} , schwarze Kurve. Aufgetragen sind die Werte als effektive Intensität, also der Anteil der Intensität, der durch die Anwendung der jeweiligen Komponenten transmittiert bzw. detektiert wird. Der Anteil der Intensität, die durch die Kombination der beiden Komponenten detektiert wird, wird durch den Wert I_{total} beschrieben, welcher durch eine Multiplikation der Funktionen hervorgeht. Besondere Beachtung findet der Anteil der Intensität, der im Bereich der

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

Wellenlänge des Lasers detektiert wird. Bei der Wellenlänge des Anlagenlasers von 1 040 nm entspricht der Anteil einem Wert von $I_{E_total} = 2,68 \times 10^{-6} \%$.

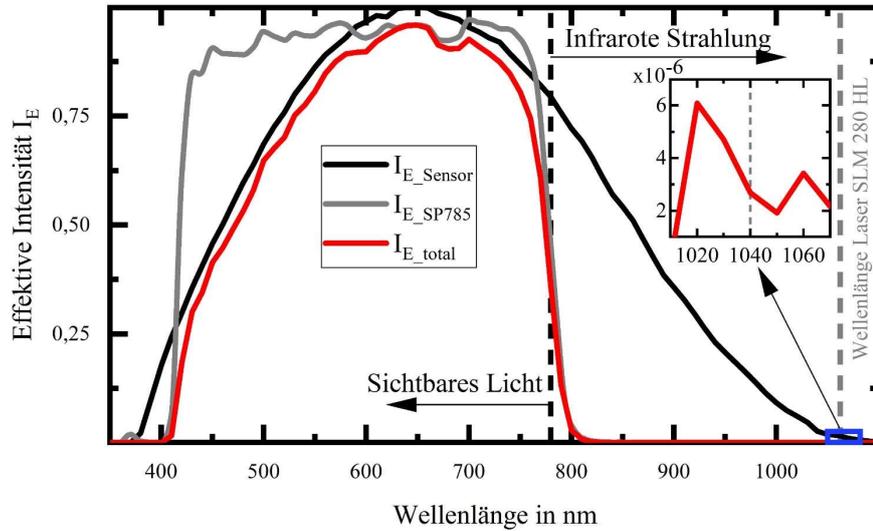


Abbildung 4-10: Transmission des Kurzpassfilters SP785 sowie die Detektierbarkeit von Intensitäten des Kamerasensors in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie die aus diesen beiden Werten resultierenden totalen Detektionsraten von Intensitäten.

4.4.2 Integration der High-Speed-Kamera an der SLM 280HL

Der geringe Arbeitsabstand ($a_{HSK} = a + b$, vgl. Abbildung 4-11) des HSK-Systems von 73 mm bis 85 mm erfordert eine direkte Integration des HSK-Systems in den Bauraum der genutzten PBF-L/M-Anlage. In Abbildung 4-11 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Die Kamera ‚A‘ ist horizontal auf einer Linearachse fixiert, welche eine Translation entlang der y-Achse ermöglicht, somit kann der

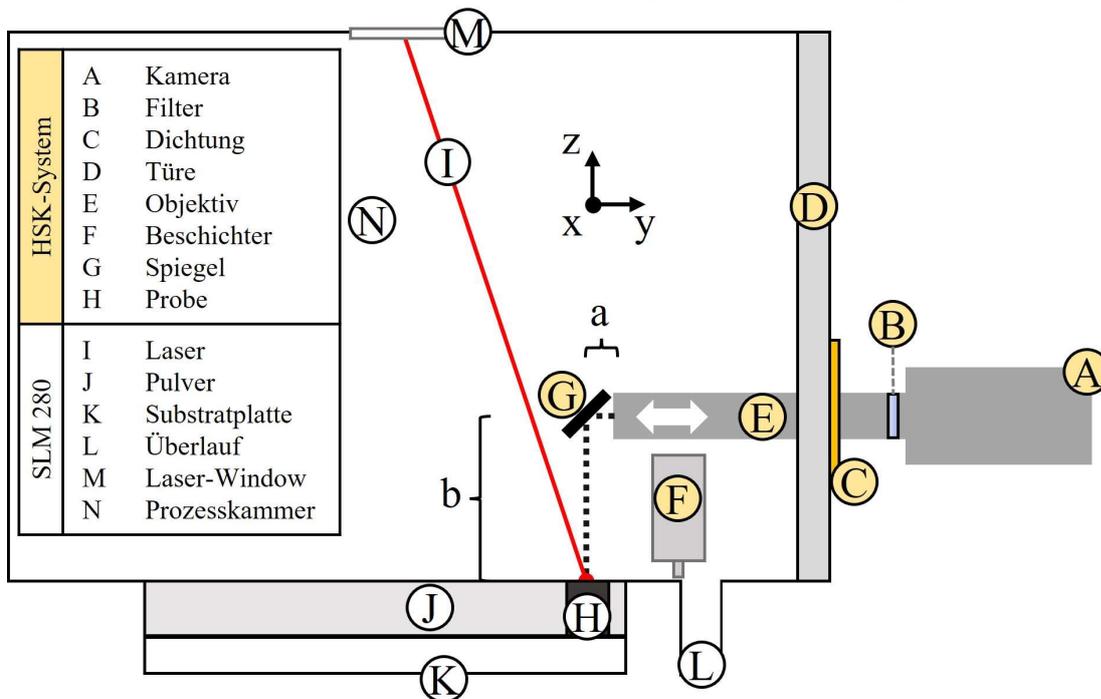


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des HSK-Systems sowie Positionierung des Systems an der genutzten SLM 280 HL PBF-LB/M-Anlage.

Bildbereich geringfügig eingestellt werden. Die Linearachse selbst ist wiederum auf einer externen Halterung befestigt, welche nicht in der Abbildung dargestellt ist. Das Objektiv ‚E‘ des HSK-Systems wird durch eine Bohrung in der Tür ‚D‘ in den Bauraum ‚N‘ eingebracht. Um Prozessbedingungen während der Versuche sicherstellen zu können, wurde eine Dichtung ‚C‘ konstruiert und integriert. Durch einen Spiegel, bezeichnet als ‚G‘, wird der Strahlengang um 90° umgelenkt, sodass der Bereich, in welchem gefertigt wird, orthogonal betrachtet werden kann. Der gewählte Spiegel muss höchste Qualitätsanforderungen hinsichtlich Reflexionsgrad sowie Oberflächenrauheit erfüllen, um Verzerrungen des Bildes ausschließen zu können. Da eine Beschichtung mit integriertem HSK-System möglich sein soll, wurde eine Anpassung des Beschichters vorgenommen, da dieser ansonsten während Beschichtungsvorgängen mit dem Objektiv kollidieren würde. Eingesetzt wird ein am Lehrstuhl entwickelter, höhenreduzierter Beschichter ‚F‘. Analysen mehrerer aufeinanderfolgender Schichten sind somit möglich.

4.4.3 Mess- und Auswertemethodik mit dem HSK-System

Die Aufnahme der High-Speed-Videos erfolgt manuell. Hierzu wird das HSK-System auf den Bereich ausgerichtet, in dem eine Belichtung des Materials, in Form einer Einzelspur, vorgenommen wird. Ebenso wie bei Messungen mittels LSP-Systemen wird auch in diesen Versuchen eine Aufzeichnung von Videos erst in Schichten größer 50 durchgeführt, um einen möglichen Einfluss inkonsistenter Schichthöhen zu vermeiden [62]. Nach der Belichtung, welche parallel zur x-Achse erfolgt, und der Auslösung

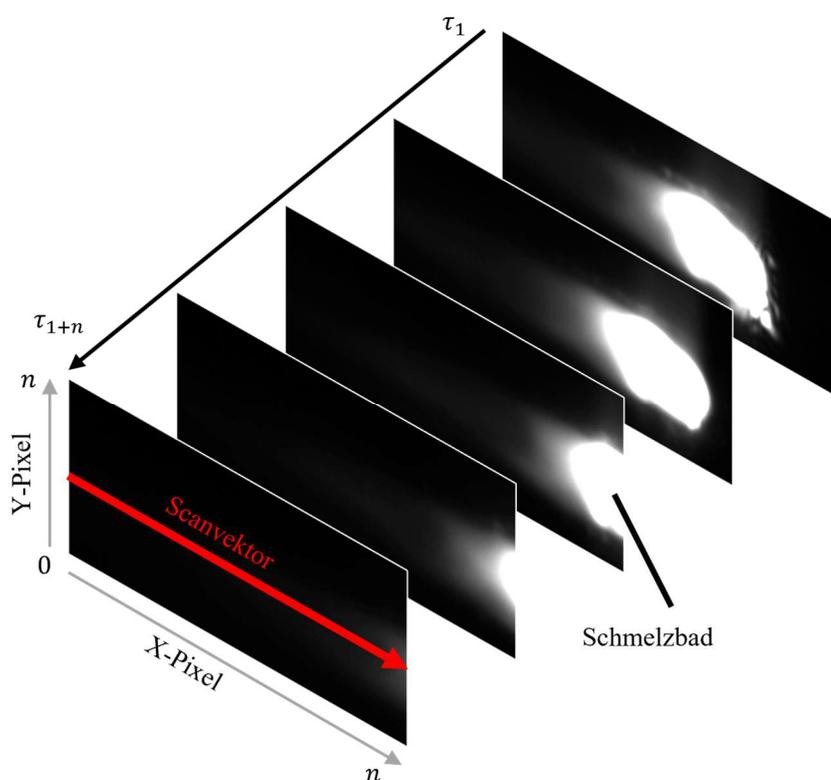


Abbildung 4-12: Beispielhafte Darstellung der vorhandenen Datenbasis zur Auswertung der Schmelzbadeigenschaften: Bilder eines Videos, aufgenommen mit HSK-System.

eines Triggers zur Aufzeichnung der Videos, werden diese in der Software Photron FASTCAM Viewer der Firma Photron gesichtet und relevante monochrome Sequenzen in einem .mp4-Format exportiert. Anschließend erfolgt die Übergabe an die Python-basierte Auswertesoftware manuell. Ausgewählte, aufeinanderfolgende Frames einer Versuchsreihe sind zusammen mit den Dimensionen in Abbildung 4-12 dargestellt. Im Folgenden wird die Methodik zur Auswertung

der Videos bzw. der Bestimmung von Schmelzbadbreiten, -längen und Abkühl dauern vorgestellt.

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

1. Transformation in nutzbare Daten:

Der erste Schritt der Auswertung beinhaltet den Import der Videos in die selbstentwickelte, Python-basierte Software. Hierbei ist ein Massenimport durch eine Auswahl eines Ordners möglich, sodass große Datenmengen ohne weitere Eingriffe untersucht werden können, eine Übersicht der Benutzeroberfläche ist im Anhang A 1 gegeben. Aus den importierten Videos werden Primärdaten ermittelt, wozu unter anderem die Auflösung (Anzahl der Pixel in x- und y-Richtung) und die Anzahl der Bilder, aus denen das Video besteht, zählen. Anschließend erfolgt auf Grundlage dieser Daten die Generierung eines leeren Arrays, in welches die Intensitäten jedes Pixels zu jedem Zeitpunkt respektive Bild abgelegt werden. In diesem Schritt können Filter definiert werden, mit denen der Einfluss prozesstypischer Effekte minimiert wird, wie aufgeschmolzene Partikel, die durch den Bildbereich geschleudert werden und somit das Messergebnis verfälschen. Ein Beispiel für die Datengrundlage ohne Anwendung von Filtern ist in Abbildung 4-13 im oberen Bereich gegeben. Das Bild ist das Äquivalent zu einer Langzeitbelichtung. Um dieses zu generieren, werden die maximalen Intensitäten eines jeden Pixels innerhalb der HSK-Videos ermittelt und am jeweiligen Pixel dargestellt. Ersichtlich werden Einflüsse unterschiedlicher PBF-LB/M-typischer Effekte, wie herumfliegender aufgeschmolzener Partikel, die streifenförmige Intensitätsmuster hinterlassen.

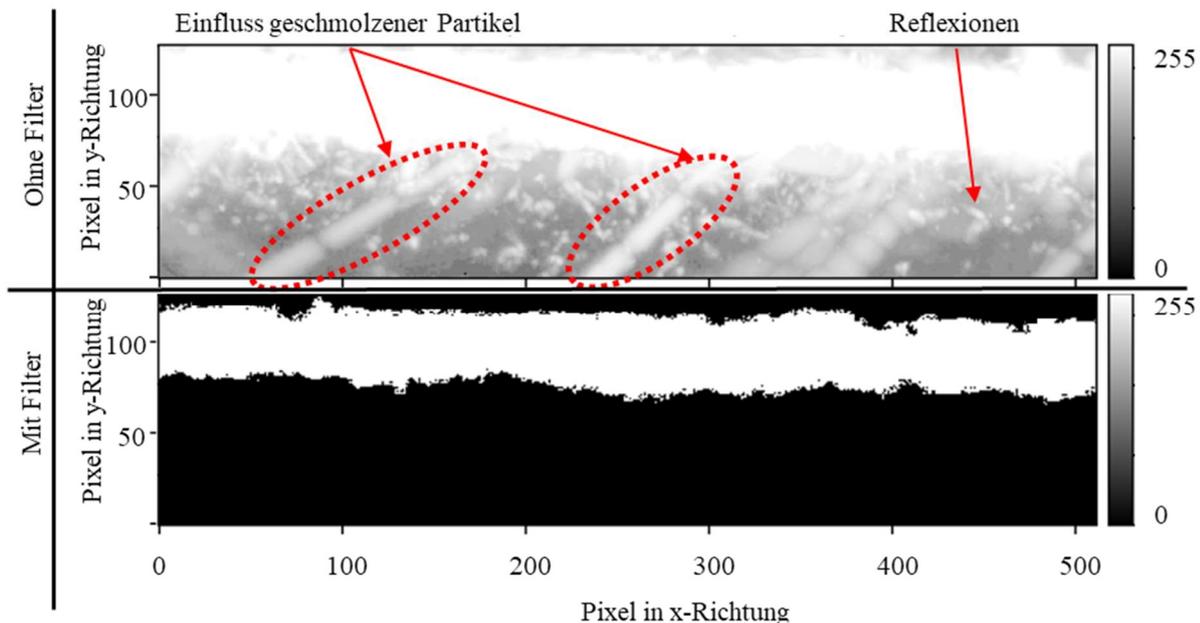


Abbildung 4-13: Vergleich von HSK-Daten: Oben: Die höchsten Intensitäten eines jeden Pixels innerhalb des Videos in einem Bild dargestellt. Ersichtlich werden Reflexionen und Artefakte aufgeschmolzener Partikel. Unten: Bereich, den die HSK-Software nach der Nutzung von Filtern als Schmelze detektiert.

Weiterhin können Reflexionen an umliegenden Pulverpartikeln entstehen. Im unteren Bild ist in weißen Pixeln dargestellt, in welchem Bereich des Videos nach der Anwendung der Filter Schmelze detektiert wird. Die Änderung der Intensität der in Schwarz dargestellten Pixel basiert somit auf Reflexionen oder umherfliegenden Schmelztropfen. Für die Auswertung der Eigenschaften des Schmelzbades wird lediglich der Bereich mit weißen Pixeln, zur Reduzierung der Datenmenge, ausgewertet.

2. Bestimmung von Schmelzbadbreiten und -längen:

Die Ermittlung charakteristischer Eigenschaften der Schmelze basiert auf den Werten der Intensität, die in dem Array hinterlegt sind. Angenommen wird dabei, dass die detektierten Intensitäten exponentiell mit den Temperaturen des Materials korrelieren. Folglich kann ein Wert der Intensität (Liquidusintensität – I_{liq}) ermittelt werden, bei welchem der Phasenübergang von erstarrtem zu aufgeschmolzenem Material vorliegt. Diese Intensität kann mit der Liquidustemperatur korreliert werden. Gleiches gilt für einen Wert der Intensität, bei der das aufgeschmolzene Material zu erstarren beginnt (Solidusintensität – I_{sol}). Beide Werte sind in der entwickelten Software als Variablen definiert und müssen material- und von der Einbausituation abhängig einmalig iterativ ermittelt sowie anschließend validiert werden.

Zur Bestimmung der **Schmelzbadbreite** wird jede Spalte von Pixeln in y-Richtung einzeln über die gesamte Anzahl der Bilder innerhalb eines Videos analysiert, vgl. Formel (4-6).

$$B_{HSK} = \Delta_y P(y_i, \tau) * u_{HSK} \quad (4-6)$$

Dabei wird ausgewertet, wie hoch die größte Anzahl zusammenhängender Pixel $\Delta_y P(y_i, \tau) = max$ ist, deren Intensitätswert die Liquidusintensität überschreitet. Diese Anzahl wird mit einem Umrechnungsfaktor multipliziert, sodass die wahre Breite bestimmt werden kann. Dieser Umrechnungsfaktor u_{HSK} , der die Länge der Kante eines Pixels darstellt, wird nach Formel (4-7) ermittelt.

$$u_{HSK} = \frac{\Delta L_{1-n}}{\Delta P_{1-n}} = \frac{v_s * \frac{\Delta \tau_{1-n}}{f}}{\Delta P_L} \quad (4-7)$$

Grundlegend wird dazu der reale Abstand (ΔL_{1-n}) zwischen zwei auf der y-Achse liegenden Pixeln durch den Abstand in Pixeln ΔP_{1-n} geteilt. Die reale Länge wird in diesem Fall in den Videos ermittelt, indem die Scangeschwindigkeit v_s des Lasers mit dem Quotienten der Anzahl von Bildern $\Delta \tau_{1-n}$, die benötigt werden, sodass der Laser von Pixel 1 zu Pixel n bewegt wurde, sowie der eingestellten Aufnahmezeit f in Bildern pro Sekunde, multipliziert wird.

Schematisch ist die Methodik zur Bestimmung von Schmelzbadbreiten in Abbildung 4-14 dargestellt. Auf der linken Seite sind untereinander vier zeitlich aufeinanderfolgende Bilder eines Videos abgebildet. Alle Bilder wurden in diesem Fall an der vertikal (y-Richtung) ausgerichteten, grauen Linie ausgewertet. Im Diagramm auf der rechten Seite sind die Verläufe der ermittelten Intensitäten über der y-Position aufgetragen.

Ersichtlich sind unterschiedlich stark ausgeprägte Verläufe der Intensitäten zu fortlaufenden Zeitpunkten. Der Abstand des Lasers in Relation zur ausgewerteten Spalte nimmt zu. Folglich sinkt die Temperatur des Materials an der ausgewerteten Stelle. Als vertikale rote Linie ist im Diagramm zur Veranschaulichung eine – für die Darstellung frei gewählte – Liquidusintensität dargestellt. Der Schnittpunkt dieser Linie mit den Intensitätsprofilen stellt die Schmelzbadbreite zum jeweiligen Zeitpunkt dar. Für die Bestimmung der Breite wird, wie im Voraus beschrieben, der maximal ermittelte Wert angenommen.

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

In Abbildung 4-14 entspricht das der Differenz zwischen den Werten y_2 und y_1 , welche durch die Schnittpunkte mit der Intensität zum Zeitpunkt $t_1 = 0 \mu\text{s}$ ermittelt wurden.

Zur Bestimmung der Liquidusintensität erfolgt ein iterativer Vergleich realer und der mit dieser Methode bestimmten Schmelzbadbreiten. Reale Schmelzbadbreiten werden in dieser Arbeit durch Mikroskopie basierte Vermessungen von Einzelspuren ermittelt. Genauer ist dieses Verfahren in den Ergebnissen, in Unterabschnitt 5.4.1, beschrieben.

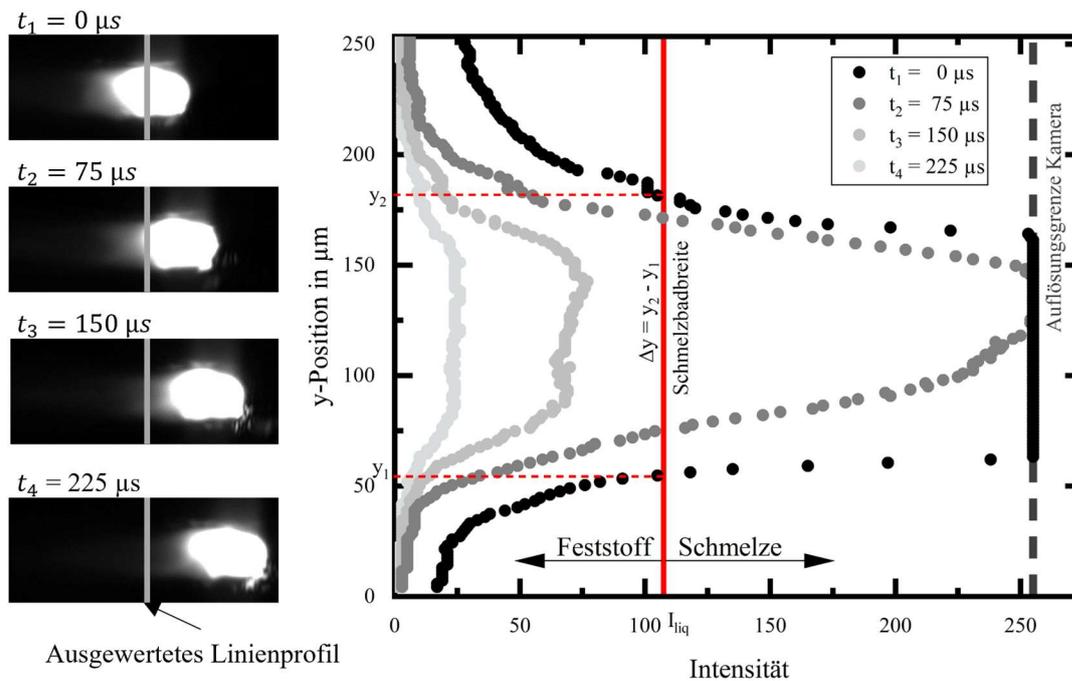


Abbildung 4-14: Beispielhafte Auswertung von Intensitäten an Linienprofilen (y-Richtung) in vier aufeinanderfolgenden Bildern eines HSK-Videos. Zusätzlich dargestellt ist eine frei gewählte Intensität, mit der die Bestimmung der Breite des Schmelzbades schematisch dargestellt wird.

Um die **Schmelzbadlängen** ermitteln zu können, wird zunächst die Mitte des Schmelzbades im Video analysiert und durch diese eine zur x-Achse parallele Linie definiert. Dargestellt ist diese beispielhaft in Abbildung 4-15 im zweiten Bild von oben, als graue vertikale Linie. Entlang dieser Linie werden anschließend, in definierten Abständen, die Schmelzbadlängen ermittelt. In dem Diagramm sind unter den Bildern die Linienprofile dargestellt, welche sich durch die Auswertung ebendieser drei ergeben. Er-sichtlich wird der Verlauf der Intensitäten. Der Laser, der von links nach rechts belichtet, erhöht die Temperatur des Materials, die spezifische Emission und somit auch die detektierte Intensität im Bildausschnitt. Die emittierte Intensität in der Mitte des Schmelzbades übersteigt dabei die von der Kamera detektierbare Intensität von 255, sodass in einem gewissen Bereich der Maximalwert ausgegeben wird. Die bereits im Voraus ermittelte Liquidusintensität wird genutzt, um zu bestimmen, ab welchem Zeitpunkt der Phasenwechsel zwischen festem und flüssigem Material vorliegt – rote horizontale Linie. Um den Effekt unterkühlter Schmelzen und somit den späteren Phasenwechsel aus dem flüssigen zum festen Stadium berücksichtigen zu können, wird die Solidusintensität eingeführt. Die Ermittlung der Schmelzbadlänge erfolgt somit, sobald die Intensität den Wert I_{liq} übersteigt bis zu dem Zeitpunkt, an dem I_{sol} unterschritten wird.

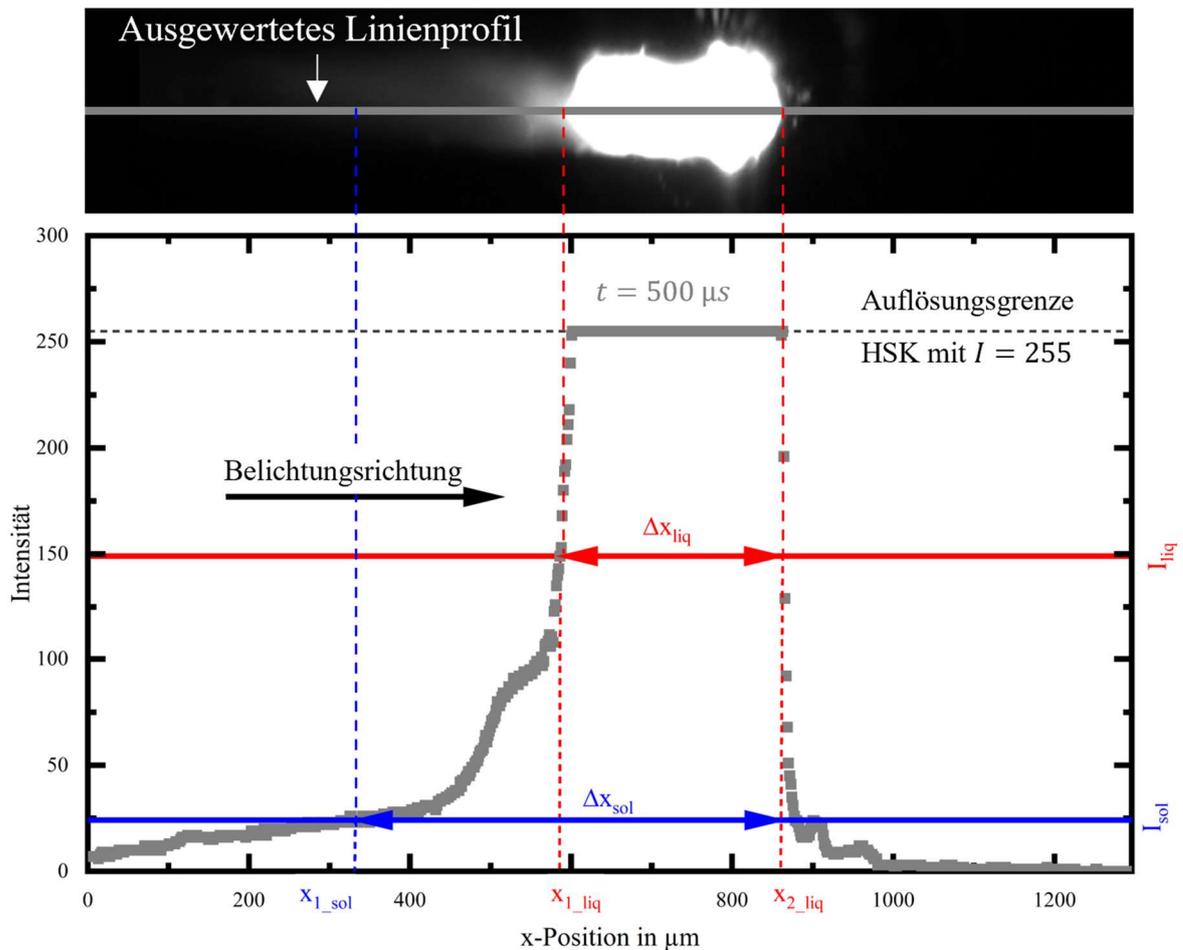


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung der Methode zur Auswertung von Schmelzbadlängen anhand der Datenbasis, welche mittels des HSK-Systems aufgenommen wurde.

Der Abstand in Pixeln, der zwischen diesen beiden Stadien liegt, wird mit $\Delta_x P(y_i, \tau)$ bezeichnet. Somit kann die Schmelzbadlänge L_{HSK} mit folgender Formel berechnet werden:

$$L_{HSK} = \Delta_x P(y_i, \tau) * u_{HSK} \quad (4-8)$$

Die Bestimmung von I_{sol} erfolgt, ebenso wie bei der Bestimmung der Schmelzbadbreite, in einem iterativen Ansatz, bei welchem die mittels HSK-Software ermittelte von I_{sol} abhängige Schmelzbadlänge mit der händisch bestimmten Länge verglichen wird. Tiefer wird auf die Auswertung in Unterabschnitt 5.4.1 eingegangen.

3. Bestimmung von lokalen Abkühlraten:

Neben der Bestimmung geometrischer Eigenschaften, wie der Länge und Breite des Schmelzbades, werden auch Abkühlauern aller Bereiche im HSK-Video ausgewertet, die einen definierbaren Schwellwert der Intensität I_{Sch} für eine einstellbare Mindestdauer τ_{min} überschreiten. In Abbildung 4-16 ist im Diagramm ein Intensitätsverlauf über der Zeit mit schwarzen Punkten aufgetragen. Der ausgewertete Pixel (rotes Kreuz in den Bildern) befindet sich mittig auf der Schmelzbahn. Ebenso ist die Position, an welcher der Laser auf der Oberfläche fokussiert wird, mit einem roten Kreis markiert. Zum Zeitpunkt

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

$t = 0 \mu\text{s}$ bzw. in Bild 1 ist der Laser noch nicht im Bildausschnitt ersichtlich, die detektierte Intensität beträgt 0. Sinkt die Distanz zwischen dem Laserspot und dem Pixel, der ausgewertet wird, so steigt die Intensität an – Bild 2. Im nächsten Bild findet die Belichtung des Materials im ausgewählten Pixel statt, die Intensität steigt innerhalb kürzester Zeit auf den Maximalwert von 255 an. Ab Bild 4 befindet sich die Position des Lasers nicht im Bereich des Pixels, die detektierte Intensität bleibt jedoch noch über einen Zeitraum von $\Delta t = 225 \mu\text{s}$, bis zu Bild 5, maximal. Anschließend beginnt die detektierbare Abkühlphase des Materials, wobei der Wert der Intensität abnimmt. In Punkt 6, bei dem der Laser nicht mehr im Bildbereich ist, ist ein unsteter Verlauf des Messsignals ersichtlich. Hier steigt die Intensität und somit theoretisch die Temperatur am betrachteten Pixel an, ein Vorgang, der ohne erneute Energieeinbringung oder das Auftreten besonderer Phänomene nicht möglich ist. Ersichtlich wird bei der Betrachtung des Videos eine Bewegung des Schmelzbades im hinteren Bereich, welche sich quer zur Scanrichtung bzw. vertikal ausprägt. Zurückzuführen ist die Bewegung auf Strömungen innerhalb des Schmelzbades, wie die Marangoni-Konvektion [84]. Durch diese wird Schmelze nahezu zyklisch entlang der y-Achse bewegt. Im letzten Bild ist das Material beinahe abgekühlt und optisch kaum Intensität zu erkennen, mittels Kamera wird jedoch noch Strahlung detektiert.

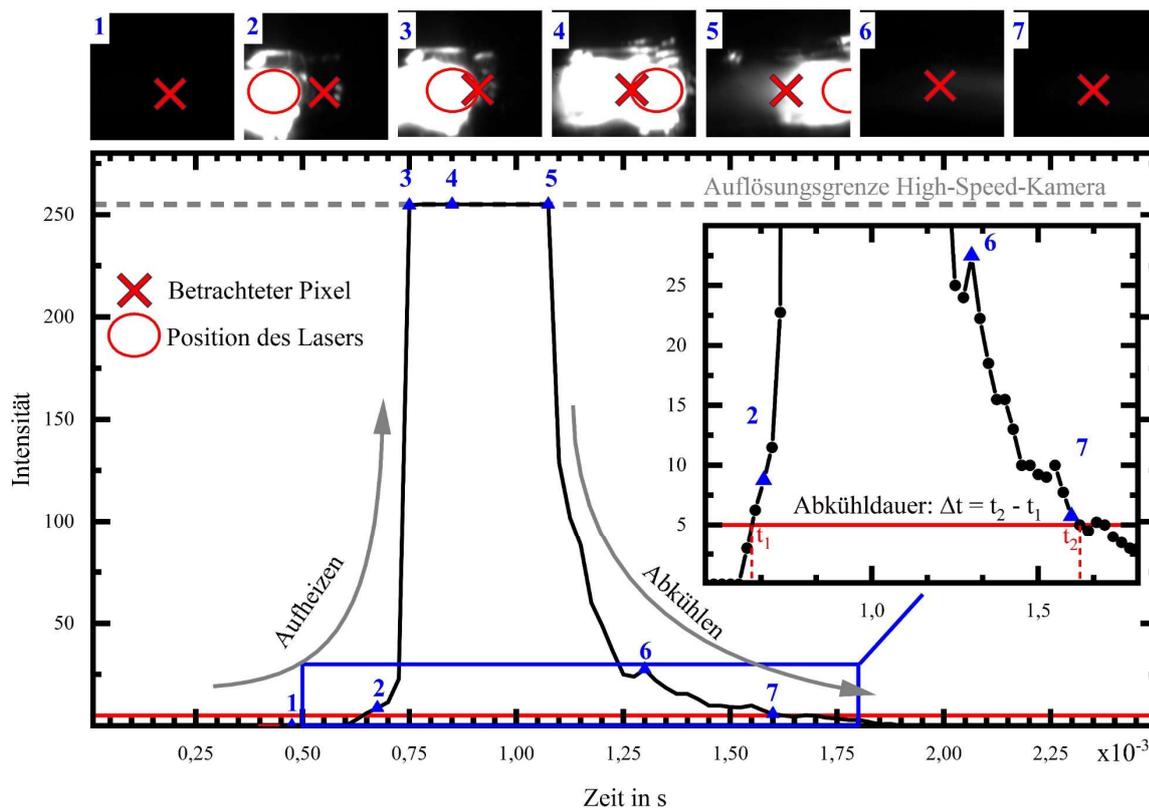


Abbildung 4-16: Oben: Sieben aufeinanderfolgende Bilder aus einem HSK-Video unter Angabe des Pixels (rotes Kreuz), der für die Auswertung der zeitlichen Intensitätsverläufe ausgewählt wurde. Unten: Zeitlicher Verlauf der Intensität über der Zeit, mit Darstellung der Methode zur Ermittlung der Abkühlung.

Insgesamt wird ersichtlich, dass das Aufheizen des Materials deutlich schneller $\Delta t_h = 250 \mu\text{s}$ (bis Bild 4) geschieht als seine Abkühlung (ab Bild 4) $\Delta t_c = 1025 \mu\text{s}$. Aufgrund der Übersteigerung der maximal detektierbaren Intensität von 255 ist eine genaue Bestimmung des Zeitpunktes, an dem die maximale

Temperatur erreicht wird bzw. die Abkühlung des Materials einsetzt, nicht möglich. Deshalb wird die Abkühldauer in dieser Dissertation angenommen als der Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt, an dem die Intensität das letzte Mal den Wert von $I_{max} = 255$ aufweist (t_1), und dem Zeitpunkt, an dem die Intensität das erste Mal den Wert $I_{min} = 0$ annimmt (t_2).

Um das Abkühlungsverhalten von Einzelspuren und dessen Homogenität optisch besser bewerten zu können, werden die Werte der Abkühlauern in einem Heatmap-Diagramm aufgetragen.

4.4.4 Korrelation zwischen Oberflächentemperatur und detektierten Strahlungsintensitäten

Die Möglichkeit zur Korrelation zwischen der Oberflächentemperatur und der detektierten Strahlungsintensität eines Körpers stellt einen entscheidenden Schritt in der Temperaturmessung mittels High-Speed-Kamera-System dar. Eine mathematische Korrelation zwischen der Intensität und der realen Temperatur ist nicht mit ausreichender Genauigkeit herleitbar. Dies liegt unter anderem daran, dass die Emissionswerte des verwendeten Materials temperatur- und wellenlängenspezifisch sind. Diese Materialkennwerte stehen bislang jedoch nur in nicht ausreichendem Umfang zur Verfügung. Aus diesem Grund wird ein Prüfstand genutzt, in welchem Probekörper mittels Induktionsofens, unter ständiger Spülung mit Schutzgas, gezielt erwärmt werden können. Das verwendete Schutzgas „Argon Spektrum W5“ von AIR LIQUIDE Deutschland GmbH [158] soll die Oxidation der Oberfläche und somit eine Änderung des Emissionskoeffizienten unterbinden. Ein Anteil von 5 % Wasserstoff soll durch die reduzierende Wirkung möglichen Sauerstoffkontaminationen im Prüfstand entgegenwirken [159]. Während der Erwärmung der Probe kann diese gleichzeitig mit der High-Speed-Kamera (vgl. Tabelle 4-7) und ebenso mit einem High-Speed-Pyrometer analysiert werden.

Tabelle 4-8: Eigenschaften und Einstellungen des verwendeten High-Speed-Pyrometers zur Korrelation der detektierten Intensität mit Oberflächentemperaturen [160].

Hersteller	Sensortherm GmbH
Modell	Metis H322
Spektralbereich	Kanal 1: 1,65 μm – 1,8 μm ; Kanal 2: 1,45 μm – 1,65 μm
Messbereich	700 °C – 2 300 °C
Fokusabstand	240 mm
Messfelddurchmesser	1 mm
Messunsicherheit	0,5 % von Messwert in °C + 1 K
Einstellzeit	< 80 μs
Erfassungszeit	< 40 μs
Emissionsgradverhältnis	$\varepsilon_V = \varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$

Bei dem High-Speed-Pyrometer handelt es sich um das Modell Metis H322 der Firma Sensortherm GmbH, mit welchem Temperaturmessungen in einem Bereich von 700 °C bis 2 300 °C möglich sind. Weitere Angaben zu diesem sind in Tabelle 4-8 aufgeführt.

Die gleichzeitige und zeitlich hochauflösende Messung der Strahlungsintensität mittels High-Speed-Kamera sowie der Oberflächentemperatur mittels Quotienten-

pyrometer bietet die Möglichkeit einer direkten Korrelation der beiden Kennwerte. Eine Übersicht des Prüfstandes mit den wichtigsten Komponenten sowie die Positionierung zwischen Pyrometer und High-Speed-Kamera sind in Abbildung 4-17 dargestellt.

4.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

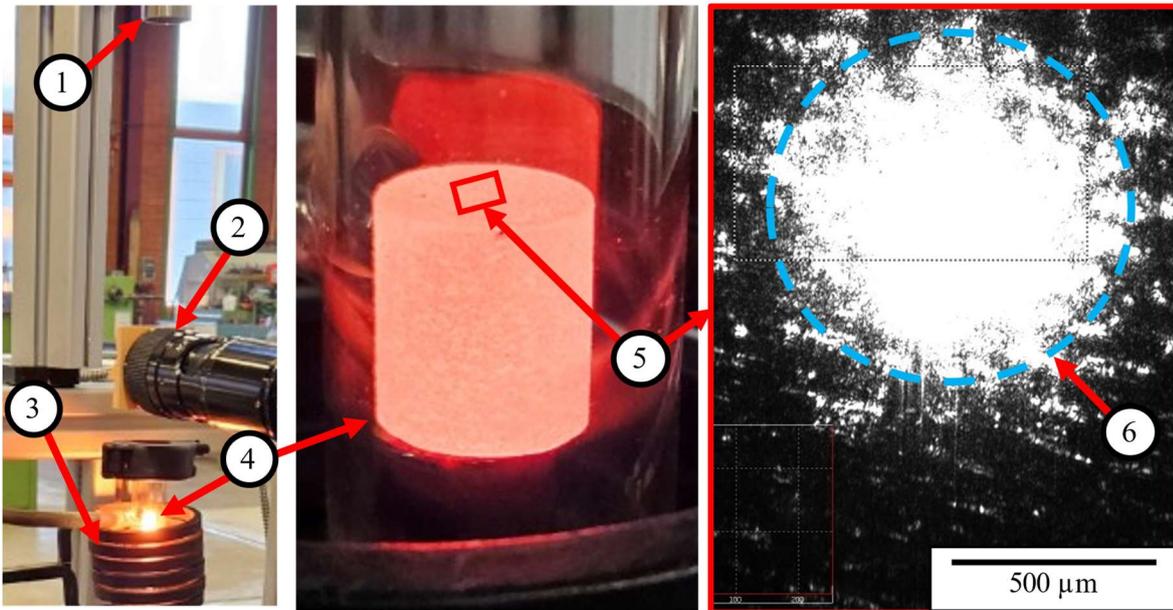


Abbildung 4-17: Hauptkomponenten des Prüfstandes zur Korrelation der mittels High-Speed-Kamera detektierten Intensitäten und Oberflächentemperaturen gemessen mittels Quotienten-Pyrometer: 1) Optik des Quotienten-Pyrometers; 2) Objektiv der High-Speed-Kamera mit vorgeschaltetem Spiegel zur Umlenkung des Strahlengangs; 3) Induktionsspule des Induktionsofens; 4) Erwärmter Probekörper; 5) Messbereich nahe der Mittelachse der Probe; 6) Intensität hervorgerufen durch den Positionierungslaser des Pyrometers.

Besondere Aufmerksamkeit wird in diesen Versuchen darauf gelegt, dass die Temperaturen respektive Intensitäten in einem selben Messbereich ausgewertet werden, siehe Abbildung 4-17 Nr. 6. Dadurch sollen Abweichungen der Emissionen, hervorgerufen bspw. durch Oberflächenanomalien, vermieden werden. Der Positionslaser des Pyrometers wird eingeschaltet und der Bildausschnitt des HSK-Systems auf diesen ausgerichtet – heller Bereich in der Abbildung, umrandet mit einem blau gestrichelten Kreis. Der Messbereich, in dem eine Korrelation durchgeführt wird, wird durch die Detektion der Emissionen definiert. So beginnt die Datenaufnahme bei Temperaturen, bei denen signifikante Änderungen der gemittelten Intensität auftreten $I_m \geq 1$. Beendet werden die Messungen, sobald die maximal detektierbare Intensität der Kamera $I_{max} = 255$ oder die für die Korrelationsversuche definierte maximale Temperatur $T_{max} = 1\,350\text{ °C}$ erreicht wird. Die maximale Temperatur wird anhand der Liquidustemperatur der Probekörper ausgewählt und liegt 50 °C unterhalb dieser, Daten dazu sind in Tabelle 4-2 aufgelistet. In den Versuchen werden Messungen bei unterschiedlichen Probekörpertemperaturen durchgeführt. Nach jeder Änderung der Ausgangsleistung des Induktionsofens, zur Steigerung der Temperatur, wird bis zur Messung eine Wartezeit von $t_{idle} = 120\text{ s}$ angesetzt. Mit dieser soll sichergestellt werden, dass die Probe möglichst homogen temperiert ist. Die Erhöhung der Temperaturen und somit die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten resultieren dabei aus der Bedienung des Induktionsofens, bei welchem lediglich die prozentuale Ausgangsleistung des Netzteils eingestellt werden kann. Diese wird in den Versuchen stufenweise um jeweils 3% erhöht und nach Erreichen des Höchstwertes um ebendiesen Wert stufenweise reduziert, um eine möglichst hochauflösende Korrelation darstellen zu können.

5 ERGEBNISSE

5.1 ANALYSE VON DEFEKTEN IN PBF-LB/M-GEFERTIGTEN KOMPONENTEN AUS 1.4542

Um das LSP-Monitoringsystem in den PBF-LB/M-Prozess integrieren und seine Potenziale bewerten zu können, ist es in einem ersten Schritt notwendig, Strategien zu entwickeln, mit denen definierte Defekte gezielt hervorgerufen werden können. Da das LSP-Monitoringsystem an einer EOS M270 erprobt werden soll, wurden die Strategien an dieser Anlage in Kombination mit dem Material EOS GP1 entwickelt, welches vom Anlagenhersteller vertrieben wird (vgl. Abschnitt 4.3). Die zunächst mittels Mikroskopie und MATLAB-Software (Unterabschnitt 4.2.2) bestimmten Defektarten sowie -größen sollen mit den Funktionswerten des LSP-Signals korreliert werden. Unterschieden wird in den durchgeführten Versuchen zwischen stochastisch verteilten Defekten und solchen deren Position sowie Größe definiert eingestellt werden kann. Die letzte Art der Defekte kann durch lokale Änderungen der Prozessbedingungen hervorgerufen werden, wie Spratzer, Beschädigungen der Beschichter und ähnliche. Weiterführend ist für die Bewertung des LSP-Messsignals und somit der Qualität des hergestellten Materials von Bedeutung, welcher Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften ausgeht. Aus diesem Grund wurden Probekörper gefertigt und analysiert, um mechanische Eigenschaften wie Härte, Bruchdehnung, maximale Zugfestigkeiten oder Dehngrenzen bestimmen zu können.

5.1.1 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4542

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ist die gezielte Auswahl der Kernprozessparameter einer der ausschlaggebenden Faktoren für die defektfreie Fertigung von Bauteilen im PBF-LB/M-Prozess. Bereits geringe Abweichungen von den definierten Werten können zu stochastisch verteilten Ausprägungen unterschiedlicher Defekte führen. Eine gezielte Manipulation der Prozessparameter wird in diesem Unterabschnitt vorgestellt, sodass LoF-Defekte ebenso wie Gasporen möglichst präzise hervorgerufen werden können. Gleichzeitig soll die Verteilung der Defekte bezüglich Position und Größe untersucht werden. Bei der Entwicklung der Strategien wird jeweils nur ein Parameter, wie die Scangeschwindigkeit v_S oder die Laserleistung P_L , variiert und die restlichen Parameter werden konstant gehalten.

Für jede Variation der Prozessparameter wurden je fünf zylindrische Probekörper (Durchmesser d_z und Höhe h_z von jeweils $d_z = h_z = 10 \text{ mm}$) gefertigt, wobei das gesamte Volumen mit diesen belichtet wurde. Die verwendeten Parameterkombinationen sind in Tabelle T 2 (Anhang) dargestellt. Nach der Fertigung der Proben wurden diese nach Unterabschnitt 4.2.1 lichtmikroskopisch analysiert und die relative Dichte wurde mit dem MATLAB-Tool, beschrieben in Unterabschnitt 4.2.2, bestimmt. Die ermittelten relativen Dichten in Prozent werden zur besseren Vergleichbarkeit über der E_V aufgetragen, siehe Abbildung 5-1.

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

Die eingebrachte Volumenenergiedichte des Standardprozessparametersatzes ($E_V = 97,5 \text{ J/mm}^3$) ist in Abbildung 5-1 mit einem rot gestrichelten Kreis dargestellt sowie mit einer ‚3‘ versehen.

Eine vertikale gestrichelte Linie definiert die ermittelte Grenze der Prozessierbarkeit, welche die minimal nutzbare $E_V = 37,5 \text{ J/mm}^3$ in diesen Versuchsreihen aufzeigt. Werden Prozessparameter genutzt, bei denen eine geringere E_V in das Material eingebracht wird, beginnen Teile der Probekörper während des Prozesses durch den Beschichter mitgerissen zu werden, was auf eine unzureichende Verschmelzung des Materials sowie lokale Überhöhungen hinweist. Prozessunterbrechungen oder Abbrüche resultieren daraus. Bei der geringsten E_V weisen die Probekörper die geringste gemessene relative Dichte von $\rho_{rel} = 90,57 \% \pm 1,23 \%$ auf. Der Punkt ist mit ‚1‘ markiert. Im zugehörigen Schlibbild ist ersichtlich, dass Defekte der LoF-Klasse entstanden sind, die für eine Reduktion der eingebrachten Volumenenergie typisch sind [23, 33, 161, 162].

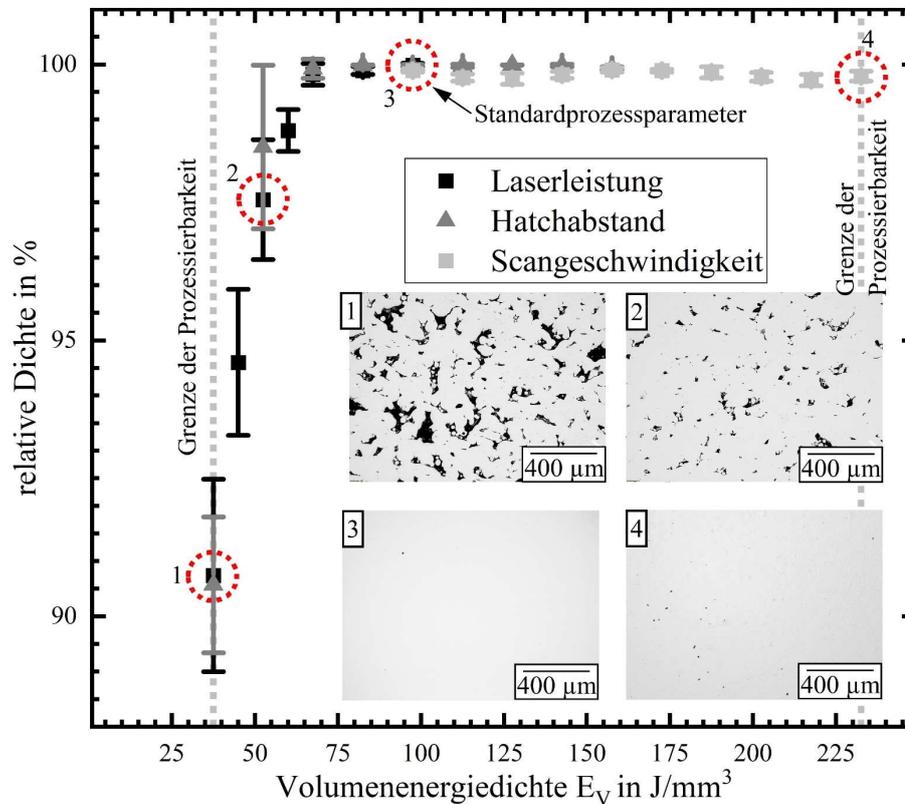


Abbildung 5-1: Ermittelte relative Dichte von Probekörpern aus dem Werkstoff EOS GP1 gefertigt auf einer EOS M270 mit den variierten Prozessparametern: Laserleistung, Hatchabstand, Scangeschwindigkeit.

Durch eine Erhöhung der Volumenenergiedichte verringert sich der Anteil an Defekten im Materialvolumen. Bei einer Volumenenergiedichte von $E_V = 60 \text{ J/mm}^3$ steigt die relative Dichte auf 98,8 %. Markiert ist dieser Datenpunkt mit der Nummer ‚2‘, eine Reduktion der LoF-Defekte in Anzahl, aber auch in Größe ist ersichtlich. Ab einer $E_V = 67,5 \text{ J/mm}^3$ steigt die relative Dichte auf über 99,8 %. Innerhalb der Versuchsreihe konnte durch Erhöhungen der Volumenenergiedichte bis zu $E_V = 232,5 \text{ J/mm}^3$ keine geringere relative Dichte ermittelt werden. Die beschriebene maximal genutzte Volumenenergiedichte wurde durch eine Reduzierung der genutzten Scangeschwindigkeit auf

$v_S = 420 \text{ mm/s}$ erreicht und stellt die zweite Grenze der Prozessierbarkeit in dieser Versuchsreihe dar. Eine Reduktion der eingebrachten Volumenenergiedichte hat somit anscheinend einen stärkeren Einfluss als eine Erhöhung.

In Schliffbild 3 ist die Analyse der Probe dargestellt, welche mit dem Standardprozessparametersatz hergestellt wurde. Diese Probe besitzt in der vorliegenden Versuchsreihe die höchste relative Dichte von $\rho_{rel} = 99,98 \%$ mit der geringsten Standardabweichung von $\delta_{St} = 0,003 \%$. Im vierten Schliffbild ist das Material einer Probe dargestellt, die mit der höchsten genutzten $E_V = 232,5 \text{ J/mm}^3$ gefertigt wurde. Ersichtlich wird, dass die Anzahl an sichtbaren Defekten zunimmt, gleichzeitig sinkt die detektierte relative Dichte auf $\rho_{rel} = 99,78 \% \pm 0,09 \%$. Die Defekte sind aufgrund der sphärischen Form der Defektklasse ‚Gasporen‘ zuzuordnen [7, 91]. Die Anzahl der Defekte ist im gezeigten Schliffbild sowie in weiteren Untersuchungen vergleichsweise gering. Die Verteilung der Gasporen ist unregelmäßig, der Durchmesser beträgt durchschnittlich $d_D = 19,1 \mu\text{m}$.

Neben der relativen Dichte, die aus der Manipulation der Prozessparameter hervorgeht, kann ebenso die Größe, aber auch die Anzahl von Defekten untersucht werden. Zur Bestimmung dieser Werte wurden die Ergebnisse, ermittelt mit dem MATLAB-Tool, gefiltert. Defekte mit einer Größe kleiner gleich $A_{Def} = 8 \mu\text{m}^2$ wurden für die Auswertung ausgeschlossen, um Fehldetektionen, hervorgerufen durch lokale Verunreinigungen oder Schwankungen der Intensität, zu vermeiden. Dargestellt sind im Folgenden Ergebnisse, die durch eine Variation der Laserleistung P_L hervorgerufen wurden.

In Abbildung 5-2 ist die durchschnittliche Anzahl von Defekten, die in der x/z-Ebene je mm^2 auftreten, ebenso über der genutzten Laserleistung aufgetragen wie die durchschnittliche Fläche dieser Defekte. Beide Kennwerte können mit einer exponentiellen Fit-Funktion, aufgeführt in der Abbildung, angenähert werden.

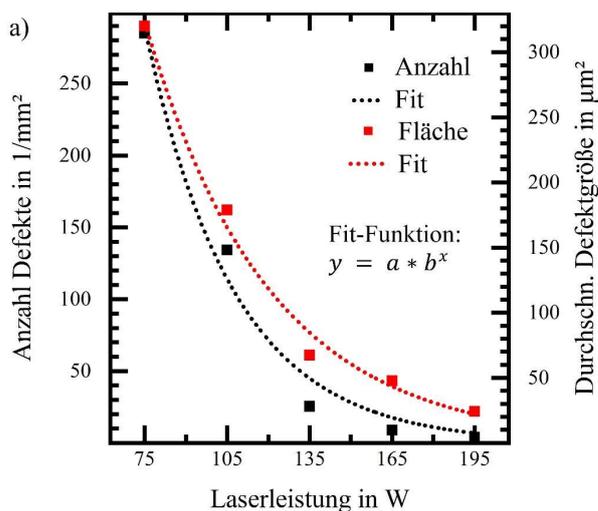


Abbildung 5-2: Defektgröße je mm^2 und durchschnittliche Defektfläche in x/z-Ebene in Abhängigkeit von der Laserleistung.

Die geringste Anzahl an Defekten von $n_{Def} = 4 \text{ mm}^{-2}$ wird bei Proben ermittelt, die mit Standardprozessparametern gefertigt wurden. Die durchschnittliche Defektfläche beträgt $A_{Def} = 24,29 \mu\text{m}^2$. Bei einer Reduzierung der Laserleistung auf $P_L = 165 \text{ W}$ erhöht sich die Anzahl der Defekte auf $n_{Def} = 9 \text{ mm}^{-2}$, bei $A_{Def} = 47,67 \mu\text{m}^2$. Bei weiteren Reduzierungen der Laserleistung ist ein exponentieller Anstieg der Defektanzahl und Größe ersichtlich. Die Anzahl der Defekte bei $P_L = 135 \text{ W}$ beträgt $n_{Def} = 26 \text{ mm}^{-2}$

(+ 188,89 %), bei $A_{Def} = 67,44 \mu\text{m}^2$. Die höchste Anzahl an Defekten $n_{Def} = 285 \text{ mm}^{-2}$ wird bei einer Laserleistung von $P_L = 75 \text{ W}$ ermittelt, die Fläche der Defekte steigt deutlich auf

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

$A_{Def} = 320 \mu m^2$. Detaillierter sind diese und weitere Kennwerte zu den Defekten in Tabelle T 3 im Anhang aufgeführt.

5.1.2 Auswirkungen von Defekten auf mechanische Eigenschaften

Die Entwicklung von PBF-LB/M-Anlagen und deren Monitoringsystemen wird immer weiter vorangetrieben. Ausprägungen von Defekten in Bauteilen können bislang trotzdem nicht ausgeschlossen werden, da nicht alle Phänomene, die für die Entstehung von Defekten verantwortlich sind, detektiert werden können. Größe, Anzahl und Position auftretender Fehler sind abhängig von der Ursache, wobei sich die Defekte über das gesamte Bauteil erstrecken können oder lokal ausgeprägt sind. Fehlerursachen können beschädigte Klingen oder Silikonlippen des Beschichters sein, wodurch lokal ein zu hohes Pulvervolumen abgelegt wird. Der Prozessgasfluss und die Ausrichtung der Geschwindigkeitsvektoren können lokal die Qualität des aufgetragenen Pulvermaterials verändern oder Interaktionen zwischen Laser und Prozessprodukten hervorrufen. Auch kann die Qualität der Abführung von Prozessprodukten minimiert werden, sodass sich diese auf der Bauplattform ablegen. Lokale Verunreinigungen, wie Schmauch oder Kratzer auf dem Lasereintrittsfenster, führen dazu, dass der Laser mit variierenden Eigenschaften auf das Pulverbett gelenkt wird. In Abhängigkeit von den Prozessanomalien können die Defekte in einem definierten Volumen bzw. Bereich auf der Bauplattform auftreten, sich aber auch über das gesamte Bauteilvolumen erstrecken. Alle beschriebenen Phänomene führen dazu, dass das Verhältnis von Energie zum Materialvolumen sinkt. In der Folge entstehen zumeist Defekte der Klasse LoF. In diesem Unterabschnitt wird deshalb untersucht, wie sich LoF-Defekte, die in unterschiedlichen Ausprägungen in den Probekörpern hervorgerufen werden, auf die mechanischen Eigenschaften ausprägen.

Stochastisch verteilte Defekte im gesamten Probekörper

Bereits im vorangegangenen Unterabschnitt konnte der Zusammenhang zwischen den eingestellten Prozessparametern und der resultierenden relativen Dichte dargestellt werden, ebenso wie Art, Anzahl und Größe von Defekten in Probekörpern aus EOS GP1.

Zur Ermittlung der Auswirkung von LoF-Defekten, die stochastisch verteilt im gesamten Volumen von Zugstabrohlingen auftreten, wurden sieben Prozessparametersätze definiert, mit denen Zugstabrohlinge im PBF-LB/M-Prozess gefertigt werden, vgl. Tabelle 5-1. Variiert wurde die Laserleistung P_L , die restlichen Prozessparameter wurden nicht verändert, um die eingebrachte Volumenenergiedichte zu reduzieren.

Tabelle 5-1: Genutzte Prozessparameter zur Fertigung von Zugstabrohlingen mit stochastisch verteilten Defekten – Material EOS GP1; Anlage: EOS M270.

	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7*
P_L in W	75	90	105	120	135	165	195
ρ_{rel} in %	90,74	94,60	97,55	98,80	99,82	99,89	99,98

$v_S = 1\,000 \text{ mm/s}$; $h = 0,1 \text{ mm}$; $d_S = 0,02 \text{ mm}$; Prozessgas: Stickstoff; $b = 10 \text{ mm}$; Rotation Scanmuster $\alpha_{rot} = 67^\circ$

*: Referenzparametersatz und maximale Laserleistung der EOS M270 PBF-LB/M-Anlage

Für jede Variation werden jeweils vier Rohlinge mit den Maßen $\varnothing 12 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ vertikal ausgerichtet, auf einer EOS M270 PBF-LB/M-Fertigungsanlage aus dem Material EOS GP1, gefertigt. Nachbearbeitet wurden die Proben nach DIN 50125-C 5 x 25 und nach Angaben in Unterabschnitt 4.2.4 untersucht. In Abbildung 5-3 ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt, in welchem für jeden Probensatz eine charakteristische Kurve aus den Zugversuchen wiedergegeben ist. Der globale Verlauf verändert sich in Abhängigkeit von der eingestellten Defektausprägung. Bei der Referenzprobe ($\rho_{rel} = 99,98 \%$) prägt sich nach dem elastischen Bereich eine deutliche obere und untere Streckgrenze aus, die Lüdersdehnung ist ebenfalls ausgeprägt. Nach dem Erreichen der maximalen Zugfestigkeit ist die Ausprägung einer Einschnürung zu erkennen. An Probekörpern, die mit 165 W und $\rho_{rel} = 99,89 \%$ gefertigt wurden, kann ein ähnlicher Verlauf beobachtet werden, eine Beeinflussung durch die eingebrachten Defekte scheint nicht gegeben. Je mehr Defekte durch die Reduktion der genutzten Laserleistung eingebracht werden, desto geringer fällt die Streckgrenze und somit die elastische Verformung der Proben aus. Deutlich ersichtlich wird ebenfalls, dass der Streckgrenzen-Effekt bzw. die Ausprägung der Lüdersdehnung abnimmt. Ab einer genutzten Laserleistung von 120 W und geringer ist der Streckgrenzen-Effekt nicht mehr zu beobachten. Für die Ausprägung der Lüdersdehnung ist im Material GP1 der Anteil von (Rest-) Austenit verantwortlich, der unter Belastung im Zugversuch durch den TRIP-Effekt zu Martensit gewandelt wird [163–165].

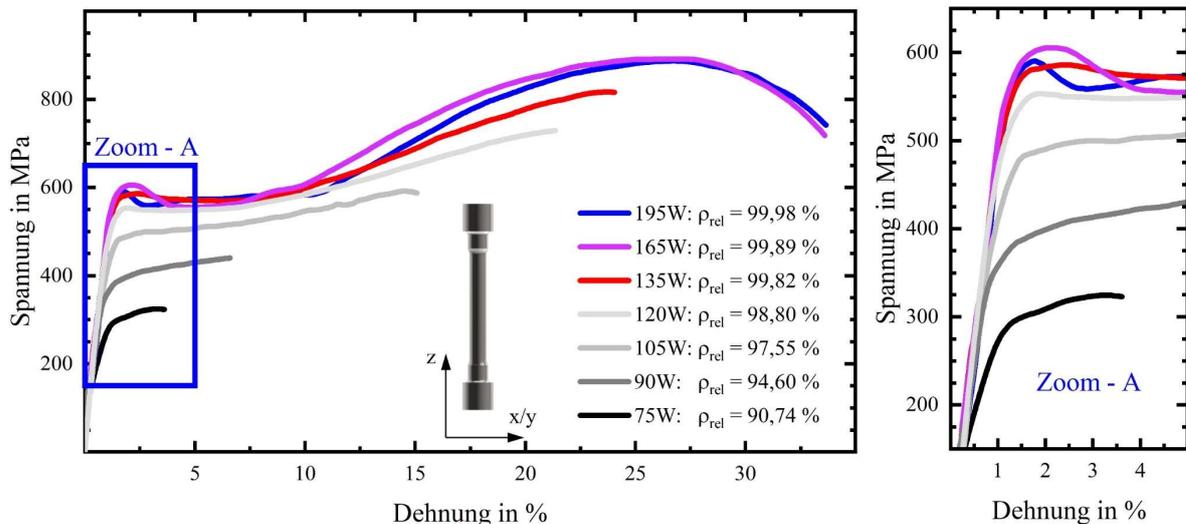


Abbildung 5-3: Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Zugversuchen an Probekörpern gefertigt im PBF-LB/M-Verfahren aus dem Material EOS GP1, wobei der Parameter Laserleistung P_L variiert wurde, um Defekte definiert hervorzurufen.

Ableiten lässt sich davon, dass der Anteil von Austenit mit reduzierter eingebrachter Volumenenergie-dichte abnimmt, oder aber, dass der Austenit aufgrund der geringen Belastbarkeit des restlichen Materials und des damit verbundenen frühzeitigen Versagens nicht mehr genug Belastung erfährt, um mittels TRIP-Effekt umgewandelt zu werden. Eine detailliertere Betrachtung des Anteils von Austenit entfällt jedoch an dieser Stelle, da dies nicht im Fokus der Untersuchungen liegt. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass das duktile Verhalten durch vorhandene Defekte reduziert wird und sich

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

spröde Brüche einstellen, was auch anhand der Bruchverläufe der Zugproben deutlich wird, vgl. Abbildung 5-4.

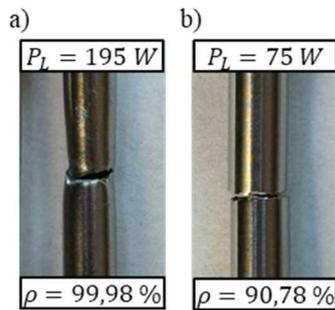


Abbildung 5-4: Zugstäbe nach Zugversuchen: a) duktiler Bruch bei Proben mit einer relativen Dichte von 99,98 %; b) spröder Bruch bei $\rho_{rel} = 90,78 \%$.

Obwohl eine Vielzahl mechanischer Kennwerte durch die Einbringung von Defekten in die Zugstäbe beeinflusst wird, werden im Folgenden nur die Eigenschaften maximale Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A betrachtet. In Abbildung 5-5 sind die ermittelten Medianwerte der maximalen Bruchdehnungen in a) sowie der maximalen Zugfestigkeiten in b) jeweils über der relativen Materialdichte der Probekörper aufgetragen. Die durchschnittliche maximale Bruchdehnung von Probekörpern mit einer relativen Dichte von 99,98 % liegt bei $33,5 \pm 0,75 \%$ und somit in dem im Datenblatt angegebenen Intervall von $35 \pm 5 \%$. Der Medianwert der ermittelten maximalen Zugfestigkeiten derselben Probekörper beträgt $911 \pm 3,6 \text{ MPa}$ und befindet sich

somit am unteren Ende des angegebenen Intervalls von $960 \pm 50 \text{ MPa}$ [166]. Die Defekte, die dabei in den Schlifffbildern ermittelt wurden, vier Defekte je mm^2 mit einer durchschnittlichen Fläche von $A_{def} = 24 \pm 21 \mu\text{m}^2$, scheinen somit keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu besitzen.

Bei einer reduzierten relativen Dichte von 99,89 % werden lediglich geringe Abweichungen in den mechanischen Eigenschaften ersichtlich, obwohl die Anzahl an Defekten auf 9 Stück pro mm^2 ansteigt, ebenso wie die Fläche auf $A_{def} = 47 \pm 52 \mu\text{m}^2$. Die maximale Zugfestigkeit sinkt von $911 \pm 3,6 \text{ MPa}$ um 0,98 % auf $902 \pm 7,3 \text{ MPa}$ sowie die maximale Bruchdehnung von $33,5 \pm 0,75 \%$ um 1,11 % auf $33,13 \pm 0,56 \%$. Wird die relative Dichte der Probekörper weiter reduziert, so können signifikante Veränderungen der mechanischen Eigenschaften beobachtet werden. Dies beginnt bereits bei einer Reduktion der Dichte auf 99,82 %. Dabei sinkt die maximale Zugfestigkeit um 14,5 % auf $774,8 \pm 55,9 \text{ MPa}$, wobei die Streuung und somit die Standardabweichung innerhalb der Probenreihe deutlich zunimmt. Noch wesentlicher beeinflusst ist die maximale Bruchdehnung, welche um 39,2 % auf $20,38 \pm 3,66 \%$ abfällt. Die Anzahl der Defekte steigt auf 26 Stück je mm^2 mit einer Fläche von $A_{def} = 67 \pm 101 \mu\text{m}^2$. Der größte detektierte Defekt weist eine Querschnittsfläche in der x/z-Ebene von $790 \mu\text{m}^2$ auf. Diese Anzahl und Größe von Defekten können als kritische Grenze definiert werden. Je weiter die eingestellte relative Dichte der Zugproben sinkt, wobei die Anzahl und Größe der LoF-Defekte ansteigt (vgl. Tabelle T 3 im Anhang), desto stärker werden diese beiden Kennwerte beeinflusst. Die geringste maximale Zugfestigkeit von $325 \pm 2,5 \text{ MPa}$ (Reduktion um 64,33 %) und Bruchdehnung von $2,75 \pm 0,55 \%$ (Reduktion um 92,15 %) wurden bei der Probenreihe festgestellt, bei welcher die geringste Laserleistung ($P_L = 75 \text{ W}$) für die Fertigung der Zugstabrohlinge genutzt wurde. Die relative Dichte von 90,74 % ist innerhalb dieser Versuchsreihe die geringste, es treten 286 Defekte pro mm^2 auf, die eine Querschnittsfläche von $A_{def} = 320 \pm 1093 \mu\text{m}^2$ aufweisen. Der größte analysierte Defekt weist eine Querschnittsfläche von $A_{def_max} = 27260 \mu\text{m}^2$ auf. Der Verlauf

der beiden mechanischen Kennwerte ($K(\rho_{rel})$) kann mittels exponentieller Funktion angenähert werden, die wie folgt parametrisiert ist:

$$K(\rho_{rel}) = a * b^{\rho_{rel}} + c \quad (5-1)$$

Für die maximale Zugfestigkeit ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 99,96\%$, für die Bruchdehnung von $R^2 = 99,07\%$. Da die Kennwerte, ebenso wie Defektanzahl und -größe, mittels exponentieller Funktion beschrieben werden können, vgl. Abbildung 5-2, kann ein Zusammenhang mit diesen Eigenschaften abgeleitet werden. Jedoch muss bedacht werden, dass voraussichtlich nicht alle vorliegenden Phänomene berücksichtigt werden, die zu dem Versagen der Proben bei geringeren Dehnungen oder Spannungen führen können. So ist für eine ganzheitliche Betrachtung der Fragestellung auch der Anteil des Martensits bzw. Austenits im Gefüge relevant. Hsu et al. [167] konnten beispielsweise nachweisen, dass der Martensitanteil im Material 1.4542 stark von den gewählten Prozessparametern abhängt. Je geringer die gewählte Volumenenergie-dichte zur Belichtung des Materials gewählt wird, desto stärker prägt sich der Anteil von Austenit aus, der Martensitanteil sinkt.

Eine weitere Auffälligkeit in Abbildung 5-5 ist die ausgeprägte Standardabweichung der maximalen Bruchdehnung bei Proben mit einer Dichte zwischen 99,82 % und 98,80 % sowie bei der maximalen Zugfestigkeit zwischen 99,82 % und 97,55 %.

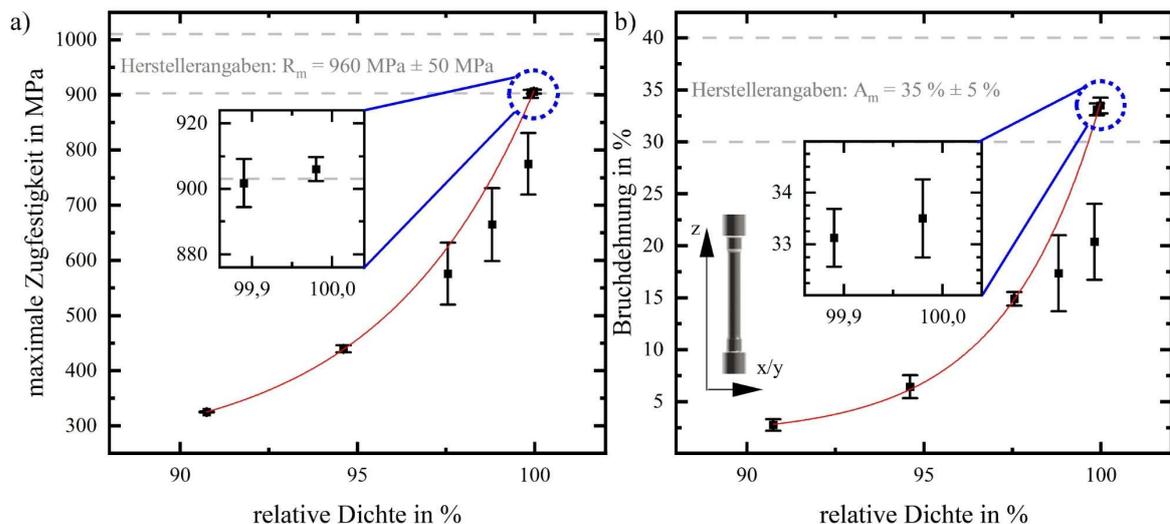


Abbildung 5-5: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an vertikal ausgerichteten Zugstäben, welche mit variierten Laserleistungen gefertigt wurden, bei sonst konstanten Prozessparametern, die den Referenzparametern entsprechen. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über der relativen Dichte; b) Bruchdehnung über der Dichte aufgetragen.

Die Ursache für die hohe Streuung kann zunächst nicht umfänglich nachgewiesen werden. Vermutet wird, dass besonders die Position der Defekte, welche im Material stochastisch verteilt sind, einen hohen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und somit die festgestellte Varianz hat. Es wird davon ausgegangen, dass Defekte, die nahe der Oberfläche oder sogar auf dieser hervorgerufen werden, einen stärkeren Einfluss besitzen. Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Position von Defekten wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit deshalb näher untersucht. Grundsätzlich kann

festgehalten werden, dass die in den Zugversuchen ermittelten Daten den direkten Zusammenhang zwischen der relativen Dichte der Probekörper und deren mechanischen Eigenschaften verdeutlichen.

Aufgezeigt werden kann, dass selbst geringe Abweichungen in der Dichte einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben können. Werden diese Ergebnisse mit Daten verglichen, die zusammen mit Kleszczynski et al. [87] veröffentlicht wurden, wird deutlich, dass nicht nur die relative Dichte des Materials als Einflussgröße auf die mechanischen Eigenschaften wirkt. In den veröffentlichten Versuchen wurde der Einfluss quaderförmiger Defekte untersucht, die mithilfe Boole'scher Operationen in Zugstabrohlinge eingebracht wurden. Als Material diente EOS GP1, gefertigt auf einer EOS M270. Die Positionierung der Defekte erfolgte jeweils mittig in den Probekörpern, welche mit Standardprozessparametern, vertikal ausgerichtet, gefertigt wurden. Die Kantenlänge der durch Boole'sche Operationen provozierten Defekte in Form von Hohlräumen wurde von 0,1 mm bis zu 1,5 mm variiert. Obwohl die Fläche der Defekte dabei bis zu 11,5 % der Querschnittsfläche des Zugstabes eingenommen hat und somit eine relative Dichte von 88,5 % resultiert, konnte lediglich ein relativ geringer Einfluss auf die maximale Zugfestigkeit nachgewiesen werden. Die maximale Zugfestigkeit betrug bei Probekörpern mit den größten Defekten $934 \pm 5 \text{ MPa}$ und liegt somit noch in dem vom Hersteller angegebenen Bereich von $930 \pm 50 \text{ MPa}$. Die Bruchdehnung wurde in diesen Versuchen nicht betrachtet und kann somit nicht verglichen werden, von einer Beeinflussung dieser ist jedoch auszugehen. Durch Simulationen konnte in der Veröffentlichung nachgewiesen werden, dass durch Defekte in der Mitte der Probe-

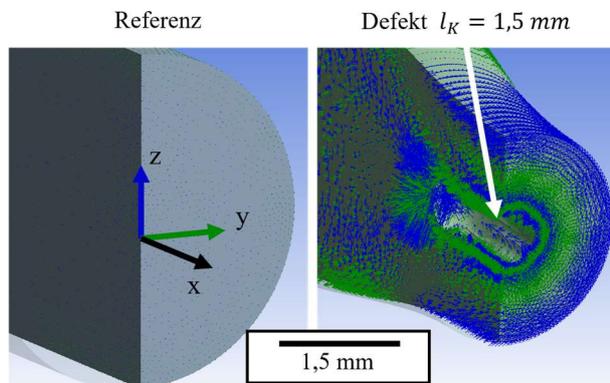


Abbildung 5-6: Simulation von Spannungszuständen in y/z-Richtung an Probekörpern ohne Defekt (Referenz) und mit einem Defekt mit einer Kantenlänge von 1,5 mm in y/z-Ebene bei gleich starker Belastung in x-Richtung.

körper komplexe, multiaxiale Spannungszustände resultieren, welche die Einschnürung sowie Gleichmaßdehnung und somit Verfestigungsmechanismen beeinflussen. In Abbildung 5-6 ist ein Vergleich von Spannungszuständen in y/z-Richtung für defektfreie und defektbehaftete Zugproben dargestellt. Die Größe der Vektoren korreliert mit dem Wert der Spannungen. Ersichtlich wird die stärkere Ausprägung dieser Spannungen an defektbehafteten Bauteilen in y/z-Richtung. Für weitere

Details wird auf die Veröffentlichung verwiesen.

Einfluss definierter Bereiche mit stochastisch verteilten Defekten

In Anlehnung an die im Voraus vorgestellten Versuche mit Kleszczynski et al. [87] werden Probekörper aufgebaut, deren Querschnitt nicht vollständig mit variierten Prozessparametern belichtet wird. Hiermit soll der Einfluss von Defekten ausgeschlossen werden, die direkt an der Oberfläche der Probekörper liegen und somit besonders hohe Kerbwirkungen hervorrufen. Weiterhin kann untersucht werden, wie sich die Anzahl der Defekte respektive das Verhältnis zwischen Referenzmaterial zu defektbehaftetem

Material auf die statischen mechanischen Eigenschaften auswirkt. In diesen Versuchen wird der defektbehaftete Bereich provoziert, indem Material in den CAD-Modellen der Zugstabhohlung durch Boole'sche Operation mit einem Zylinder entfernt wird. Der Durchmesser des Zylinders wird dabei variiert, um unterschiedliche Flächenanteile abbilden zu können, die Höhe des Zylinders ist mit 4 mm konstant. Bei der Boole'schen Operation sind beide Zylinder zueinander coaxial ausgerichtet, wenn nicht anders beschrieben, der defektbehaftete Bereich befindet sich somit genau in der Mitte des Zugstabes. In die Hohlräume werden anschließend Zylinder mit gleichen Abmaßen eingesetzt. Dies ermöglicht, dass eine Belichtung der beiden Komponenten mit unterschiedlichen Prozessparametern vorgenommen werden kann. Die Auswahl des zylindrischen Volumens wurde zugunsten einer möglichst symmetrischen Spannungsverteilung in der Zugprobe vorgenommen. In Abbildung 5-7 ist die beschriebene Positionierung der Volumina im x/y-Querschnitt für vertikal ausgerichtete Proben schematisch dargestellt.

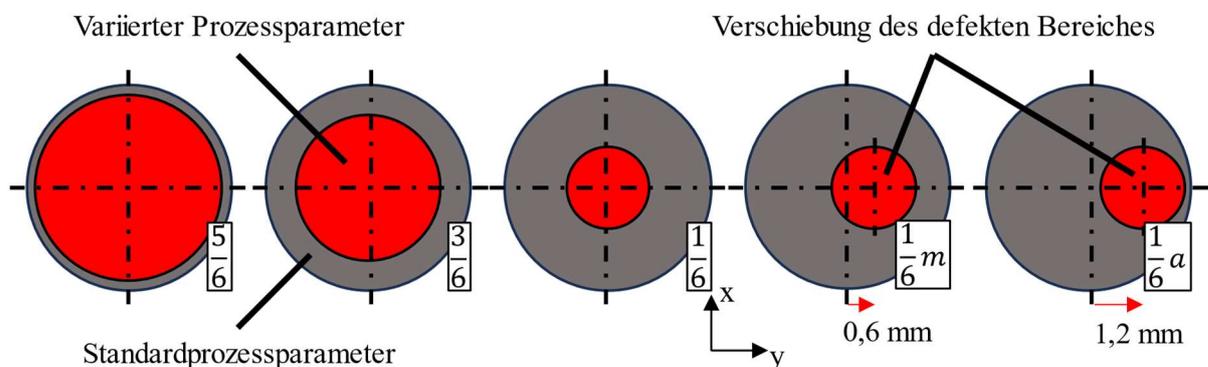


Abbildung 5-7: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Zugprobenvarianten, um Größe und Position des Bereiches zu veranschaulichen, welcher mit variierten Prozessparametern belichtet wird.

Die Größe des Bereiches, der mit variierten Prozessparametern belichtet wird, wird innerhalb der Versuchsreihe in fünf Stufen von jeweils $\frac{1}{6}$ von $A_{Defekt} = \frac{1}{6}$ bis $A_{Defekt} = \frac{5}{6}$ variiert. Zusätzlich wird bei dem kleinsten Verhältnis der Querschnittsflächen von $A_{Defekt} = \frac{1}{6}$ eine Verschiebung des Zylinders entlang der y-Achse vorgenommen. Hiermit soll der Einfluss der Position von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Insgesamt werden zwei Verschiebungen untersucht. Bei Proben, die den Zusatz ‚a‘ besitzen, wurde dieser Bereich um 1,2 mm zur Außenkontur verschoben. Der Defekt der letzten Variante liegt in der Mitte zwischen den beiden zuvor beschriebenen und wird mit dem Zusatz ‚m‘ bezeichnet, die Verschiebung beträgt 0,6 mm. Für die Probe ‚a‘ beträgt die Restwanddicke (gefertigt mit Referenzparametern) an der dünnsten Stelle somit 0,29 mm, bzw. 0,89 mm für Probe ‚m‘. Alle Proben wurden jeweils in dreifacher Ausführung in vertikaler sowie horizontaler Ausrichtung gefertigt. Für diese Versuchsreihe wurden in einem Bauprozess auf der Versuchsanlage EOS M270 insgesamt 48 Probekörper (24 vertikal und 24 horizontal ausgerichtet) aus dem Material EOS GP1 gefertigt. Der Parametersatz, der für das in Grau dargestellte Material ausgewählt wurde, ist der Standardprozessparametersatz mit einer Laserleistung von $P_L = 195\text{ W}$, siehe Parametersatz Nr. 7 in Tabelle 5-1. In selbiger Tabelle ist auch der Parametersatz (Nr. 1 - $P_L = 75\text{ W}$) dargestellt, der für die

Belichtung des defektbehafteten Volumens (rot) genutzt wurde. Dieser weist in den vorangegangenen Versuchen die niedrigste relative Dichte und geringsten absoluten Werte der mechanischen Eigenschaften auf. Die Anzahl und Größe der Defekte sind innerhalb der durchgeführten Versuche maximal. Mit der Auswahl möglichst unterschiedlicher Prozessparameter wird erhofft, dass der Einfluss möglichst deutlich ausfällt und somit klare Deutungen ermöglicht werden.

Vertikal gefertigte Probekörper

In Abbildung 5-8 sind Spannungs-Dehnungs-Kurven von Referenzproben ‚Ref‘, gefertigt in vertikaler Ausrichtung, mit einer Dichte von 99,98 %, aufgetragen. Rot dargestellt ist ein Verlauf für die Referenzproben, welcher in den vorausgegangenen Versuchen ermittelt wurde, vgl. Abbildung 5-3. Der schwarz gezeichnete Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist an einer Referenzprobe aus der aktuellen Versuchsreihe ermittelt worden. Als horizontale, grau gestrichelte Linie ist der vom Hersteller angegebene Wertebereich der maximalen Zugfestigkeit angegeben. Bei einer ersten Betrachtung der Ergebnisse wird eine deutliche Abweichung des globalen Verlaufes der Spannungs-Dehnungs-Kurven zwischen den Re-

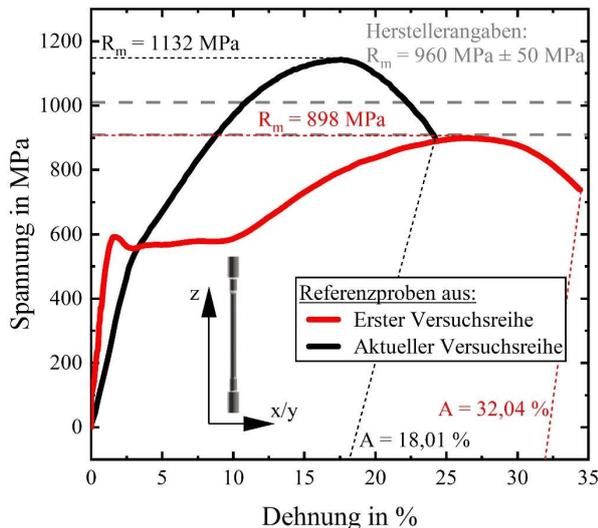


Abbildung 5-8: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven vertikal gefertigter Probekörper der Variation 'Referenz'.

ferenzproben aus den beiden Bauprozessen deutlich. Der Bereich der Lüdersdehnung ist in der vertikal gefertigten Referenzprobe aus der aktuellen Studie nicht ausgeprägt. Die ermittelten maximalen Zugfestigkeiten übersteigen mit einem Wert von 1 133,1 MPa ± 9,4 MPa die obere Grenze der Herstellerangabe von 960 MPa ± 50 MPa um ca. 123 MPa bzw. 12,18 %. Die Bruchdehnung weicht mit 18,09 % ± 1,42 % noch deutlicher von den Herstellerangaben (35 % ± 5 %) ab und ist um 39,7 % geringer als der kleinste Wert des angegebenen Bereiches. Selbst die als minimal angegebene Bruchdehnung von 25 % wird unterschritten. Wie ebenfalls ersichtlich, weichen diese Kennwerte von denen ab, die bei den Referenzproben in den vorangegangenen Versuchen (vgl. Abbildung 5-5) ermittelt wurden, obwohl dieselbe Fertigungsanlage (EOS M270) mit gleichem Material (EOS GP1) und selben Fertigungsparametern genutzt wurde.

Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen, die an Probekörpern mit stochastisch verteilten Defekten ermittelt wurden, ist somit nicht sinnvoll und wird nicht vorgenommen. Auch wenn die Ergebnisse der Zugversuche innerhalb der Versuchsreihe verglichen werden können, sind solche Abweichungen der mechanischen Eigenschaften ungewöhnlich und als kritisch anzusehen, sollten Bauteile für die Anwendung gefertigt werden. Aus diesem Grund ist eine Ermittlung möglicher Ursachen für die Varianz in den Kennwerten notwendig. Sie kann jedoch aufgrund fehlender Sensorik in der verwendeten PBF-LB/M-Anlage sowie der nicht vorhandenen Sicherung von Messdaten (bspw. Sauerstoffgehalt) während

bzw. nach Prozessende nur anhand von Erkenntnissen in der Literatur erfolgen. Aufgezeigt werden in der Literatur unterschiedliche Ursachen, wie ungleichmäßige Materialbeschichtungen, ein zu hoher Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer (vgl. Dietrich et al. [168]) und oxidiertes oder in der Fraktion verändertes Pulvermaterial. Kuznetsov et al. [169] konnten am Material AISI 321, einem austenitischen Stahl, nachweisen, dass die Pulverpartikelgrößenverteilung des Grundmaterials einen deutlichen Einfluss auf die Größe der sich ausprägenden Körner nimmt. Versuche mit den größten Pulverpartikeln ($20\ \mu\text{m} - 40\ \mu\text{m}$) zeigten, dass diese durchschnittlich kleinere Korngrößen ($D_{mean} = 29,4\ \mu\text{m}$) hervorrufen, die Spanne zwischen kleinstem und größtem gemessenem Korn jedoch in diesen Versuchen maximal ($\Delta D = 149,8\ \mu\text{m}$) ist. Die Härte des resultierenden Materials steigt mit zunehmender Größe der Partikel bzw. kleineren Körnern, die sich im Gefüge ausprägen. Gleichgesetzt werden kann dieses Ergebnis mit einer Versprödung des Materials, wobei eine Reduzierung der Bruchdehnung, aber eine Erhöhung der maximalen Zugfestigkeit hervorgeht. Die Partikelgrößenverteilung, welche sich durch Mehrfachnutzungen des Materials ändern kann, kann somit auch einen Einfluss auf die Eigenschaften der gefertigten Proben aus GP1 besitzen. Den Einfluss von Mehrfachnutzungen des Grundmaterials untersuchten Song et al. [170] am Material Tantal. Dabei wurde der Einfluss auf den Sauerstoffgehalt, die D_{90} -Partikelgröße, Bruchdehnung und maximale Zugfestigkeit von Probekörpern ausgewertet. Deutlich wird, dass nach Mehrfachnutzung (bis zu 16 Prozesse) eine Zunahme des Sauerstoffgehaltes (von 310 ppm zu 450 ppm) bei gleichzeitiger Zunahme der Partikeldurchmesser von $D_{90} = 30,1\ \mu\text{m}$ auf $D_{90} = 33,8\ \mu\text{m}$ detektiert werden konnte. Dabei wurde eine Zunahme der maximalen Zugfestigkeit (von $R_m = 504\ \text{MPa}$ auf $R_m = 614\ \text{MPa}$) beobachtet, wobei die Bruchdehnung deutlich sank (von $A = 37,9\ \%$ zu $A = 11,6\ \%$). Auch wenn in dieser Arbeit ein variiertes Material untersucht wurde, so können die Veränderung der Partikelgrößenverteilung und der Anstieg des Sauerstoffgehaltes auf die eigene Versuchsreihe übertragen werden. Auch eine veränderte Ausprägung der Korngrößen und der Austenit- und Martensitanteile ist aufgrund variiertes Prozessbedingungen wie der Sauerstoffkonzentration nicht auszuschließen.

Shaffer et al. [171] untersuchten mechanische Eigenschaften von Proben aus dem Material 17-4PH bzw. GP1, dem in diesen vorliegenden Versuchen verwendeten Material, vgl. Tabelle 4-1. Zugproben wurden aus zwei Materialchargen gefertigt. Die erste wurde durch Zerstäubung mit Argon, die zweite durch Zerstäubung mit Stickstoff hergestellt. Die Analyse der Chargen zeigt, dass der Anteil von Austenit im mit Argon zerstäubten Material signifikant geringer ist (3 %) als im Material, welches mit Stickstoff zerstäubt wurde (97 %). In gefertigten Proben aus stickstoffatomisiertem Pulver kann noch bis zu 81 % Austenitgehalt gemessen werden, bei Material zerstäubt mit Argon prägt sich hingegen kaum Austenit aus ($< 1\ \%$). Bei Zugproben mit einem hohem Austenitgehalt ähnelt der Verlauf der Spannung über der Dehnung dem der in dieser Arbeit zuerst vorgestellten Versuchsreihe (Abbildung 5-8, rote Kurve). Dabei ist der Bereich der Lüdersdehnung deutlich ausgeprägt. Dies ist laut den Autoren auf die zusätzliche Härtung durch die Umwandlung von verbleibendem Austenit zu Martensit unter Belastung zurückzuführen. Proben mit hohem Martensitanteil ähneln den Ergebnissen der zuletzt beschriebenen Versuche,

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

vgl. Abbildung 5-8. Der Bereich der Lüdersdehnung entfällt. Obwohl die Verdüsung nicht in direktem Zusammenhang mit den durchgeführten Versuchen steht, kann eine Anpassung der Methodik während dieses Prozesses beim Materialhersteller nicht ausgeschlossen werden. Mahmoudi et al. [105] untersuchten weiterführend den Einfluss der Zeit zwischen Schichten nach Yadollahi et al. [172] am Material GP1 auf einem ProX 100 SLM System der Firma 3D Systems. Die Zeit zwischen Schichten ist diejenige, die zwischen dem jeweiligen Beginn der Belichtung zweier aufeinander folgender Schichten verstreicht. Bei einer Verringerung von 50 s (Standardwert) auf 10 s, durch eine Reduktion der gefertigten Probekörper, konnte eine Steigerung des Anteils des Austenits von 13,0 % auf 26,3 % festgestellt werden, was einer Erhöhung um 102,3 % entspricht. Ebenso konnten Veränderungen der mechanischen Eigenschaften konstatiert werden. Zurückgeführt werden kann dies auf die veränderte Temperaturhistorie innerhalb der Bauteile. Abgeleitet werden kann davon, dass erhöhte Zeitdifferenzen eventuell zu einer erhöhten Ausprägung des Martensitanteils führen. Änderungen dieser Zeiten können durch Variationen der Probenanzahl oder -größe, der Beschichtungsgeschwindigkeit oder durch variierte Scangeschwindigkeiten hervorgerufen werden.

Festgehalten werden kann, dass eine große Anzahl an Faktoren einen Einfluss auf die Ausprägung des Gefüges besitzt, welches wiederum die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Besonders für die Anwendung von Proben aus 17-4PH oder 1.4542 bzw. GP1, dessen mechanische Eigenschaften deutlich von der Ausprägung der Gefüge abhängig sind, zeigt sich deutlich der Bedarf an Methoden zur Qualitätssicherung, auch im Pre-Prozess, um die Sicherheit von Bauteilen im Einsatz garantieren zu können.

Eine konkrete Rückführung der Veränderung der mechanischen Eigenschaften ist im Nachhinein nicht mehr möglich. Wie bereits beschrieben können die mechanischen Eigenschaften innerhalb der Versuchsreihe bewertet werden, da alle Probekörper aus demselben Fertigungsprozess stammen und somit unter gleichen Randbedingungen gefertigt wurden.

Auch in dieser Versuchsreihe werden die Kennwerte maximale Zugfestigkeit R_m sowie Bruchdehnung A ausgewertet und verglichen. Aufgetragen werden diese Werte in den folgenden Diagrammen über der theoretischen relativen Dichte des Querschnittes ρ_{theo} . Die theoretische relative Dichte wird dafür mit folgender Formel bestimmt:

$$\rho_{theo} = \frac{A_{def} \cdot \rho_{def} + A_{ref} \cdot \rho_{ref}}{A_{def} + A_{ref}} * 100 \%, \quad (5-2)$$

wobei A_{def} in mm^2 der Fläche des defektbehafteten Bereiches, A_{ref} in mm^2 dem Referenzmaterial im Querschnitt entspricht. Die Parameter ρ_{def} und ρ_{ref} entsprechen den relativen Dichten, die in Unterabschnitt 5.1.1 für die jeweiligen Parametersätze ermittelt wurden. Die ermittelte theoretische relative Dichte gilt dabei lediglich für den Bereich des Zugstabes, in dem das defektbehaftete Volumen eingebracht ist.

In Abbildung 5-9 a) und b) sind die Ergebnisse der maximalen Zugfestigkeit sowie der Bruchdehnung für vertikal aufgebaute Probekörper mit variierenden Anteilen (1/6 bis 5/6) des defektbehafteten Bereiches sowie von Referenzproben ‚Ref‘ dargestellt. Farbige Kreise innerhalb der Abbildung stellen

schematisch die Querschnitte in der Mitte der jeweiligen Zugproben dar und verdeutlichen die Position sowie Größe der defektbehafteten Bereiche.

In Abbildung 5-9 a) wird ersichtlich, dass die maximale Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der theoretischen relativen Dichte sinkt. An Referenzproben werden maximale Zugfestigkeiten von $1\,133,1\text{ MPa} \pm 9,4\text{ MPa}$ ermittelt. Mit steigendem Anteil der defektbehafteten Fläche sinkt die maximale Zugfestigkeit auf bis zu $114,9\text{ MPa} \pm 9\text{ MPa} - A_{def} = 5/6, \rho_{theo} = 92,26\%$. Anders als in den vorangegangenen Versuchen wird deutlich, dass die Abnahme der maximalen Zugfestigkeiten nahezu linear stattfindet, anstelle des bisher beobachteten exponentiellen Verlaufes, vgl. Abbildung 5-5 bzw. Formel 5-1. Durch den linearen Fit (rote Linie) der $R_m(\rho_{theo})$ -Werte wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,998$ erreicht.

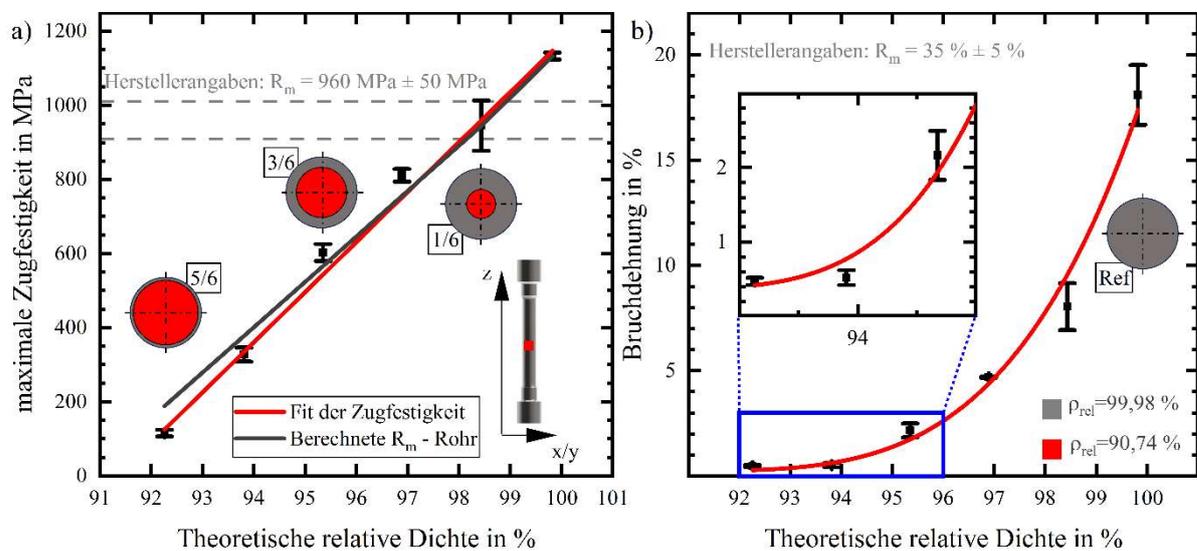


Abbildung 5-9: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an vertikal aufgebauten Zugstäben mit defektbehafteten Volumina, die in Größe und Position variiert wurden. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über der theoretischen Dichte im Querschnitt; b) Bruchdehnung aufgetragen über der theoretischen Dichte im Querschnitt.

Die Steigung der linearen Funktion beträgt $s_{R_m} = 135,2\text{ MPa}/\%$ und besagt, dass die Zugfestigkeit um diesen Wert abnimmt, sobald die theoretische relative Dichte um ein Prozent sinkt. Zusätzlich zur Fit-Funktion ist eine weitere lineare Funktion in Dunkelgrau dargestellt. Diese wurde auf Basis der Formel zur Berechnung der Zugfestigkeit von Rohren hergeleitet, welche in (5-5) dargestellt ist. Bei der Berechnung der maximalen Zugfestigkeit wird dabei angenommen, dass das defektbehaftete Material keinen Einfluss auf diese besitzt.

$$R_{m-Rohr}(A_{ref}) = R_{m-ref} * \frac{A_{ref}}{A_{ges}} \quad (5-3)$$

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Funktion beträgt dabei $R^2 = 0,995$. Gezeigt werden kann damit, dass die maximalen Zugfestigkeiten der gesamten Zugprobe lediglich von dem verbleibenden Querschnitt bzw. der Belastbarkeit des Referenzmaterials bestimmt wird. Zu beachten ist jedoch, dass im Bereich kleiner Dichten die Abweichung der prognostizierten von den realen Kennwerten steigt. So liegt

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

die reale Zugfestigkeit bei einem Defektanteil von 5/6 bei $R_m = 112 \text{ MPa}$, wobei durch die Formel ein Wert von $R_m = 188 \text{ MPa}$ bestimmt wurde. Diese Abweichung kann auf die geringe verbleibende Wandstärke des tragenden Querschnittes zurückzuführen sein, in Kombination mit einer hohen Anzahl von LoF-Defekten am Übergang zwischen dem Referenzmaterial und dem defektbehafteten Volumen. Das Volumen-zu-Oberflächen-Verhältnis wird somit geringer und der Einfluss von Kerben (randnahe Defekte) steigt, an denen sich unter Belastung Spannungsspitzen bilden, die das homogene Spannungsfeld stören. Weiterhin kann mit diesem Ergebnis die Vermutung bestätigt werden, dass die Position der Defekte in Relation zur Oberfläche relevant für die resultierenden maximalen Zugfestigkeiten ist.

Die Bruchdehnung A für vertikal gefertigte Proben wird ebenfalls über der theoretischen Dichte ρ_{theo} aufgetragen, dargestellt in Abbildung 5-9 b). Von einer Bruchdehnung von $18,09 \% \pm 1,42 \%$, die bei den Referenzproben ermittelt wurde, sinkt diese bis auf $0,47 \% \pm 0,049 \%$ bei Probekörpern mit einem Anteil der defektbehafteten Bereiche von 5/6 und beträgt somit lediglich 2,6 % vom Ausgangswert. Ersichtlich wird weiterhin, dass die Bruchdehnung bereits bei kleinen Anteilen der defektbehafteten Bereiche deutlich reduziert wird und somit sensibler auf Defekte ist als die maximale Zugfestigkeit. Bei einem Anteil von 1/6 sinkt die Bruchdehnung bereits um $\Delta A_v = 10,05 \%$ (relativ um 55,6 %) auf $A_{1/6,v} = 8,04 \% \pm 1,1 \%$. Angenähert werden kann der Verlauf der Bruchdehnung wie in der vorangegangenen Versuchsreihe durch eine exponentielle Funktion, vgl. Formel (5-1). Das Bestimmtheitsmaß der Fit-Funktion ergibt sich zu $R^2 = 0,997$.

Horizontal gefertigte Probekörper

Ähnlich wie beim Einfluss der Defekte auf vertikal gefertigte Probekörper lässt sich der Einfluss der Defekte auf die mechanischen Eigenschaften der horizontal gefertigten Komponenten bewerten. Wie in Abbildung 5-10 a) ersichtlich, nimmt die Zugfestigkeit, aufgetragen über der theoretischen Dichte, berechnet nach Formel (5-2), mit steigendem Anteil des defektbehafteten Querschnittes ab. Die höchste maximale Zugfestigkeit ($R_{m-Ref} = 1091,7 \text{ MPa}$) kann bei Proben ohne gezielt eingebrachten Defekt, bezeichnet mit ‚Ref‘, mit höchster Dichte von $\rho_{theo} = 99,98 \%$, ermittelt werden. Bei dem größten Anteil der defektbehafteten Fläche ($A_{def} = 5/6$) im Querschnitt beträgt die maximale Zugfestigkeit lediglich $R_{m-5/6-h} = 337,2 \text{ MPa}$ und liegt somit bei 30,88 % der Belastbarkeit der Referenzprobe. Der Verlauf der Zugfestigkeit kann auch hier mit einer linearen Funktion (rote Linie) dargestellt werden, die Steigung beträgt $s_{R_m} = 102 \text{ MPa}/\%$. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion beträgt $R^2 = 0,992$. Ebenso wie für vertikal aufgebaute Proben wird die theoretische Belastbarkeit der Proben in Anlehnung an die Berechnung für Rohre nach Formel (5-3) bestimmt. Dargestellt sind die berechneten maximalen Zugfestigkeiten in der Abbildung als graue Linie. Ersichtlich wird, dass die Abweichung zwischen den realen Zugfestigkeitskennwerten und den berechneten deutlich höher ausfällt als bei vertikalen Proben. Die realen R_m liegen deutlich oberhalb der berechneten, wobei die Differenz mit sinkender Dichte sogar steigt. So ergibt sich für einen Anteil von 5/6 eine Abweichung von $\Delta R_m = 155,27 \text{ MPa}$ oder 53,9 %.

Die Ergebnisse der Zugversuche von horizontal gefertigten Zugproben für die Bruchdehnung A in Abhängigkeit von ρ_{theo} sind in Abbildung 5-10 aufgetragen. Auch für diese Daten wurde nach Formel (5-1) eine Fit-Funktion hergeleitet, deren Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,999$ beträgt. Die Bruchdehnung beträgt bei Proben ohne gezielt eingebrachte Defekte $23,07\% \pm 1,44\%$. Bei der Probe, die den größten Anteil des defektbehafteten Querschnittes von $5/6$ aufweist, sinkt die Bruchdehnung relativ um $98,4\%$ auf einen Restwert von $0,37\% \pm 0,12\%$. Auch an diesen Ergebnissen wird deutlich, dass der Einfluss von Defekten auf die Bruchdehnung höher ist als auf die maximalen Zugfestigkeiten der Probekörper. Bereits bei dem kleinsten Anteil des defektbehafteten Bereiches von $1/6$ ist die Bruchdehnung um $49,72\%$ auf $A_{1/6,h} = 11,6\% \pm 1,1\%$ reduziert.

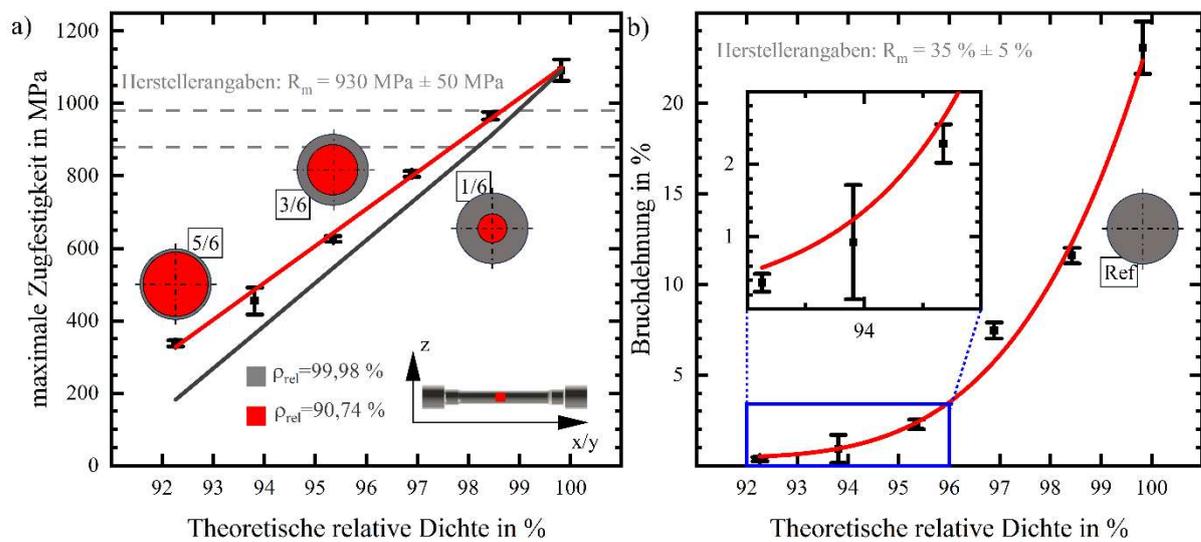


Abbildung 5-10: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an horizontal aufgebauten Zugstäben mit defektbehafteten Volumina, die in Größe und Position variiert wurden. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über Anteil und Position der Volumina; b) Bruchdehnung aufgetragen über Anteil und Position der Volumina.

Vergleich des Einflusses von Defekten auf horizontale und vertikale Proben

Zum Vergleich des Einflusses der Defekte auf horizontale und vertikale Proben werden die Faktoren der Fit-Funktionen genutzt, die zum Beschreiben des Verlaufes der jeweiligen Kennwerte angewandt wurden. Für die maximalen Zugfestigkeiten wird die Steigung s_{R_m} betrachtet, für die Bruchdehnung der Faktor a aus Gleichung (5-1). Zur Herleitung der Fit-Funktionen nach Formel (5-1) wurden die Parameter b und c innerhalb der Versuchsreihe konstant gehalten.

Tabelle 5-2: Auswahl an Faktoren, die für die mathematische Beschreibung der maximalen Zugfestigkeit und Bruchdehnung genutzt wurden.

	Steigung s_{R_m} in MPa/%	$\frac{s_{R_m}}{R_m} * 100$ in %	Faktor a Formel (5-1)	ΔA in %	$a/\Delta A$
Vertikal	135,2	12,3	$5,92 \times 10^{-18}$	17,62	$3,35 \times 10^{-19}$
Horizontal	102	8,8	$5,99 \times 10^{-18}$	22,7	$2,63 \times 10^{-19}$

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

Gegenübergestellt sind die Werte in Tabelle 5-2. Ein Vergleich der Steigungen s_{R_m} für die vertikal sowie horizontal gefertigten Probekörper zeigt deutlich, dass die Belastbarkeit von Proben in Aufbaurichtung $s_{R_m-v} = 135,2 \text{ MPa}/\%$ deutlich stärker von Defekten beeinflusst wird als quer dazu $s_{R_m-h} = 101 \text{ MPa}/\%$.

Auch wenn die Steigungen in Relation zu den maximalen Zugfestigkeiten R_m der Referenzproben gesetzt werden, zeigt die prozentuale Steigung deutlich, dass Defekte einen stärkeren Einfluss auf die Belastbarkeit in vertikaler Richtung (12,3 %) besitzen als in horizontaler (8,8 %). Eine Ursache für den variierenden Einfluss in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung kann der Rissfortschritt während der Beanspruchung der Proben sein. In Abbildung 5-11 sind Schmelzbadgrenzen und Belastungen in a) Aufbaurichtung sowie b) orthogonal zu dieser sowie Kornausrichtungen in c) skizziert.

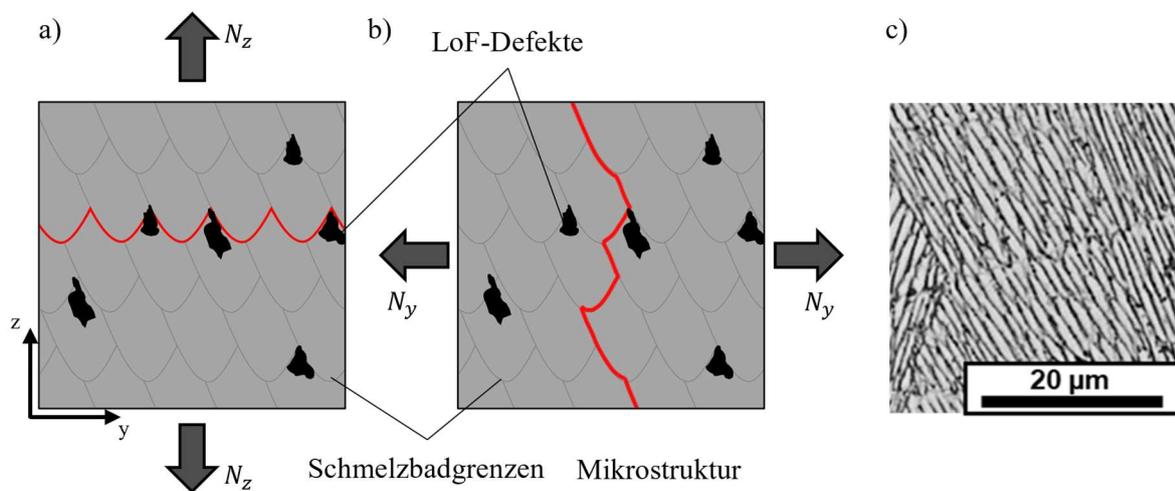


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung eines Materialbereiches in Zugproben mit den resultierenden Schmelzbadgrenzen. In a) wird das Material parallel zur Aufbaurichtung belastet, in b) orthogonal zur Aufbaurichtung; ein möglicher Rissfortschritt, skizziert als rote Linie, an den Schmelzbadgrenzen variiert, in Anlehnung an [173]. c) Orientierung der Körner im Gefüge.

Die schwarzen Bereiche stellen schematisch Defekte der Klasse LoF dar, welche in den durchgeführten Versuchen hervorgerufen wurden. Die Ausprägung dieser Defekte findet häufig zwischen zwei nebeneinander liegenden Scanvektoren statt, da ein unvollständiges Aufschmelzen des Pulvermaterials erfolgt, sodass keine Überlappung der Schmelzbäder stattfindet. Bei einem Rissfortschritt entlang der Schmelzbadgrenzen, wie in a) dargestellt, kann eine Vereinigung der Defekte stattfinden, wodurch das Versagen begünstigt wird. In b) ist eine um 90° gedrehte Belastung dargestellt, hierbei ist eine Ausprägung der Risse entlang der Schmelzbadgrenzen eher eingeschränkt möglich. Dieses Phänomen konnten auch Aripin et al. [173] am Material 17-4PH (GP 1) oder Ronneberg et al. [174] am Material 316L nachweisen. Ableiten lässt sich von den Schmelzbadausrichtungen ebenfalls die Ausprägung der Mikrostruktur, die Ausprägung der Körner ist in Abbildung 5-11 c) exemplarisch dargestellt. Ersichtlich wird die bevorzugte Ausrichtung der Körner in z-Richtung. Ein Rissfortschritt quer zur Aufbaurichtung (x- bzw. y-Richtung) erfordert deutlich mehr Spannung als parallel dazu.

Zur Bestimmung des Einflusses auf die Bruchdehnung wird der Faktor a aus Formel (5-1) genutzt, der die Streckung bzw. Stauchung der Funktion beeinflusst, und durch die Differenz zwischen maximaler

(Referenz) und minimaler Bruchdehnung (Defektanteil 5/6) ΔA innerhalb der Versuchsreihen geteilt. Hiermit kann sichergestellt werden, dass die Gesamtänderung der Bruchdehnung mit in die Bewertung einfließt. Dabei ist auch für die Bruchdehnung ersichtlich, dass Defekte einen größeren Einfluss auf die vertikal gefertigten Proben ($3,35 \times 10^{-19}$) besitzen als auf horizontal ($2,64 \times 10^{-19}$) gefertigte.

Festgehalten werden kann, dass die Auswirkung von Defekten auf die maximale Zugfestigkeit geringer ist als auf die Bruchdehnung. Ebenso wirken sich Defekte deutlich negativer auf die Belastbarkeit von Proben in vertikaler Richtung aus als in horizontaler Richtung. In den folgenden Untersuchungen wird weiterführend der Einfluss der Position von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften untersucht.

Untersuchung des Einflusses von Positionen auf mechanische Eigenschaften

In Abbildung 5-12 sind die Ergebnisse von Zugversuchen dargestellt, welche an vertikal sowie horizontal gefertigten Probekörpern mit einem Anteil der defektbehafteten Fläche von 1/6 ermittelt wurden. Für die Versuche wurde die Position der defektbehafteten Bereiche in Relation zur Mittelachse des Zugstabes in drei Stufen variiert, vgl. Abbildung 5-7. Die Abszissenachse gibt die Verschiebung der Defekte von der Mittelachse der Zugproben in Millimetern an, während auf der Ordinatenachse die jeweiligen mechanischen Kennwerte dargestellt sind.

In a) ist die maximale Zugfestigkeit aufgetragen. Die Ergebnisse sind in vertikal und horizontal gefertigte Proben unterteilt. Vertikal gefertigte Proben mit einem Defektanteil von 1/6 zeigen eine maximale Zugfestigkeit von $945,69 \text{ MPa} \pm 68,2 \text{ MPa}$, während Proben mit der maximalen Defektverschiebung von 1,2 mm eine reduzierte maximale Zugfestigkeit von etwa $785,2 \text{ MPa} \pm 43,62 \text{ MPa}$ aufweisen. In Abhängigkeit von der Position sinkt die maximale Zugfestigkeit somit um bis zu 16,97 %. Der Verlauf der maximalen Zugfestigkeit kann für vertikal gefertigte Proben mit einer linearen Funktion mit einer Steigung von $s = -79,5 \text{ MPa/mm}$ angenähert werden. Zusätzlich kann beobachtet werden, dass die Prüfkörper, bei denen der defektbehaftete Bereich um 1,2 mm von der Mittelachse verschoben ist ($R_{m-1/6a-v} = 785,2 \text{ MPa}$), im Vergleich zu Probekörpern mit einem defektbehafteten Anteil von 2/6 ($R_{m-2/6-v} = 811,2 \text{ MPa}$) deutlich geringere maximale Zugfestigkeiten (3,21 %) aufweisen. Beide Beobachtungen zeigen auf, dass die Positionen von Defekten bei vertikal gefertigten Probekörpern einen höheren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen als der Anteil der defektbehafteten Fläche. Zurückzuführen ist dies auf unsymmetrische Ausprägungen der Spannungsverläufe innerhalb der Zugstäbe.

Ebenso kann von den Ergebnissen der horizontal gefertigten Probekörper hergeleitet werden, dass die Position der Defekte auch einen deutlichen Einfluss auf die maximale Zugfestigkeit besitzt, die bei einem Anteil von 1/6 $R_{m-1/6-h} = 969,2 \text{ MPa}$ beträgt. Je weiter der Bereich mit Defekten von der Mittelachse verschoben wird, desto geringer ist die maximale Zugfestigkeit ($R_{m-1/6a-h} = 884,3 \text{ MPa}$), was einer Reduktion um 8,76 % entspricht. Die Steigung der linearen Funktion beträgt $s = -42,42 \text{ MPa/mm}$.

5.1 Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten aus 1.4542

In Abbildung 5-12 b) sind die Bruchdehnungen in Abhängigkeit von der Position der defektbehafteten Fläche dargestellt. Auch hier sind die Ergebnisse für Probekörper unterteilt, welche vertikal bzw. horizontal ausgerichtet gefertigt wurden. Vertikal gefertigte Proben mit einem Defektanteil von $1/6$ ohne Defektverschiebung weisen eine Bruchdehnung von $A_{1/6,v} = 8,01 \% \pm 1,1 \%$, horizontal gefertigte Proben eine von $A_{1/6,h} = 11,6 \% \pm 1,1 \%$ auf, diese Werte gelten für die Bewertung der Verschiebung als Referenz. An den Ergebnissen von Probekörpern beider Ausrichtungen kann bei der ersten Stufe der Verschiebung um $0,6 \text{ mm}$ nur eine geringe absolute Veränderung der Bruchdehnung betrachtet werden.

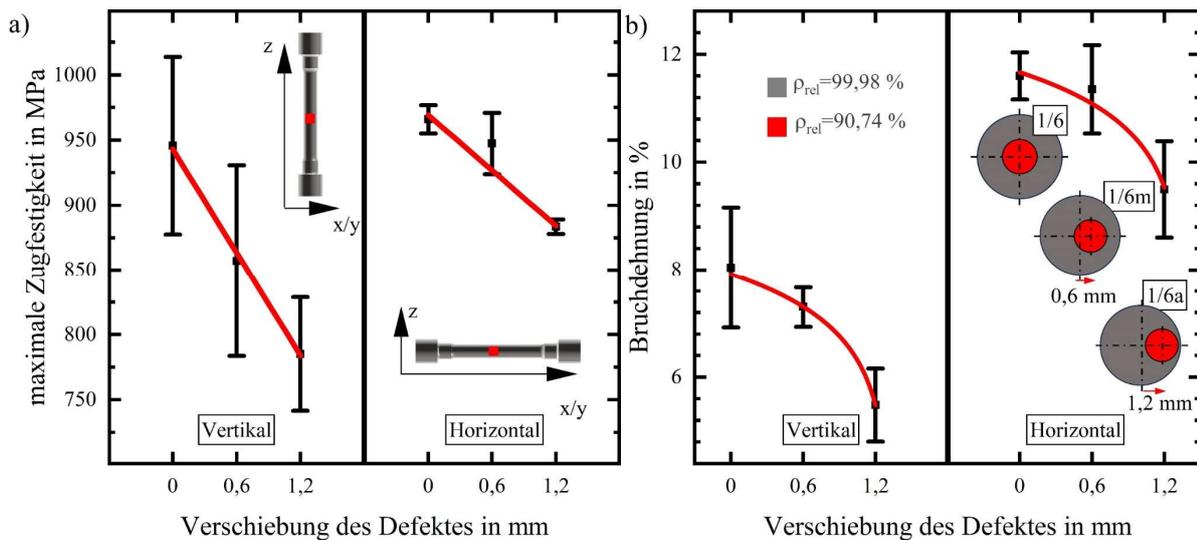


Abbildung 5-12: Kennwerte der maximalen Zugfestigkeit in a) und der Bruchdehnung in b) für Probekörper gefertigt in vertikaler sowie horizontaler Ausrichtung in Abhängigkeit von der Position des defektbehafteten Bereiches mit einem Anteil an der Querschnittsfläche von $1/6$.

Diese beträgt für vertikal gefertigte Proben $\Delta A_v = 0,74 \%$ (relativ $9,19 \%$), für horizontale $\Delta A_h = 0,24 \%$ (relativ $2,14 \%$). Deutlicher wird der Einfluss bei einer erneuten Verschiebung des defektbehafteten Bereiches um $1,2 \text{ mm}$. Hier wird eine Reduktion der Bruchdehnung bei vertikalen Proben um $\Delta A_v = 2,56 \%$ (relativ $31,8 \%$) und für horizontal gefertigte Proben um $\Delta A_h = 2,1 \%$ (relativ $18,1 \%$) beobachtet. Auch für die Verschiebung der Defekte ergibt sich eine exponentielle Abhängigkeit der Bruchdehnung.

Zusammenfassend verdeutlichen die vorgestellten Ergebnisse, dass die Anzahl und Position von Defekten die mechanischen Eigenschaften der Probekörper erheblich beeinflussen. Mechanische Eigenschaften werden in vertikaler Belastungsrichtung deutlicher beeinflusst als in horizontaler Richtung, abzuleiten ist dies von den Steigungen der linearen sowie exponentiellen Fit-Funktionen. Horizontal gefertigte Proben zeigen hingegen eine relativ konstante maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung, was auf eine geringere Sensitivität gegenüber den Defekten hindeutet. Diese Ergebnisse sind entscheidend für die Optimierung der Materialverarbeitung und die Vorhersage der mechanischen Leistungsfähigkeit von Komponenten mit unterschiedlichen Fertigungsorientierungen und Defektanteilen.

5.1.3 Zwischenfazit: Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften des Materials 1.4542

Bislang wurde der Einfluss stochastisch verteilter Defekte in Zugproben untersucht, wobei unterschieden wurde, ob diese im gesamten Volumen der Zugstäbe auftraten oder ob das Volumen, in denen sie provoziert wurden, in Größe und Position definiert wurde. Anhand der Versuche können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Zugversuchen von Probekörpern mit stochastisch verteilter LoF-Porosität.

ρ_{rel} in %	R_m in MPa	A in %
99,98 ± 0,04	906,0 ± 3,7	33,5 ± 0,76
99,89 ± 0,07	901,8 ± 7,3	33,1 ± 0,56
99,82 ± 0,19	774,8 ± 55,9	20,4 ± 3,66
98,80 ± 0,38	665,0 ± 66	17,4 ± 3,65
97,55 ± 1,09	575,8 ± 56	14,9 ± 0,65
94,60 ± 1,32	439,5 ± 6,5	6,4 ± 1,1
90,74 ± 1,74	325,0 ± 1	2,8 ± 0,55

Stochastisch verteilte Defekte im gesamten Volumen der Zugstäbe

1.: Die maximale Zugfestigkeit R_m und die Bruchdehnung A vertikal gefertigter Zugproben werden durch stochastisch verteilte Defekte beeinflusst. Der mathematische Zusammenhang zwischen der Dichte und mechanischen Eigenschaften kann, ebenso wie die Anzahl und Größe von Defekten, die im Material ausgeprägt sind, mittels exponentieller Funktion beschrieben werden, siehe Abbildung 5-5. Bereits bei einer Ver-

ringerung der relativen Dichte von 99,98 % auf 99,82 % geht eine Reduzierung der maximalen Zugfestigkeit um 132,8 MPa (relativ: -14,5 %) und der Bruchdehnung um 13,1 % (relativ: -39,1 %) hervor, siehe Tabelle 5-3. Dabei treten durchschnittlich 26 Defekte je mm² mit einer Fläche von $67 \mu\text{m}^2 \pm 101 \mu\text{m}^2$ auf, wobei der größte Defekt mit $790 \mu\text{m}^2$ bestimmt wurde, vgl. Tabelle T 3 im Anhang. Bei einer relativen Dichte von 90,74 % wird eine verbleibende maximale Zugfestigkeit von 325,0 MPa (relativ: -64,2 %) und Bruchdehnung von 2,8 % (relativ: -91,6 %) ermittelt. Die Anzahl der Defekte je mm² steigt auf 286 mit einer durchschnittlichen Fläche von $320 \mu\text{m}^2 \pm 1093 \mu\text{m}^2$, der größte Defekt hat eine Fläche von $27260 \mu\text{m}^2$. Anhand der relativen Abweichungen wird deutlich, dass der Einfluss der Defekte auf die maximale Zugfestigkeit geringer ist als auf die Bruchdehnung.

2.: Hohe Standardabweichungen der R_m und A bei relativen Dichten zwischen $\rho_{rel} = 99,82 \%$ und $\rho_{rel} = 97,55 \%$ deuten darauf hin, dass neben der Dichte auch die Position oder Größe der Defekte einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzt. Bei geringen relativen Dichten sinkt die Standardabweichung. Zurückzuführen ist dies auf die steigende Anzahl von Defekten, die Wahrscheinlichkeit, dass Defekte nahe der Probenoberfläche auftreten, nimmt zu. Diese Defekte werden aufgrund von Kerbwirkungen als kritisch bewertet. Zusätzlich können unzureichende Verschmelzungen im gesamten Zugstab zu unsymmetrischen Spannungsverteilungen führen, die in verfrühtem Versagen resultieren.

Stochastisch verteilte Defekte in definierten Volumen der Zugstäbe

Gefertigt wurden Zugstäbe mit definiert defektbehafteten zylinderförmigen Volumina variierender Größen und Positionen, welche eine relative Dichte von 90,74 % aufweisen. Die Volumina sind coaxial zur Achse des Rohlings ausgerichtet, siehe Abbildung 5-7. Es ergeben sich folgende Erkenntnisse:

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

1. Werden Defekte in lokal definierte Volumina eingebracht, die nicht an der Oberfläche der Zugstäbe liegen, ändert sich der mathematische Zusammenhang der maximalen Zugfestigkeit zur relativen Dichte. Anstelle des zunächst ermittelten exponentiellen wird ein linearer Zusammenhang ersichtlich, beobachtbar in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10. Die Abhängigkeit der maximalen Zugfestigkeit von der Position der Defekte kann damit nachgewiesen werden.

2. Das Volumen, welches mit variierten Prozessparametern gefertigt wird, hat keinen Einfluss auf die Festigkeit des Materials. Der verbleibende Querschnitt, gefertigt mit dem Referenzparametersatz, definiert die mechanischen Eigenschaften. Abzuleiten ist dies von Berechnungen der resultierenden maximalen Zugfestigkeit basierend auf der Formel zur Auslegung von Rohren, welche mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,995$ für die Vorhersage der maximalen Zugfestigkeit genutzt werden kann.

3. Die Bruchdehnung ist weiterhin exponentiell abhängig von der Größe des defektbehafteten Volumens. Erneut zeigt sich, dass eine starke Beeinflussung (von $A = 33,5\%$ zu $A = 20,4\%$) bereits durch – in Relation – geringe Fehlerausprägungen ($\rho_{rel} = 99,82\%$) hervorgeht. Die Bruchdehnung wird stärker durch Defekte beeinflusst als die maximale Zugfestigkeit. Bezüglich der Dauerfestigkeit kann eine ebenfalls starke Beeinflussung prognostiziert werden.

4. Die Auswirkung von Defekten ist in vertikaler Belastungsrichtung gravierender als in horizontaler Ausrichtung. Abgeleitet wird dies von den Steigungen der genutzten linearen Funktionen zur Beschreibung der maximalen Zugfestigkeit, wobei bei horizontalen Proben eine Steigung von $s = 102 \text{ MPa}/\%$ (relativ zur maximalen Zugfestigkeit des Referenzmaterials um $-8,8\%/%$), bei vertikalen Belastungen um $s = 135,2 \text{ MPa}/\%$ (relativ $-12,3\%/%$) ermittelt werden kann, siehe Tabelle 5-2. Gleiches kann anhand der Faktoren der exponentiellen Funktion für die Bruchdehnung berechnet werden.

5. Verschiebungen der defektbehafteten Volumina von der Mittelachse der Zugstäbe zeigen, dass die Position der Defekte einen linearen Einfluss auf die maximale Zugfestigkeit besitzt, die Bruchdehnung wird erneut exponentiell beeinflusst. Zurückgeführt wird dies auf unsymmetrische Spannungsverteilungen in den Zugstäben, die zu einem verfrühten Versagen führen.

5.2 ENTSTEHUNG UND AUSPRÄGUNG PROZESSTYPISCHER DEFEKTE AM MATERIAL 1.4404

Das Kamerasystem, welches für die Entwicklung des lokal und zeitlich hochauflösenden High-Speed-Kamera (HSK)-Monitoringsystems genutzt wurde, wurde im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „*Untersuchung der Laser-Material-Wechselwirkung von funktionalisierten diamantimprägnierten Metallmatrix-Verbunden im Laser-Strahlschmelzen*“ – WI 2118/17-1 beschafft. In diesem wurde die Verarbeitung von Metall-Matrix-Verbunden, basierend auf dem Material 1.4404 bzw. DEW Printdur 4404 oder 316L der Firma Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG (DEW) auf einer SLM 280HL der Firma Nikon SLM Solutions AG untersucht. Dieses zeichnet sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation bei hohen Temperaturen unter Beibehaltung eines niedrigen

Wärmeausdehnungskoeffizienten, einer hohen Kriechfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Hitzebeständigkeit aus [175–177].

Erkenntnisse über das Aufschmelzverhalten und die Verteilung von Diamanten in den Bauteilen, die in diesem DFG-Forschungsvorhaben durch die Nutzung des HSK-Systems erlangt wurden, wurden mit Schnell et al. [178] veröffentlicht.

Während der Entwicklung des HSK-Systems wurden ebenso Untersuchungen des Einflusses von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften durchgeführt wie für das LSP-System. Dabei soll eine vertiefte Betrachtung des Einflusses von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften erfolgen, die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1 bilden unter anderem die Grundlage. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse, die an den beiden Materialsystemen erlangt wurden, ist nicht möglich, da EOS GP1 mit größtem Anteil martensitisch, DEW 4404 hingegen austenitisch erstarrt [146].

Neben der Darstellung des Einflusses von Defekten auf die maximalen Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen wird in diesem Unterabschnitt auch der Einfluss von Defektpositionen auf die Dauerfestigkeiten von Prüfkörpern untersucht.

5.2.1 Relative Dichte über EV

Auch für das Material Printdur 4404 von DEW wurde untersucht, wie sich gezielte Variationen der Prozessparameter auf die Ausprägung von Defekten auswirken. Im Rahmen der Versuche wurden die Scangeschwindigkeit sowie Laserleistung manipuliert, um gezielt Defekte der Klassen Gasporen und LoF hervorzurufen. Ermittelt wurde die relative Dichte in Abhängigkeit von der Volumenenergiedichte, ebenso wie die Anzahl und Größe der Defekte, die sich im Material ausprägten. Da die Ergebnisse nahezu äquivalent zu denen sind, die in Unterabschnitt 5.1.1 beschrieben wurden, wird auf diese nicht weiter vertieft eingegangen. Im Anhang sind in Abbildung A 4 die Ergebnisse zu den relativen Dichten, in Abbildung A 5 und Tabelle T 6 die Defektanzahl und -größe dargestellt. Diese Ergebnisse können mit Schmelzbadbreiten von Einzelspuren korreliert werden, sodass mit dem HSK-System eine Bewertung entstehender Defekte ermöglicht ist.

5.2.2 Auswirkungen von Defekten auf statische mechanische Eigenschaften

Anders als in den Versuchen zur Bestimmung des Einflusses von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften von EOS GP1 werden für das Material DEW Printdur 4404 Defekte in das Material mittels Boole'scher Operationen eingebracht. Damit soll die lokale Entstehung von Defekten abgebildet werden. Abgeleitet wurden die eingebrachten Größen der Defekte aus Untersuchungen am Material EOS GP1, die zusammen mit Kleszczynski veröffentlicht wurden [87]. In den Versuchen wurden gezielt Defekte in der Mitte der Zugstäbe durch Boole'sche Operationen hervorgerufen. Die Kantenlängen der Grundfläche der genutzten Quader lagen zwischen $a = 0,025 \text{ mm}$ und $a = 1,5 \text{ mm}$. Trotz der Einbringung von Defekten lagen die Kennwerte der maximalen Zugfestigkeiten im vom Materialhersteller angegebenen Wertebereich von $R_m = 930 \pm 50 \text{ MPa}$. Durch die Einbringung von Defekten konnte teilweise sogar eine Steigerung der maximalen Zugfestigkeiten beobachtet werden. In diesen Versuchen

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

wird das Volumen für die Boole'schen Operationen mit einer Kantenlänge von $a = 0,75 \text{ mm}$ und einer Höhe von $h = 0,3 \text{ mm}$ definiert. Skizziert sind die Größe, Ausrichtung und Position in Abbildung 5-13. Bei Proben mit der Beschriftung ‚Inn‘ liegt der Mittelpunkt des Defektes auf der Mittelachse des Zylinders. Für die Proben ‚Mit‘ (0,895 mm) und ‚Auß‘ (1,79 mm) wird der Defekt linear von der Mittelachse verschoben. Zwischen Defekt und Oberfläche der Zugstäbe verbleiben Wanddicken von 0,18 mm (‚Auß‘) bzw. 1,07 mm (‚Mit‘). In Proben der Klasse ‚Ref‘ werden keine Fehlstellen provoziert. Jeweils vier Probekörper werden in vertikaler und horizontaler Ausrichtung für jede Probenart gefertigt, insgesamt werden somit 32 Proben in einem Bauprozess aufgebaut.

Die Fläche, die durch die Einbringung der Boole'schen Operationen im Bauteil als Defekt im Querschnitt eingenommen wird, wurde in Versuchsreihen ermittelt, die an dieser Stelle nicht vertieft beschrieben werden.

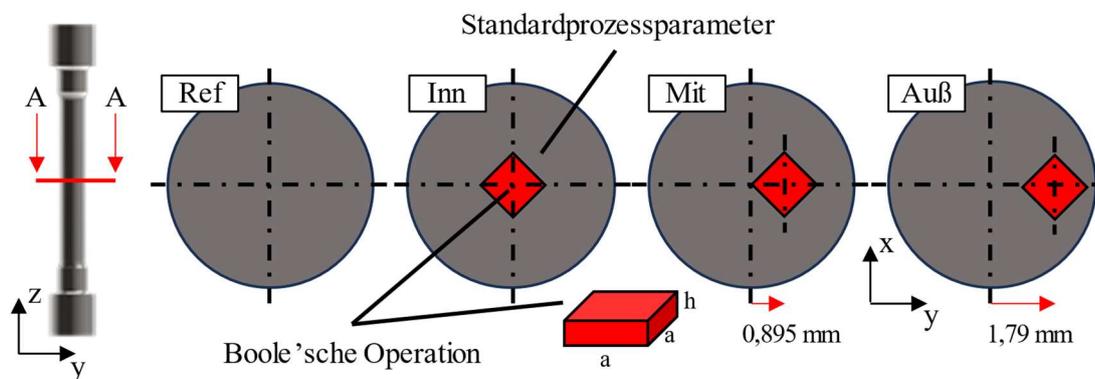


Abbildung 5-13: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Zugprobenvarianten, um Größe und Position des gebooleten Bereiches veranschaulichen zu können.

Zur Bestimmung der Fläche wurden Probekörper aufgebaut und metallurgisch präpariert, um die Defekte anschließend durch Mikroskopie und das MATLAB-Tool vermessen zu können. Dabei konnten Ausprägungen der Defekte von $A_{def-h} = 0,52 \text{ mm}^2$ (horizontal) bzw. $A_{def-v} = 0,53 \text{ mm}^2$ (vertikal) ermittelt werden. Die theoretische Dichte, die sich somit für die Probekörper ergibt, berechnet nach Formel (5-2) mit $\rho_{def} = 0$, beträgt $\rho_{th-h} = 97,35 \%$ bzw. $\rho_{th-v} = 97,30 \%$. Hierbei wird loses Pulver, das sich in den Defekten befinden kann, vernachlässigt, da es keinen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzt.

In Abbildung 5-14 sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme abgebildet, von denen die mechanischen Eigenschaften der Proben unter Zugbelastung in a) horizontaler und b) vertikaler Orientierung abgeleitet werden können. Als schwarze Linien sind die Referenzmessungen ‚Ref‘ aufgetragen, blaue Linien stehen für den Defekttyp ‚Inn‘, rote für ‚Mit‘ und dunkelgraue Linien für ‚Auß‘. Die Referenzkurve dient als Benchmark für das ideale Materialverhalten ohne Defekte, Abweichungen davon zeigen den Einfluss der Defekte auf die Eigenschaften auf. Bei separater Betrachtung von Abbildung 5-14 a) und b) wird deutlich, dass die Kurven in den elastischen Bereichen nahezu identische Verläufe aufweisen. Erst im plastischen Bereich prägen sich deutliche Unterschiede der mechanischen Eigenschaften in

Abhängigkeit von der Defektposition aus. Besonders stark scheint der Einfluss der Defektposition auf die Bruchdehnung zu sein, die maximalen Zugfestigkeiten hingegen werden weniger stark beeinflusst.

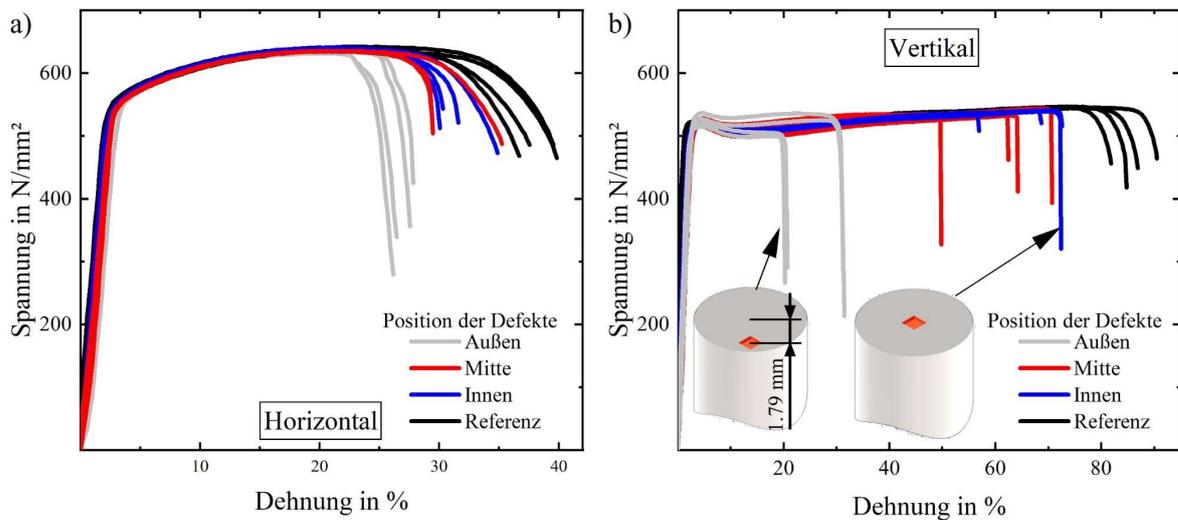


Abbildung 5-14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Zugstäben, welche a) horizontal und b) vertikal während des PBF-LB/M-Prozesses gefertigt wurden.

Die Kennwerte maximale Zugfestigkeit R_m in MPa sowie Bruchdehnung A in % werden, äquivalent zu Abschnitt 5.1, ausgewertet. In Abbildung 5-15 a) sind die Bruchdehnungen für vertikal sowie horizontal gefertigte Probekörper dargestellt, getrennt durch eine vertikale gestrichelte rote Linie, in Abhängigkeit von der Defektposition. Die durchschnittliche Bruchdehnung bei Belastung in horizontaler Richtung von Referenzproben beträgt 36,27 % und liegt somit in dem vom Materialhersteller angegebenen Intervall von $31 \% \leq A \leq 41 \%$ [140]. Bei horizontal gefertigten Probekörpern sinkt die Bruchdehnung von maximal 36,27 % auf minimal 25,4 % (relativ um 32,73 %), wenn der Defekt auf die äußere Position ‚Aus‘ verschoben wird. Deutlich wird zusätzlich, dass die Veränderung der Position des Defektes zwischen ‚Inn‘ ($A = 29,32 \%$) und ‚Mit‘ ($A = 29,24 \%$) nur einen geringen Einfluss auf die Bruchdehnung besitzt, die relativ 0,37 % beträgt.

Die Bruchdehnung vertikal gefertigter Probekörper beträgt für die Referenzproben 83,89 %. Damit übersteigt diese den vom Materialhersteller angegebenen Wert von $A = 45 \%$ um absolut 38,89 %. Eine mögliche Ursache für diese starke Abweichung wird im Zusammenhang mit der Analyse der Bruchflächen diskutiert. Bei vertikaler Belastung des Materials kann ein deutlicherer Einfluss der Defektpositionen auf die Bruchdehnung detektiert werden. Durch das Einbringen eines Defektes auf der Mittelachse sinkt die Bruchdehnung zunächst von $A = 83,89 \%$ auf $A = 65,37 \%$, was einer Reduktion um 22,07 % entspricht. Durch eine Verschiebung des Defektes um 0,895 mm verringert sich der Wert auf $A = 59,98 \%$, um weitere 8,25 %. Die Bruchdehnungen, die bislang vorgestellt wurden, liegen allesamt über den Werten der Bruchdehnung horizontal gefertigter Probekörper. Bei einer Verschiebung des Defektes um 1,79 mm erfolgt eine signifikante Beeinflussung, wobei der Wert auf $A = 24,43 \%$ sinkt (relativ zum Referenzwert um -70,88 %). Somit versagen die Probekörper noch früher als alle Probekörper, die in horizontaler Richtung belastet werden.

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

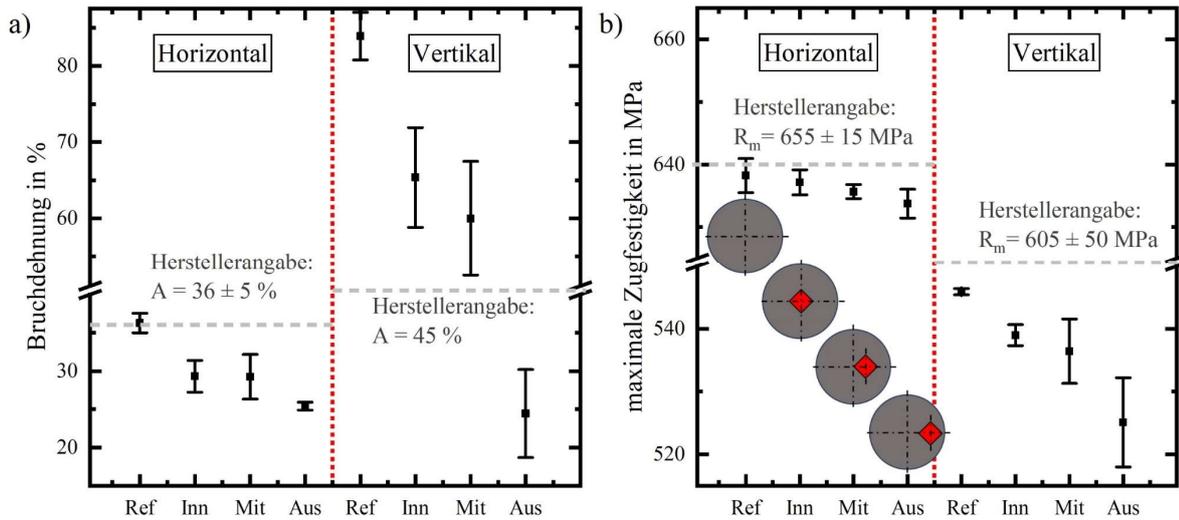


Abbildung 5-15: Bruchdehnung und maximale Zugfestigkeit von Zugstäben mit variierten Positionen eines Defektes: Inn – Defekt auf der Mittelachse des Zylinders; Aus – Mittelpunkt des Defektes um 1,79 mm nach außen verschoben; Mit – Defektposition zwischen Inn und Aus; Ref – Zugstab ohne Defekt.

In Abbildung 5-15 b) sind die maximalen Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Defektposition dargestellt. Die maximale Zugfestigkeit der horizontal gefertigten Probekörper ‚Ref‘ beträgt $638,25 \text{ MPa}$ und liegt somit knapp unterhalb des vom Hersteller angegebenen Bereiches von $640 \text{ MPa} \leq R_m \leq 670 \text{ MPa}$. Gatoes et al. [179] konnten an horizontal gefertigten Zugproben aus dem Material 316L, verarbeitet auf einer EOS M290 PBF-LB/M-Anlage, eine $R_m = 645 \pm 10 \text{ MPa}$ nachweisen. Eine Reduktion der maximalen Zugfestigkeit durch die provozierten Defekte ist ersichtlich. Durch Defekte der Art ‚Inn‘ reduziert sich die maximale Zugfestigkeit lediglich um $\Delta R_m = 1,1 \text{ MPa}$, oder um $0,17 \%$, obwohl die theoretische relative Dichte der Proben bei nur $\rho_{th} = 97,35 \%$ liegt. Besonders im Vergleich zu den Ergebnissen aus Unterabschnitt 5.1.2 scheint diese geringe Beeinflussung ungewöhnlich. Ein solches Verhalten konnte jedoch, wie bereits im Voraus beschrieben, in Untersuchungen von und mit Kleszczynski et al. [87, 180] an defektbehafteten Probekörpern aus dem Material EOS GP1 nachgewiesen werden. Eine Beeinflussung der maximalen Zugfestigkeit konnte in diesen Veröffentlichungen erst bei einem Defekt mit einer Kantenlänge von $a = 1,5 \text{ mm}$ nachgewiesen werden. Dabei entspricht die theoretische Dichte $\rho_{th} = 88,54 \%$, die Zugfestigkeit nimmt dabei jedoch nur um 2% von $R_m = 952 \text{ MPa}$ zu $R_m = 933 \text{ MPa}$ ab. Für die vorliegenden Versuche ist eine Vorhersage der maximalen Zugfestigkeit nach Formel (5-3), mit der die Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom verbleibenden Materialquerschnitt berechnet wird, nicht möglich. Eine Unterschätzung mit $R_{m-th} = 619,93 \text{ MPa}$ würde erfolgen, wobei die reale $R_m = 637,15 \text{ MPa}$ beträgt. Zurückgeführt wurde diese lediglich geringe Beeinflussung in der Veröffentlichung mit Kleszczynski [87] auf komplexe multiaxiale Spannungszustände, die im Material um den Defekt herum auftreten. Eine Beeinflussung im Bereich der Gleichmaßdehnung des Materials scheint auch in den vorliegenden Versuchen ableitbar, wodurch eine höhere Festigkeit resultiert.

Die größte Reduktion der maximalen Zugfestigkeit horizontal gefertigter Probekörper geht durch Einbringungen von Defekten hervor, die am nächsten an der Kontur des Zugstabes positioniert sind –

Defektart ‚Auß‘. Dabei kann eine verbleibende maximale Zugfestigkeit von $R_m = 633,76 \text{ MPa}$ ermittelt werden. Zwischen defektfreiem und am stärksten beeinflusstem Material beträgt die Abweichung lediglich $-0,71 \%$. Insgesamt können die Auswirkungen des eingebrachten Defektes auf die maximale Zugfestigkeit als gering eingestuft werden.

Ergebnisse anhand der Prüfkörper, welche vertikal gefertigt wurden, zeigen ebenso einen Einfluss der Defekte auf die maximale Zugfestigkeit auf. Die Referenzprobe besitzt eine maximale Zugfestigkeit von $R_m = 545,89 \text{ MPa}$ und liegt somit knapp unter der Herstellerangabe von $555 \text{ MPa} \leq R_m \leq 655 \text{ MPa}$. Durch die Einbringung eines Defektes, der auf der Mittelachse der Probekörper positioniert wird, wird die maximale Zugfestigkeit um $\Delta R_m = 6,94 \text{ MPa}$ oder $1,3 \%$ reduziert. Eine Verschiebung des Defektes auf die Position ‚Mitte‘ bewirkt eine weitere Abnahme um $\Delta R_m = 2,54 \text{ MPa}$. Bei der Probenklasse ‚Auß‘ kann das Minimum der maximalen Zugfestigkeit $R_m = 525,1 \text{ MPa}$ festgestellt werden, wobei die Differenz zum Referenzmaterial $\Delta R_m = 20,79 \text{ MPa}$ oder $3,8 \%$ beträgt.

Da die Veränderung der maximalen Zugfestigkeiten gering ausfällt, werden die Bruchflächen der Probekörper mittels Elektronenstrahlmikroskop untersucht, um den Rissursprung in Abhängigkeit von der Defektposition bewerten zu können. Ebenso soll geprüft werden, ob Ursachen für die deutlich erhöhte Bruchdehnung bestimmt werden können. Ausgewählte Bilder von Bruchflächen, die an vertikalen Zugproben ermittelt wurden, sind in Abbildung 5-16 gegenübergestellt.

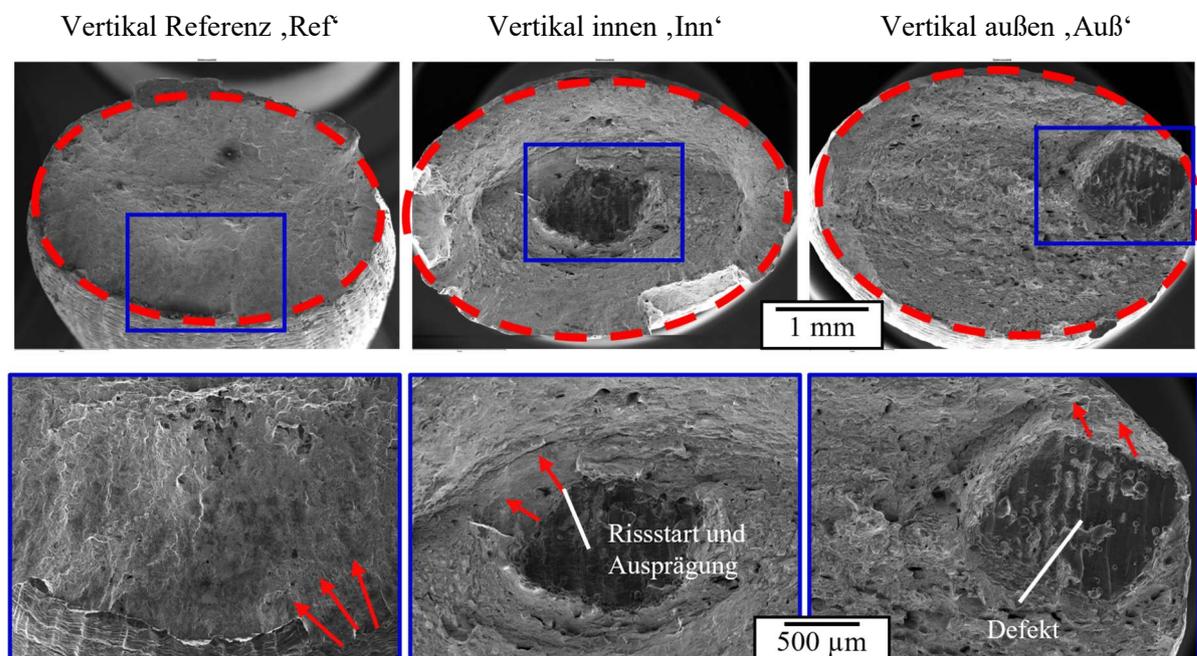


Abbildung 5-16: Analyse von Bruchflächen mittels Elektronenstrahlmikroskops für Probekörper ohne gezielt eingebrachte Defekte, Defekte, welche koaxial auf der Achse der Probekörper oder außen liegen.

Deutlich wird an allen, dass eine Verformung des kreisrunden zu einem elliptischen Querschnitt stattgefunden hat, welche für Zugversuche aufgrund des einachsigen symmetrischen Belastungsfalles ungewöhnlich ist. Das Verhältnis der beiden Hauptachsen der Ellipse zueinander beträgt gemittelt für alle

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

Versuche $0,677 \mp 0,018$. Diese zunächst unübliche Verformung der Zugstäbe während der Versuche wurde bereits von Diepold et al. [181] beobachtet. An dem Material 316L des Herstellers EOS GmbH wurde dargestellt, dass durch eine Rotation des Scanmusters von 67° eine anisotrope Kornstruktur bzw. Textur im Material hervorgerufen wird. Untersuchungen von Salman et al. [182], in denen die Auswirkung der Scanmuster auf die Kornstruktur bewertet wird, verdeutlichen die Abhängigkeit der Strukturen von den Anfangsbedingungen. Veränderte Kornstrukturen führen, nach beiden Veröffentlichungen, zu Ausprägungen anisotroper mechanischer Eigenschaften innerhalb der x/y-Ebene, welche Verformungen des Querschnittes unter Belastung bewirken. Diepold et al. [181] konnten Verformungen zu elliptischen Bruchflächen während Zugversuchen mit einem Verhältnis der kleinen zur großen Halbachse von 0,81 beobachten, obwohl bereits eine Wärmebehandlung zur Reduktion dieses Phänomens durchgeführt wurde. Ebenfalls konnte eine deutliche Steigerung der Bruchdehnung auf $A = 65 \%$ detektiert werden. Auch in Untersuchungen von Jaskari et al. [183] wurde eine Querschnittsveränderung an Zugproben aus dem Material 316L detektiert, hergestellt von SLM Solutions Group AG, gefertigt auf einer SLM 280HL PBF-LB/M-Anlage. Während der Fertigung wurde eine Rotation des Scanmusters von 35° gewählt. Proben mit der höchsten gemessenen relativen Dichte weisen nach einer Wärmebehandlung eine maximale Zugfestigkeit von $R_m = 834 \text{ MPa}$ bei einer Bruchdehnung von $A = 48 \%$ auf.

In Abbildung 5-16 können weiterhin der Rissursprung während der Zugversuche sowie die Position der Defekte betrachtet werden. Der Ursprung der roten Pfeile weist auf den Rissursprung und die Richtung hin, in die sich die Gewaltbrüche ausgeprägt haben. Bei Proben der Klasse ‚Ref‘ wird der Riss an der Probenoberfläche initialisiert. An Proben, in die ein Defekt eingebracht ist (‚Inn‘, ‚Mit‘ und ‚Auß‘), kann der Rissursprung in allen Fällen an den Außenflächen der Defekte ausgemacht werden. Die Defekte sind immer in der Bruchebene ersichtlich. Obwohl die Defekte lediglich einen geringen Einfluss auf die maximale Zugfestigkeit besitzen, limitieren diese die mechanischen Eigenschaften.

Zusammengefasst kann der Einfluss von Defekten auf die maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Probekörpern aus DEW Printdur 4404 ähnlich bewertet werden wie auf das Material EOS GP1. Zugfestigkeiten werden sowohl in vertikaler (max. -3,8 %) als auch in horizontaler (max. -0,71 %) Belastungsrichtung geringer beeinflusst als Bruchdehnungen (vertikal -70,88 %; horizontal -22,07 %). Dieses Phänomen lässt sich auch für das verarbeitete Material durch die Ausrichtung der Schmelzbäder und die Kornorientierungen ableiten, siehe Abbildung 5-11. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die Position der Defekte einen übergeordneten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzt. In vertikal gefertigten Probekörpern ergibt sich dabei ein Unterschied der Bruchdehnungen um bis zu $\Delta A = 40,94 \%$, in Abhängigkeit von der Defektposition. Allgemein wird beobachtet: Je weiter die Defekte zur Oberfläche der Proben verschoben werden, desto stärker werden die mechanischen Eigenschaften allgemein beeinflusst. Durch Versuche in dieser Dissertation und der Veröffentlichung mit Kleszczynski et al. [87] kann gezeigt werden, dass stochastisch verteilte Defekte einen deutlich stärkeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen als Defekte, die durch Boole'sche Operationen hervorgerufen werden. Deutlich wird dies durch den Vergleich der Ergebnisse mit denen aus

Unterabschnitt 5.1.2. Dort kann ein stärker ausgeprägter Zusammenhang zwischen mechanischen Kennwerten und der relativen Dichte des Materials hergeleitet werden. Zurückgeführt werden kann dies auf die Anzahl sowie Oberflächenkontur der resultierenden Defekte. Bei stochastisch verteilten Defekten sind die Oberflächen der Defekte deutlich unregelmäßiger und diese treten insgesamt häufiger auf. Somit entstehen an vielen Stellen Kerbwirkungen, die zu einem Riss führen können. Ebenso kann unvollständiges Umschmelzen des Grundmaterials zu Schwächungen in der Kornstruktur führen. Defekte, die durch Boole'sche Operationen hervorgerufen werden, weisen hingegen verhältnismäßig regelmäßige Oberflächenstrukturen und Ausprägungen der Kornstrukturen auf, die durch ein vollständiges Umschmelzen des Grundmaterials entstehen.

5.2.3 Dynamische mechanische Eigenschaften

Neben den Kennwerten der maximalen Zugfestigkeit sowie der Bruchdehnung wird für das Material DEW Printdur 4404 der Einfluss von Defekten auf die Dauerfestigkeit von Probekörpern ermittelt. Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Werkstoffprüftechnik der Technischen Universität Dortmund durchgeführt und sind teilweise zusammen mit Kotzem et al. [184] und Stern et al. [88] veröffentlicht. Im Rahmen dieser Dissertation werden die Grundlagen und Methoden nicht vollumfänglich dargestellt, für detaillierte Informationen wird auf diese Veröffentlichungen verwiesen.

Zur Bewertung des Einflusses von Defekten auf die Dauerfestigkeit PBF-LB/M-hergestellter Komponenten wurden Probekörper aus EOS 316L auf einer EOS M290 PBF-LB/M-Anlage, horizontal ausgerichtet, gefertigt. Die Ausrichtung der Proben wurde auf Grundlage der Arbeit von Riemer et al. [185] definiert, da aufgezeigt werden konnte, dass Defekte in PBF-LB/M-gefertigten Proben aus 316L aufgrund der Mikrostruktur in horizontal gefertigten Probekörpern schneller wachsen und somit einen stärkeren Einfluss besitzen. Während der Auslegung der Probekörper stellten erneut die Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Kleszczynski [87] die Grundlage dar, um die Kantenlängen der Defekte zu bestimmen. In Abbildung 5-17 sind die Positionierung – mittig auf der Achse des Probekörpers – und die Kantenlänge l_K der Defekte skizziert.

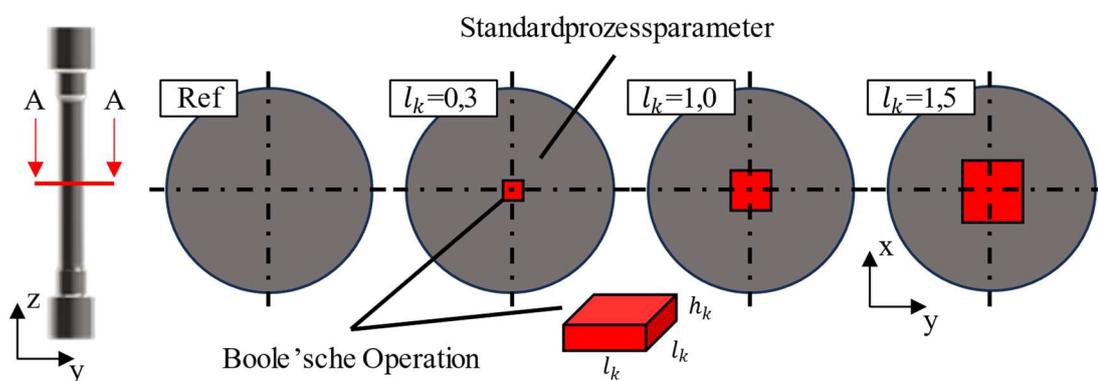


Abbildung 5-17: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Dauerfestigkeitsproben, um Größe und Position des gebooleten Bereiches veranschaulichen zu können.

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

Insgesamt werden vier Variationen von Probekörpern untersucht: 1. Referenzproben (Ref), ohne Defekt; 2. Defekt mittig in Probe mit einer Kantenlänge von $l_K = 0,3 \text{ mm}$; 3. Defekt mittig in Probe mit einer Kantenlänge von $l_K = 1,0 \text{ mm}$; 4. Defekt mittig in Probe mit einer Kantenlänge von $l_K = 1,5 \text{ mm}$. Für jede Art der Defektausprägung wurden fünf Probekörper gefertigt. Um die Dauerfestigkeit bestimmen zu können, werden die fünf Proben unter Beaufschlagung von fünf verschiedenen, konstanten Spannungsamplituden (engl.: *constant amplitude test – CAT*) belastet. Zur Ermittlung geeigneter Werte der Spannungsamplitude wurden im Voraus Versuche durchgeführt, bei denen die Amplitude beginnend bei 100 MPa kontinuierlich um 20 MPa nach 10^4 Belastungszyklen erhöht wurde (engl.: *multiple amplitude test – MAT*). Gleichzeitig wurde die Temperaturänderung der Probe ebenso wie die Amplitude der plastischen Dehnung analysiert. Die für die Dauerfestigkeitsversuche abgeleiteten Spannungsamplituden σ_{CAT} sind in Tabelle 5-4 aufgelistet und mit Nr. 1 bis Nr. 5 bezeichnet. Alle weiteren Parameter der Untersuchung wurden konstant gehalten. Während der Versuche, die bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt wurden, wurden eine Frequenz $f_{CAT} = 20 \text{ Hz}$ und eine vollständige umgekehrte Zug-Druck-Belastung (das Lastverhältnis entspricht $R = -1$) eingestellt.

Tabelle 5-4: Gewählte Spannungsamplituden für die Durchführung der Dauerfestigkeitsversuche.

	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
Spannungsamplitude im MPa	260	300	340	380	420

$f_{CAT} = 20 \text{ Hz}$; $R = -1$; T = Umgebungstemperatur, Anlage: Schenck PSB100 mit Instron 8800 Steuerung, Umgebungsgas: Luft; Genutzte Norm: DIN EN ISO 6892-1

Die Versuche werden für jede Defektklasse mit absteigenden Spannungsamplituden (von Nr. 5 absteigend bis Nr. 1) durchgeführt. Wird für eine Probenvariation die im Voraus definierte maximale Anzahl von Belastungszyklen ($N_{limit} = 10^7$) erreicht, so gilt diese Probe als dauerfest. Die Analyse dieser Probenvariante bei geringeren Spannungsamplituden wird nicht durchgeführt, da angenommen werden kann, dass die Proben auch mit geringerer Belastung dauerfest sind.

In Abbildung 5-18 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe in Form eines Wöhler-Diagramms wiedergegeben, das die Ermüdungsfestigkeit von Materialien durch die Beziehung zwischen der Spannungsamplitude in MPa und der Anzahl an Belastungszyklen bis zum Versagen (Ermüdungsleben) darstellt. Die vier unterschiedlichen Probenvarianten sind durch Quadrate in variierten Farben dargestellt: rote Quadrate für $l_K = 1,5$, blaue Quadrate für $l_K = 1,0$, graue Quadrate für $l_K = 0,3$ und schwarze Quadrate für den Referenzwert „Ref“. Die x-Achse ist logarithmisch skaliert und zeigt die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen. Auf der y-Achse ist die Spannungsamplitude in MPa aufgetragen. Linien, gestrichelt in den Farben der jeweiligen Datensätze, verbinden die Datenpunkte jedes Datensatzes und zeigen den Trend der Verläufe an. Eine vertikal ausgerichtete, grau gestrichelte Linie markiert die maximale Anzahl von Zyklen ($N_{limit} = 10^7$), die in dieser Versuchsreihe durchgeführt wurden. Aus den Daten wird grundlegend ersichtlich, dass höhere Spannungsamplituden generell dazu führen, dass Probekörper nach einer geringeren Anzahl von Belastungszyklen versagen.

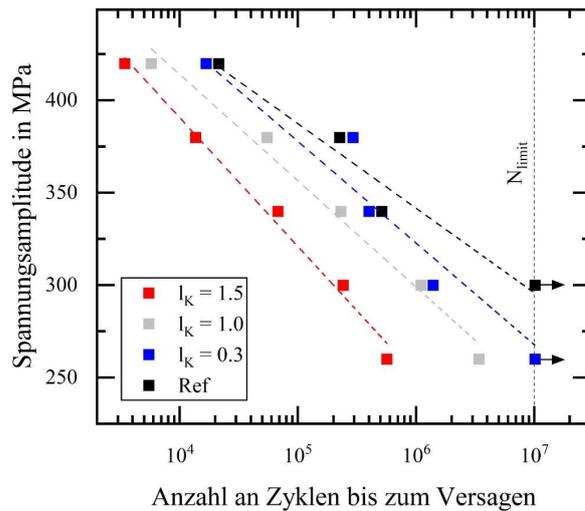


Abbildung 5-18: Ergebnisse von zyklischen Belastungsversuchen mit konstanter Amplitude (CAT) für PBF-LB/M-gefertigte Proben aus AISI 316L mit unterschiedlichen Kantenlängen der eingebrachten quadratischen Defekte sowie ein Referenzzustand.

Die Probe, in welche der größte Defekt mit einer Kantenlänge von $l_K = 1,5$ eingebracht wurde, zeigt unabhängig von der gewählten Spannungsamplitude die niedrigste Ermüdungsfestigkeit und versagt unter jeder gewählten Spannungsamplitude σ_{CAT} . Bei der höchsten $\sigma_{CAT} = 420 \text{ MPa}$ versagt die Probe bereits bei 3 420 Zyklen und weist somit eine um 83,07 % geringere Ermüdungsfestigkeit auf als die Referenzprobe, die erst nach 21 339 Zyklen versagt. Je geringer die Spannungsamplitude gewählt wird, desto höher sind die Zyklen, bis das Material versagt, bei $\sigma_{CAT} = 260 \text{ MPa}$ versagt die Probe mit einem $l_K = 1,5 \text{ mm}$ erst bei 565 521 Zyklen. Da die Referenzprobe bereits bei $\sigma_{CAT} = 300 \text{ MPa}$ nicht versagt, kann für diesen Fall keine relative Abnahme der Ermüdungsfestigkeit angegeben werden. Dauerfester zeigt sich die Probenvariante mit einer Kantenlänge des gebooleten Defektes von $l_K = 1 \text{ mm}$, jedoch versagen auch alle Proben innerhalb der Testreihe. Unter den Proben, in welche ein Defekt eingebracht wurde, weist die Probe mit einer Defektkantenlänge von $l_K = 0,3$ die höchste Ermüdungsfestigkeit auf. Bei der höchsten Spannungsamplitude $\sigma_{CAT} = 420 \text{ MPa}$ tritt ein Versagen der Probe nach 16 676 Belastungszyklen auf, der Defekt reduziert die Dauerfestigkeit um 21,9 %. Bei geringen Belastungen der Probe von $\sigma_{CAT} = 260 \text{ MPa}$ versagt das Material nicht und wird somit als dauerfest definiert. In Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse der Zyklen, die bis zum Versagen durchgeführt wurden, für die Referenzkörper angegeben. Zusätzlich sind auf diesen Werten basierend die Anteile der Zyklen angegeben, denen die Probekörper mit variierten Defekten standgehalten haben. Ersichtlich wird dabei, dass weder Probekörper mit einer Kantenlänge von 1,0 mm noch solche mit einer von 1,5 mm eine konstante Verringerung der Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Probekörper mit einer Kantenlänge von $l_K = 0,3 \text{ mm}$ weisen nahezu konstant eine Verringerung der Dauerfestigkeit von 22 % auf. Einen Ausreißer stellt der ermittelte Kennwert bei einer Spannungsamplitude von $\sigma_{CAT} = 300 \text{ MPa}$ dar, bei dem eine Reduzierung der Zyklusanzahl um 86 % hervorgeht. Hier wird das Auftreten eines randnahen, im PBF-LB/M induzierten Defektes vermutet, der die dynamischen Eigenschaften beeinflusst hat. Rautio et al. [186] konnten am Material 316L nachweisen, dass Reduzierung der Dauerfestigkeit um 20 % hervorgehen kann, wenn LoF-Defekte nahe der Oberfläche auftreten. In den Versuchen wurden Proben mit Oberflächen im As-built-Zustand getestet. Die Konturbelichtungsstrategien wurden variiert, wodurch LoF-Defekte mit bis zu einer Länge von 50 μm bis 100 μm provoziert wurden. Mit den besten Parameterkombinationen konnten die Autoren Dauerfestigkeiten ($n_{limit} = 2 \times 10^6$) bei maximalen Spannungsamplituden von $\sigma_{CAT} = 250 \text{ MPa}$ nachweisen.

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

Tabelle 5-5: Anzahl der Zyklen, die der Referenzprobekörper unter Belastung mit unterschiedlichen Spannungsamplituden ausgehalten hat. Zusätzlich dargestellt sind die Anteile der Zyklen, die von den defektbehafteten Probekörpern ausgehalten wurden.

Probekörper	ρ_{theo} in %	σ_{CAT} im MPa					Zyklen
		420	380	340	300	260	
Referenz	99,98	$21,4E^3$	$29,2E^4$	$51,1E^4$	$1,0E^7$	$1,0E^7$	
$l_k = 0,3 \text{ mm}$	99,62	0,78	0,77	0,78	0,14*	1	Anteil Ref/ l_k
$l_k = 1,0 \text{ mm}$	95,31	0,26	0,19	0,45	0,11	0,34	
$l_k = 1,5 \text{ mm}$	89,08	0,16	0,04	0,13	0,02	0,06	

*Ausreißer;

Untersuchungen der Bruchflächen zweier Proben mit Defekttyp a) $l_K = 0,3 \text{ mm}$ und b) $l_K = 1,0 \text{ mm}$ sind in Abbildung 5-19 gezeigt. Obwohl im Voraus durch mCT-Analysen sichergestellt werden konnte, dass sich Defekte mit einer Querschnittsfläche von $0,071 \text{ mm}^2$ – gemessen orthogonal zur Mittelachse der Zylinder – ausprägen, wenn Quader mit einer Kantenlänge von $l_K = 0,3 \text{ mm}$ geboolet werden, sind die Defekte unerwartet nicht auf der Bruchfläche ersichtlich. Dieses Verhalten konnte an fast allen Proben beobachtet werden, bis auf den Probekörper, der mit einer $\sigma_{CAT} = 420 \text{ MPa}$ belastet wurde. Bei allen Proben wurde der Rissursprung nicht am eingebrachten Defekt detektiert. In Abbildung 5-19 kann der Rissursprung oberflächennah bestimmt werden, wobei dieser auf eine transkristalline Rissbildung zurückzuführen ist [187]. Obwohl der Rissursprung nicht am eingebrachten Defekt lokalisiert werden kann, konnte der Einfluss des Defektes auf die Dauerfestigkeit nachgewiesen werden, vgl. Tabelle 5-5 oder Abbildung 5-18. Zurückzuführen ist dies beispielsweise auf eine unsymmetrische Spannungsverteilung im restlichen Material und eine dadurch resultierende stärkere lokale Belastung einzelner Bereiche. Bei den Probekörpern mit dem nächstgrößeren eingebrachten Defekt ($l_K = 1,0 \text{ mm}$) sind diese Defekte in den Bruchebenen immer ersichtlich. Weiterhin kann beobachtet werden, dass der Riss von der rauhen Oberfläche des Defektes ausgeht. Von dort aus beginnt zunächst ein stabiles Risswachstum ,1', welches zum endgültigen Bruch ,2' führt, siehe Abbildung 5-19 b). Eine Einordnung der Ergebnisse kann anhand der Versuche von Riemer et al. [185] erfolgen. Die Autoren untersuchen ebenfalls die Dauerfestigkeit des Materials 316L, gefertigt auf einer SLM 250 HL. Dabei ist eine Zykluszahl $n_{limit} = 2 \times 10^6$ als maximale Belastungszahl definiert. An Probekörpern mit spanend nachbearbeiteter Oberfläche wird eine Spannungsamplitude von $\sigma_{CAT} = 267 \text{ MPa}$ angegeben, bei der die Probekörper vor der maximalen Zykluszahl versagen. Die Spannungsamplituden, die im Vergleich in den hier vorgestellten Ergebnissen eingestellt werden müssten, sodass die Proben nach $n_{limit} = 2 \times 10^6$ versagen, wären für das Referenzmaterial $\sigma_{CAT} = 315 \text{ MPa}$, für Proben mit einer Seitenlänge des Defektes von $l_K = 0,3 \text{ mm}$ $\sigma_{CAT} = 300 \text{ MPa}$ und mit $l_K = 1,0 \text{ mm}$ selbst 285 MPa .

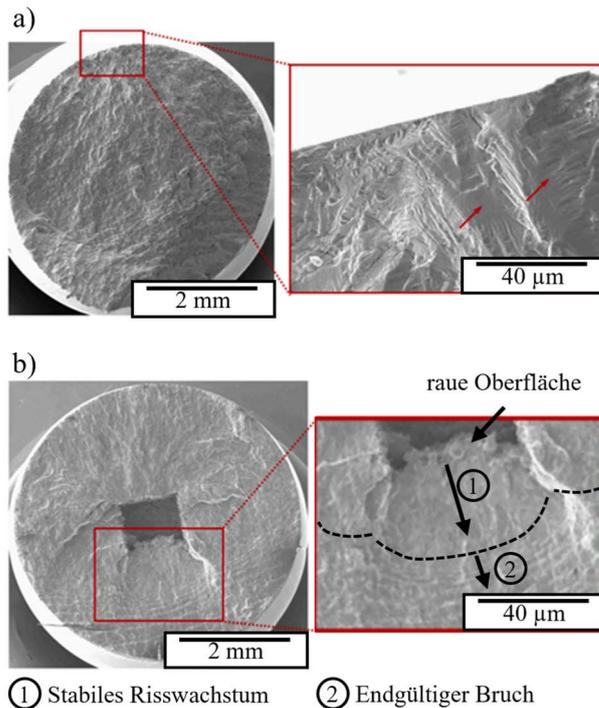


Abbildung 5-19: Bruchfläche eines a) Probekörpers mit einer Kantenlänge des Defektes von $l_K = 0,3 \text{ mm}$ bei $\sigma_{CAT} = 340 \text{ MPa}$ und b) einer Kantenlänge von $l_K = 1,0 \text{ mm}$ bei $\sigma_{CAT} = 340 \text{ MPa}$.

Da in den vorausgegangenen Versuchen ermittelt wurde, dass Defekte, die auf der Mittelachse positioniert sind, $\sigma_{CAT} = 275 \text{ MPa}$. Werden die Defekte näher zur Oberfläche verschoben, so reduziert sich die Spannungsamplitude um bis zu 21,46 % auf $\sigma_{CAT} = 216 \text{ MPa}$.

Da in den vorausgegangenen Versuchen ermittelt wurde, dass Defekte, die durch Boole'sche Operationen eingebracht werden, einen geringeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen als stochastisch verteilte Defekte, wären solche Untersuchungen für zukünftige Projekte sinnvoll.

5.2.4 Zwischenfazit: Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften des Materials 1.4404

Zur Bewertung des Einflusses von Defekten auf mechanische Eigenschaften des Materials DEW Printdur 4404 wurden Boole'sche Operationen innerhalb der Zugstäbe und Dauerfestigkeitsproben vorgenommen. Für Zugversuche wurden Defekte mit einer Querschnittsfläche von $A_{def} = 0,53 \text{ mm}^2$ – gemessen in der Ebene orthogonal zur Mittelachse der Zylinder – hervorgerufen, woraus sich eine theoretische relative Dichte der defektbehafteten Probekörper von $\rho_{theo} = 97,35 \%$ ergibt. In Tabelle 5-6 sind die absoluten Kennwerte der maximalen Zugfestigkeit und Bruchdehnung, ermittelt am Referenzmaterial, sowie die relativen Abweichungen zu diesen in % zusammengefasst. Die maximale Zugfestigkeit R_m weicht für horizontal (-0,7 %) sowie für vertikal gefertigte (-3,8 %) Probekörper nur geringfügig vom Referenzwert ab, wenn Defekte oberflächennah auftreten.

Weiterführende Versuche zum Einfluss von Defekten auf die Dauerfestigkeiten wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl WPT der Technischen Universität Dortmund durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss von Defekten in Form von Ellipsoiden auf Probekörper aus 316L, gefertigt mit dem PBF-LB/M-Verfahren, in unterschiedlicher Größe und Position untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden in der Dissertation von Stern [188] veröffentlicht und können bei Interesse dort nachgelesen werden. Quintessenz der Untersuchungen ist, äquivalent zu den Ergebnissen der Zugversuche, dass die Ermüdungseigenschaften der Probekörper deutlich abnehmen, sobald der Abstand zwischen Defekt und Oberfläche der Proben abnimmt. Die Spannungsamplitude, bei der Proben als ermü-

5.2 Entstehung und Ausprägung prozesstypischer Defekte am Material 1.4404

Tabelle 5-6: Einfluss der Defekte auf die mechanischen Kennwerte maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Relation zu den Kennwerten der Referenzproben.

	Horizontal		Vertikal		Abweichung in % zu Ref
	R_m in MPa	A in %	R_m in MPa	A in %	
Ref	638,2 ± 2,7	36,3 ± 1,3	545,9 ± 0,5	84,9 ± 3,1	
Inn	- 0,17	- 19,2	- 1,3	- 22,1	
Mit	- 0,4	- 19,4	- 1,7	- 28,5	
Aus	- 0,7	- 29,9	- 3,8	- 70,9	

Deutlicher ausgeprägt ist der Einfluss der Defekte auf die Bruchdehnung A. Bereits bei Probe ‚Inn‘ tritt eine Reduktion der Bruchdehnung von -19,2 % (horizontal)

bzw. -22,1 % (vertikal) auf. Wird der Defekt näher zur Kontur der Proben verschoben, so verstärkt sich der Einfluss auf die Bruchdehnung auf -29,9 % (horizontal) bzw. -70,9 % (vertikal). Auch durch die Ergebnisse dieser Versuchsreihe kann gezeigt werden, dass der Einfluss von Defekten auf vertikale Belastungsfälle stärker ausgeprägt ist als orthogonal hierzu. Auch wenn in den Auswertungen nicht genauer darauf eingegangen wird, so ist in Abbildung 5-14 ersichtlich, dass das Verhalten der Proben im Bereich der elastischen Dehnung kaum voneinander abweicht. Eine Nutzung von Bauteilen mit solchen Defekten könnte für rein statische Belastungsfälle somit erfolgen, solange der Auslegungspunkt unterhalb der Streckgrenze R_{eH} bzw. $R_{p0,2}$ liegt.

Werden defektbehaftete Bauteile hingegen dynamisch belastet, so ist ein starker Einfluss auf die Dauerfestigkeit erkennbar. In Tabelle 5-5 sind die Eigenschaften in Abhängigkeit von der Fehlerausprägung aufgeführt. In den Versuchen wurden Defekte auf der Mittelachse der zylindrischen Probekörper mit Kantenlängen zwischen $l_K = 0,3 \text{ mm}$ und $l_K = 1,5 \text{ mm}$ provoziert. Obwohl die kleinsten eingebrachten Defekte ($l_K = 0,3 \text{ mm}$) bei den Untersuchungen der Bruchflächen nicht ersichtlich sind und somit nicht den Rissursprung darstellen, besitzen sie einen deutlichen Einfluss auf die Dauerfestigkeit. Die Zykluszahlen bis zum Versagen der Proben bei variierten Spannungsamplituden nehmen im Vergleich zu den Referenzproben um ca. 23 % ab. Probekörper mit größeren Defekten versagen deutlich schneller, die Reduktion der Lastspielzyklen reduziert sich um bis zu 98 % ($l_K = 1,5 \text{ mm}$, $\sigma_{CAT} = 300 \text{ MPa}$).

Weiterführende Versuche, die mit Stern [188] durchgeführt und in seiner Dissertation veröffentlicht wurden, zeigen, dass die Position der Defekte ebenso einen starken Einfluss auf die Dauerfestigkeit besitzt. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass reale LoF-Defekte, hervorgerufen über Manipulationen der Prozessparameter, einen höheren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen als Defekte, die durch Boole'sche Operationen provoziert werden. Zurückgeführt wird dies auf deutlich regelmäßigeren Oberflächen bei Defekten, die mittels Boole'scher Operationen erzeugt werden, und die höhere Anzahl stochastisch verteilter Defekte bei gleicher relativer Dichte, sodass deutlich mehr Bereiche vorhanden sind, an denen Kerbwirkungen entstehen, vgl. Abbildung 5-20.

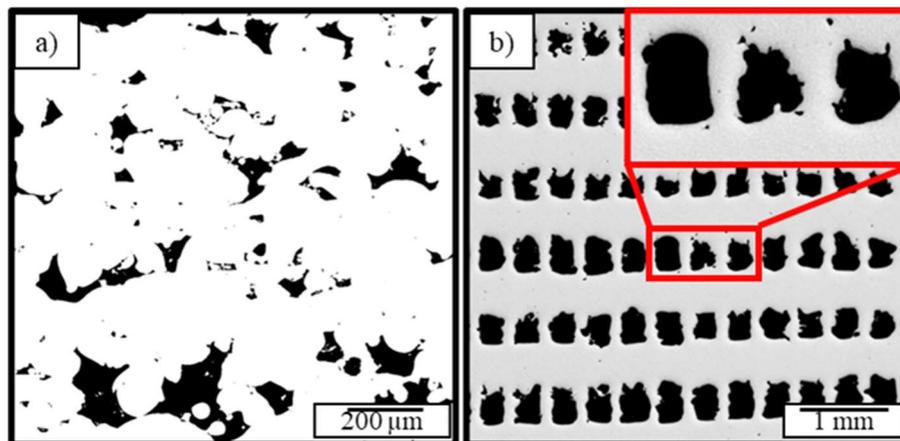


Abbildung 5-20: Defektausprägungen in Abhängigkeit der gewählten Methode zur Erzeugung der Defekte in x/z -Ebene. a) Durch Variation der Laserleistung, b) durch Boole'sche Operationen.

Zusätzlich werden zur Erzeugung von LoF-Defekten geringere Volumenenergiedichten angewandt, welche zu variierenden Schmelzbadcharakteristika sowie Änderungen der Kornstrukturen, besonders an den Schmelzbadgrenzen,

wie Siegerungen, führen können, die in einem schnelleren Versagen des Materials resultieren.

Auch anhand der in diesem Unterabschnitt beschriebenen Ergebnissen wird, äquivalent zu den Ergebnissen in Unterabschnitt 5.1.3, der Bedarf an Prozess-Monitoringsystemen ersichtlich, die eine lokal hochauflösende Detektion von Defekten ermöglichen. Für LoF-Defekte kann anhand Abbildung 5-5 und Tabelle T 3 (im Anhang) abgeleitet werden, dass Defekte mit einer Querschnittsfläche von $790 \mu\text{m}^2$ (Kantenlänge $28,1 \mu\text{m}$) einen deutlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Probekörpern aus EOS GP1 besitzen. Kleinere Defekte (Querschnittsfläche $326 \mu\text{m}^2$; Kantenlänge $18,05 \mu\text{m}$) haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Eigenschaften, siehe im Voraus genannte Abbildung und Tabelle. Bestmöglich lösen Prozessmonitoring-Systeme somit Defekte zwischen den Größen von $326 \mu\text{m}^2$ bis $790 \mu\text{m}^2$ lokal auf. Für Dauerfestigkeiten zeigt sich, dass Defekte mit einer Kantenlänge kleiner $300 \mu\text{m}$ detektiert werden können müssen, wenn diese mit Boole'schen Operationen hervorgehoben werden. In den folgenden Abschnitten wird die Anwendung der beiden Prozess-Monitoringsysteme vorgestellt, basierend auf der Laser-Speckle-Photometrie bzw. der Analyse von Schmelzbademissionen mittels High-Speed-Kamera.

5.3 IN-SITU-MONITORING MITTELS LASER-SPECKLE-PHOTOMETRIE

In den Abschnitten 5.1 und 5.2 wurde der Einfluss von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Komponenten untersucht. Die Ergebnisse zeigen den Bedarf an potenten Prozessmonitoring-Systemen. In dieser Arbeit wird erstmalig das Potenzial der LSP-Messmethode untersucht, um Defekte während der PBF-LB/M-Fertigung in situ zu analysieren. In Versuchen, die zusammen mit Dang et al. [132, 189, 190] veröffentlicht wurden, konnte bereits die Fähigkeit des LSP-Systems zur Detektion von Materialeigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Komponenten in externen Laborversuchen am Fraunhofer IKTS nachgewiesen werden.

Das für den PBF-LB/M optimierte LSP-System wird, wie in Abbildung 4-8 dargestellt, außerhalb des Bauraumes auf einer Halterung fixiert. Die Betrachtung der Probenoberfläche erfolgt unter einem

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Winkel α und durch das Sichtfenster der EOS M270 PBF-LB/M-Anlage. Die in den ex-situ Versuchen ermittelten LSP-Signale können aus diesem Grund nicht als Referenz für diese Versuchsreihen genutzt werden. Für die Nutzung und Bewertung des LSP-Systems werden deshalb folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Bestimmung von Einflussfaktoren des LSP-Messsignals und ggf. Entwicklung geeigneter Gegenmaßnahmen, um Messungen möglichst reproduzierbar zu gestalten.
2. Kalibrierung des LSP-Messsignals auf unterschiedliche Materialzustände bzw. Dichten.
3. Analyse des Potenzials des LSP-Systems zur Ermittlung der Größe und Position von Defekten.

Untersucht werden Defekte der Klasse LoF. Alle Versuche werden auf einer EOS M270 PBF-LB/M-Anlage und mit dem Material EOS GP1 durchgeführt. Die Materialauswahl basiert auf einer Abstimmung des projektbegleitenden Ausschusses im Forschungsvorhaben „*In-situ-Überwachung und Optimierung additiver Laser-Strahlschmelzprozesse durch Speckle-Sensorik – AddiSpeck*“.

5.3.1 Steigerung der Messgenauigkeit des LSP-Systems

Ein Einflussfaktor der LSP-Messung ist die Belichtungsintensität des Bildausschnittes bzw. der ROI. Hervorgerufen werden können Schwankungen der Intensität zum einen durch die Einstellung der Belichtungsleistung des Speckle-Lasers. Aber auch die Gauß'sche Verteilung der Belichtungsintensität auf der Oberfläche kann zu lokalen Variationen führen, ebenso wie Veränderungen bei der Ausrichtung des BelichtungsLasers. Da ein mehrfacher Auf- und Abbau des Systems an der Anlage stattfindet, wird der Einfluss der ursprünglichen Intensität im ROI auf das LSP-Signal untersucht.

Hierzu wird ein zylindrischer Probekörper mit einem Durchmesser von $d_z = 10$ mm und einer Höhe von $h_z = 10$ mm mit Standardparametern (siehe Tabelle 5-1) gefertigt, woraus sich eine Dichte des Materials von $\rho_{rel} = 99,98$ % ergibt. Der 2 mm x 2 mm große Messbereich des LSP-Systems ist auf die Mittelsachse des gefertigten Zylinders ausgerichtet. Somit können möglichst homogene Eigenschaften während der Ausdehnung sowie der Schrumpfung des Materials, hervorgerufen durch die thermische Anregung, gewährleistet werden. Ein möglicher Einfluss der „initialen Intensitätsverteilung“ wird durch eine Variation der Leistungen des BelichtungsLasers untersucht. Dafür werden in-situ-Messungen am selben Material durchgeführt, um zu verhindern, dass mögliche Änderungen der Oberflächentopografie in aufeinanderfolgenden Schichten einen Einfluss auf das LSP-Messsignal besitzen.

Auswirkung der Leistung des BelichtungsLasers auf das LSP-Ergebnis

Tabelle 5-7 Genutzte Parameter für die Versuchsreihe zur Bewertung des Einflusses der Leistung des BelichtungsLasers auf das LSP-Messergebnis.

Variation	Leistung in mW	Winkel α	PBF-LB/M-Parameter
1	500	43,5°	Standardprozessparameter-satz
2	750		
3	1 300		
4	1 500		

In Tabelle 5-7 sind die Variationen der Leistung des BelichtungsLasers P_I , der benötigt wird, um die Speckle-Muster hervorzurufen, dargestellt. Untersucht werden vier Stufen $500 \text{ mW} \leq P_I \leq 1\,500 \text{ mW}$ der Leistung, die in Abhängigkeit von ex-situ-Untersuchungen beim Projektpartner definiert wurden. Der Winkel α der

Kamera und des BelichtungsLasers zur Horizontalen beträgt im Versuchsaufbau 43,5°. Zur Bewertung der Veränderungen in Abhängigkeit von P_I wird die durchschnittliche Intensität I_M im ROI für jede der vier Stufen ermittelt. Dargestellt sind die Ergebnisse in Abbildung 5-21, wobei in a) Bilder des ROIs mit variierten P_I aufgezeigt sind. Ersichtlich wird, dass die Intensitäten im Messbereich mit höheren Belichtungsleistungen steigen.

Dunkle Bereiche ($I = 0$) werden aufgehellt, gleichzeitig steigen die Anzahl und Größe von Bereichen, die weiß wirken und somit eine hohe, eventuell sogar die höchste detektierbare Intensität ($I = 255$) aufweisen. Eine Analyse der Häufigkeitsverteilung der Intensitäten, durchgeführt mit der Software ImageJ [191], dargestellt in b), bestätigt diese Beobachtung.

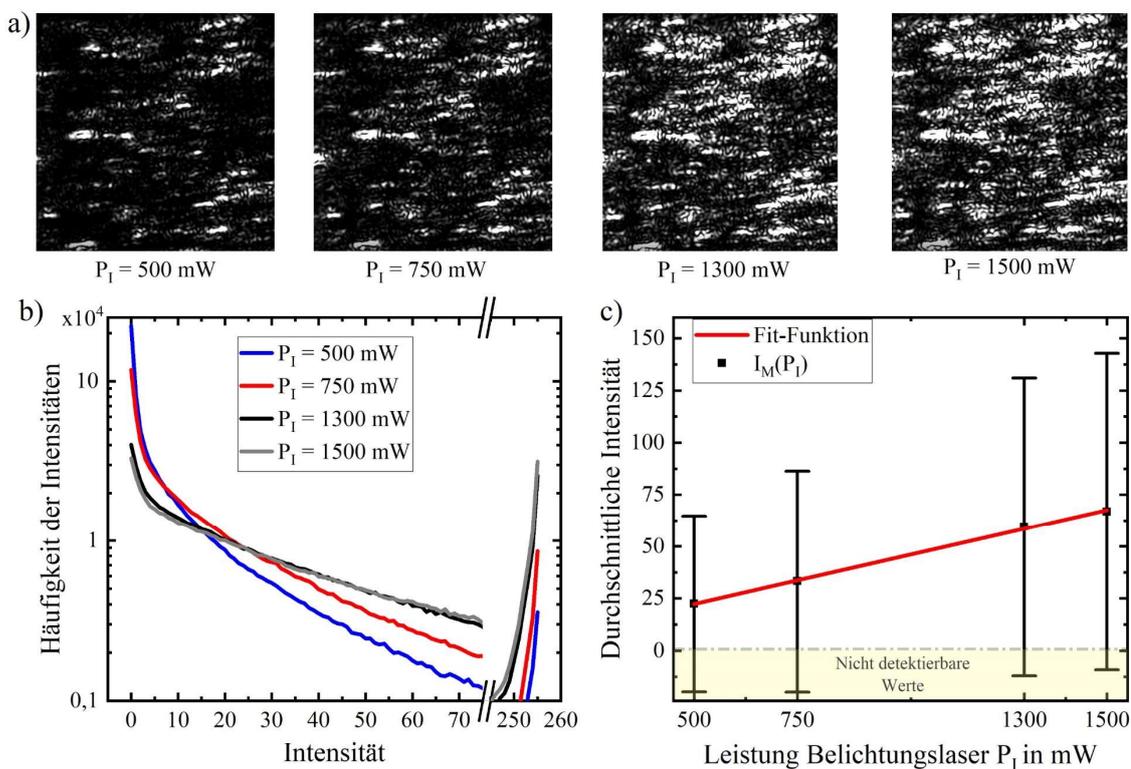


Abbildung 5-21: Auswertung variierten Leistungen des BelichtungsLasers anhand: a) von Bildern des LSP-Systems vor der Messung; b) der Häufigkeitsverteilung von Intensitäten im Messbereich sowie c) der gemittelten Intensitäten im betrachteten Bildausschnitt des LSP-Systems.

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Bei geringen Leistungen ist der Anteil an Pixeln, die eine geringe Intensität ($0 \leq I \leq 10$) im Messbereich detektieren, am höchsten, wobei der Anteil von Pixeln, die die höchsten Intensitäten ($245 \leq I \leq 255$) aufweisen, am geringsten ist. Das Verhältnis verschiebt sich umso mehr, je höher die eingestellte Leistung des BelichtungsLasers gewählt wird. Bei allen Einstellungen der Belichtungsleistung werden Pixel mit der geringsten ($I = 0$) und höchsten ($I = 255$) Intensität ermittelt. Während dieser Messungen wird somit das gesamte Spektrum ausgenutzt, welches von der Kamera detektiert werden kann.

In Abbildung 5-21 c) kann der Trend, dass die Intensitäten mit zunehmender P_I steigen, anhand der Mittelwerte der Intensitäten I_M im jeweiligen Messbereich bestätigt werden. Liegt der Mittelwert bei geringster Leistung bei $I_M = 22,49$, so steigt dieser nahezu linear an, bis zu $I_M = 66,89$ bei der höchsten Leistung von 1 500 mW. Der Zusammenhang zwischen der gemittelten Intensität im Messbereich und der gewählten Leistung kann dabei über folgende Formel, welche für die Fit-Funktion genutzt wurde, beschrieben werden.

$$I_M(P_I) = a * b \quad (5-4)$$

mit	$a = 22,49$	und	$b = P_I / 500$
-----	-------------	-----	-----------------

Das Bestimmtheitsmaß beträgt für die dargestellte Fit-Funktion $R^2 = 0,9991$ und zeigt somit den deutlichen Zusammenhang zwischen der P_I und der I_M . Nicht zu vernachlässigen sind die hohen Standardabweichungen, die in den Ergebnissen auftreten. Diese reichen bis in den Bereich der negativen Intensitäten. Diese Werte sind jedoch nur theoretisch und können vom Messsystem nicht detektiert werden. Zurückzuführen sind die hohen Standardabweichungen auf die betrachtete Oberfläche, die im PBF-LB/M-Prozess durch das Aneinanderreihen von Schweißnähten hervorgeht, deren Oberflächen zumeist konvex ausgeformt sind und somit ein raues Profil aufweisen. Untersucht wurde die Auswirkung der Rauheit von Proben auf das LSP-Signal detaillierter in Zusammenarbeit mit Dang et al. [189]. Nach der Ermittlung der initialen mittleren Intensitäten $I_M(P_I)$ im ROI erfolgt die Analyse dynamischer Speckle-Muster. Dazu geschieht eine Anregung der Oberfläche mit dem Speckle-Parametersatz, vorgestellt in Tabelle 4-5. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 5-22 a) aufgetragen. Ersichtlich wird, dass unabhängig von der eingestellten P_I , eine Anregung und somit lokale Änderungen der Speckle-Muster bewirkt werden, die in einer Steigung der Funktionswerte $C(\tau)$ resultieren. Zu erkennen ist auch, dass die Funktionswerte abhängig von der gewählten Belichtungsleistung des Speckle-Lasers stark voneinander abweichen. Der globale Verlauf der Funktionen zeigt dabei Ähnlichkeiten auf und wirkt gestaucht bzw. gestreckt. Ausschlaggebende Kennwerte der Messung sind in bisherigen Untersuchungen bislang die Kennwerte der Korrelationsfunktion im letzten Bild. Auch in dieser Arbeit wird dieser Funktionswert $C(39)$ untersucht und dafür in Abbildung 5-22 b) über der Leistung des BelichtungsLasers aufgetragen. Mit der gewählten linearen Fit-Funktion, welche ein R^2 von 0,97 aufweist, kann ein linearer Zusammenhang zwischen den Werten der $C(39)$ und der eingestellten P_I abgeleitet werden.

Deutlich wird, dass die maximale Ausprägung der $C(39)$ bei geringst gewählter Leistung des Belichtungs-

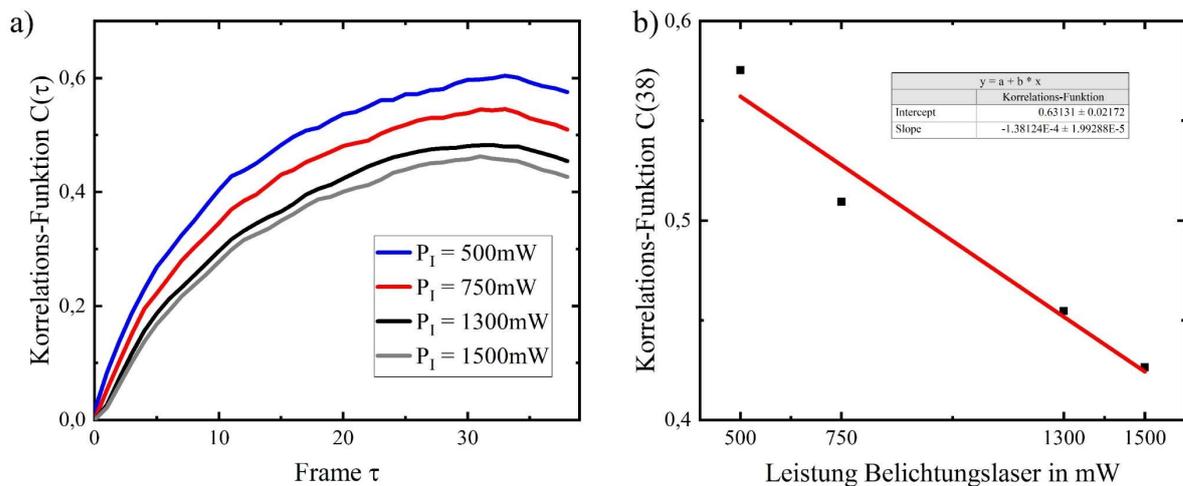


Abbildung 5-22: Änderung der LSP-Messsignale in Abhängigkeit von den gewählten Leistungseinstellungen des Speckle-Lasers: a) über den Frames τ ; b) zum Zeitpunkt $\tau = 39$.

tungsLasers auftritt. Je höher diese Leistung eingestellt wird, desto stärker reduzieren sich deren Werte. Somit muss festgehalten werden, dass die durchschnittliche Intensität im Messbereich einen direkten Einfluss auf das Messergebnis besitzt und eine Nichtberücksichtigung dieses Einflusses zu einer Fehlinterpretation führen kann. Ein Erklärungsansatz für die Reduzierung der Funktionswerte bietet der grundsätzliche Aufbau bzw. die Funktionsweise des LSP-Systems. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der verwendeten Formel (2-4) zur Berechnung der Funktionswerte in Kombination mit der verwendeten Hardware und dabei besonders der genutzten CMOS-Kamera Photron Fastcam Mini AX50. Mittels der erwähnten Formel wird die Dynamik der Speckle-Muster analysiert, also die Intensitätsänderung eines jeden Pixels. Auch wenn für die Versuche lediglich eine Anregung der Oberfläche mit einer Energie vorgenommen wird, bei der kein Auf- oder Umschmelzen eintritt, resultiert dies in einer thermischen Ausdehnung und somit auch in einer lokalen Steigerung der Intensitäten. Weisen jedoch bereits zu viele Pixel im Messbereich Intensitäten nahe der maximal ermittelbaren von $I_{max} = 255$ auf, so ist ihr Potenzial für eine detektierbare Änderung gering. Pixel, die einen geringeren Wert aufweisen, haben ein höheres Potenzial zur Änderung. Ebenso können in stark über- ($I = 255$), aber auch unterbelichteten ($I = 0$) Bereichen Ausdehnungen der Oberfläche nicht mittels LSP-Systems detektiert werden, da keine Änderung der Intensität ermittelt werden kann.

Mit den bis hierhin erlangten Erkenntnissen muss festgehalten werden, dass die Leistung des BelichtungsLasers eine entscheidende Rolle für die Ausprägung des LSP-Signals einnimmt. Um möglichst präzise Signale hervorrufen zu können, muss eine Leistung gewählt werden, mit welcher sichergestellt werden kann, dass möglichst viele Pixel eine Intensität aufweisen, welche Rückschlüsse über die Topografie zulassen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass Bereiche weder zu stark noch zu gering belichtet werden. Innerhalb dieser Versuchsreihen hat sich eine Leistung des BelichtungsLasers von $P_1 = 500\text{mW}$ als zielführend herausgestellt und wird in den folgenden Versuchen genutzt. Jedoch können Effekte wie die Gauß'sche Verteilung der Intensität des BelichtungsLasers oder inkonsistente

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Ausrichtungen des BelichtungsLasers während des Aufbaus des LSP-Messsystems, die das Signal deutlich beeinflussen können, nicht ausgeschlossen werden. Im folgenden Unterabschnitt wird deshalb eine Methode vorgestellt, mit der der Einfluss variierender durchschnittlicher Intensitäten zu Beginn der Messungen verringert werden kann.

5.3.2 Steigerung der Reproduzierbarkeit des Messsystems (Laserleistung Belichtung)

In diesem Unterabschnitt wird ein Ansatz zur Steigerung der Reproduzierbarkeit von LSP-Messungen

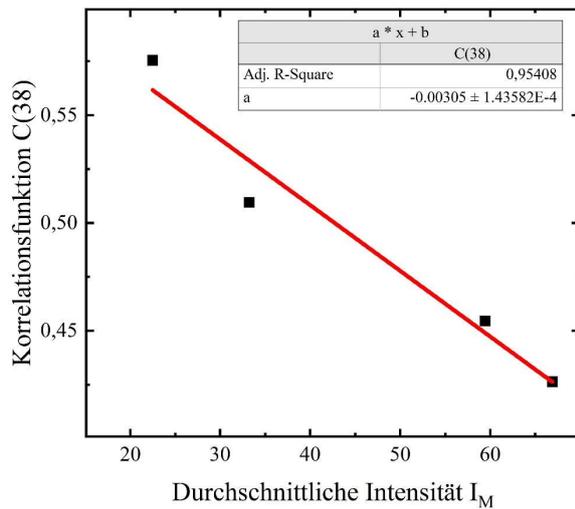


Abbildung 5-23: Abhängigkeit der Beleuchtungsintensität des Messbereiches sowie der Ausprägung des LSP-Signals von der Leistung des Speckle-Lasers.

der durchschnittlichen Intensität I_M , wenn diese übereinander aufgetragen werden, wie in Abbildung 5-23 geschehen. Mit der angewandten linearen Fit-Funktion kann der Verlauf der $C(39)$ mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,954 bestimmt werden.

Eine Normierung der LSP-Datensätze erfolgt aus diesem Grund mit einem linearen Ansatz, wobei die verwendete Gleichung im Folgenden dargestellt ist.

$$C_n(\tau, \Delta I_M) = \Delta I_M * s + C(\tau) \quad (5-5)$$

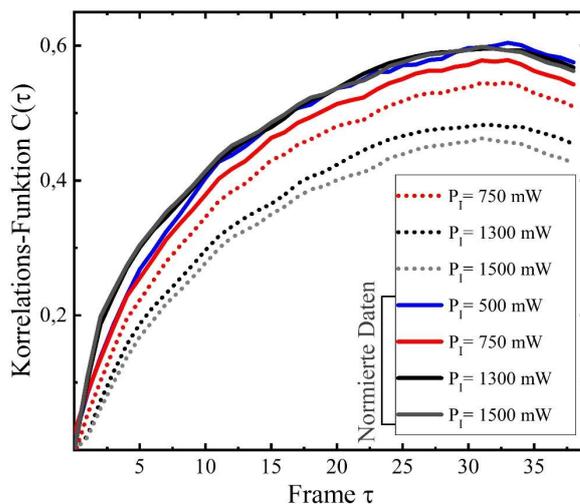
Die Werte der normierten Korrelationsfunktion $C_n(\tau, \Delta I_M)$ resultieren aus einer linearen Angleichung der aus der LSP-Analyse ermittelten Werte $C(\tau)$ mit einem Korrekturfaktor, der sich aus dem Produkt $\Delta I_M * s$ ergibt. Dabei steht ΔI_M für die Differenz zwischen der im ersten Bild ermittelten Intensität $I_M(t_0)$ zu der I_n , auf die das LSP-System normiert werden soll. In diesem Fall ist dies eine von $I_n = 22,49$ bei einer Belichtungsleistung von $P_l = 500 \text{ mW}$. Der Wert für ΔI_M muss somit für die Auswertung einer jeden Messstelle zu Beginn der LSP-Analyse mittels Gleichung (5-6) bestimmt werden.

$$\Delta I_M = I_M(t_0) - I_n \quad (5-6)$$

Weiterhin wird eine für das Material- und Anlagensystem sowie für die Aufbausituation des LSP-Messsystems spezifische Steigung s nach Formel (5-7) bestimmt. Hierzu werden die Ergebnisse genutzt, welche bereits in den vorangegangenen Unterabschnitten beschrieben und in Abbildung 5-23 zusammengefasst sind.

$$s = \frac{y(x_1) - y(x_0)}{x_1 - x_0} = \frac{C(I_{M_1}) - C(I_{M_0})}{I_{M_1} - I_{M_0}} = -0,00337 \quad (5-7)$$

Für den Anwendungsfall geht eine Steigung von $s = -0,00337$ hervor. Zur Prüfung der Qualität dieser Normierung werden die in Abbildung 5-22 a) dargestellten Ergebnisse für unterschiedliche Belichtungsintensitäten normiert. Das Ergebnis dieser Normierung ist in Abbildung 5-24 aufgetragen.



Gepunktet dargestellt sind die Rohdaten der Messungen. Die vollen Linien zeigen die normierten Verläufe des LSP-Messsignals auf. Er-sichtlich wird, dass eine Verbesserung der Messgenauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit unter variierten Eingangsbedingungen hervorgeht. Eine Auswertung der Funktionswerte zum Zeitpunkt $\tau = 39$ ist in Tabelle 5-8 dargestellt. Gegenübergestellt sind die Funktionswerte der Korrelationsfunktion ohne (linke Hälfte) und

Abbildung 5-24: Ergebnis der Normierung von LSP-Messergebnissen durch die Normierungsfunktion $C_n(\tau)$.

mit Normierung. Ohne Anpassung der LSP-Messungen ist die Abweichung der $C(39)$ -Werte mit $\Delta_{\max} C(39) = 0,14$ und einer Standardabweichung von 11,18 % als hoch einzustufen.

Tabelle 5-8: Gegenüberstellung der Messwerte der Korrelationsfunktion, ermittelt mit unterschiedlichen Be-lichtungsintensitäten, vor $C(39)$ und nach Normierung $C_n(39)$ mittels Normierungsfunktion (5-2).

Leistung des Be-lichtungslasers in mW	Ursprünglich			Nach Normierung		
	$C(39)$	$\Delta_{\max} C(39)$	Standardab-weichung σ in %	$C_n(39)$	$\Delta_{\max} C_n(39)$	Standardab-weichung σ in %
500	0,57	0,14	11,18	0,57	0,03	2,19
750	0,51			0,54		
1 300	0,45			0,57		
1 500	0,43			0,56		
Durchschnitt	0,49			0,56		

Durch die Normierung kann eine Reduzierung der maximalen Abweichung zwischen zwei Funktionswerten auf $\Delta_{\max} C_n(39) = 0,03$ und somit der Standardabweichung auf 2,19 % erreicht werden. Festgehalten werden kann, dass der entwickelte Normierungsansatz die Reproduzierbarkeit der LSP-Messung erhöht und somit die Möglichkeit zur Deutung von Ergebnissen verbessert ist. Allerdings werden

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

die Schwankungen der initialen Intensitäten im ROI durch veränderte Aufbausituationen nicht so deutlich ausfallen wie in diesem Unterabschnitt durch Veränderungen der Belichtungsleistung hervorgerufen. Veröffentlicht wurden Teilergebnisse bereits in Elspaß et al. [192].

Alle im Folgenden dargestellten Ergebnisse bzw. Messdaten des LSP-Systems wurden durch eine Normierung mit dem vorgestellten Ansatz ermittelt.

5.3.3 Kalibration des LSP-Systems – Probekörper mit unterschiedlichen Dichten

Nach Inbetriebnahme des LSP-Systems, einige dieser Schritte wurden im Voraus beschrieben, erfolgt die Korrelation des LSP-Signals mit Materialeigenschaften, wobei stochastisch verteilte LoF-Defekte in Probekörpern hervorgerufen werden. Dies geschieht durch Variationen der genutzten Laserleistung für die Fertigung von Probekörpern. Detaillierte Ergebnisse dazu sind in Unterabschnitt 5.1.1 beschrieben.

In dieser Versuchsreihe werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von $d_z = 10 \text{ mm}$ und einer Höhe von $h_z = 10 \text{ mm}$ im PBF-LB/M gefertigt. Die genutzte Laserleistung wird in vier Schritten zu je 30 W von $P_L 195 \text{ W}$ auf bis zu $P_L = 75 \text{ W}$ reduziert, die Methode zur LSP-Messung ist aus Abschnitt 4.3 zu entnehmen. Pro dargestelltem Datenpunkt wurden zehn Messungen in unterschiedlichen Schichten durchgeführt, die erste Messung erfolgte ab Schicht 50. Ausgewertet wird weiterhin der letzte Wert der normalisierten Korrelationsfunktion $C_n(39)$. In Abbildung 5-25 sind diese Werte über der relativen Dichte der Probekörper aufgetragen. Den höchsten Wert erreicht der Kennwert $C_n(39)$ bei der geringsten detektierten relativen Dichte der Probekörper von $90,74 \pm 1,23 \%$ mit $C_n(39) = 0,97 \pm 0,03$.

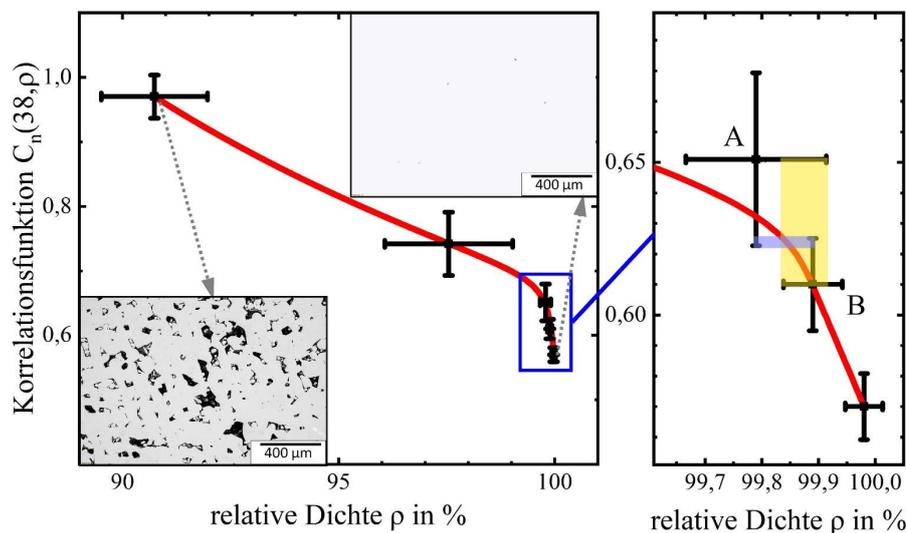


Abbildung 5-25: Resultierende Werte der Korrelationsfunktion für unterschiedlich stark ausgeprägte Dichten der analysierten Probekörper.

Je weiter die relative Dichte des Materials steigt, desto geringer sind die Beträge der Korrelationsfunktion. Bei einer Dichte von $97,55 \pm 1,48 \%$ beträgt $C_n(39) = 0,74 \pm 0,05$. An Probekörpern, welche mit Standardprozessparametern gefertigt wurden, wird die höchste relative Dichte von $99,98 \pm 0,03 \%$ in dieser Versuchsreihe bestimmt, wobei ein $C_n(39) = 0,57 \pm 0,011$ ermittelt werden kann. In ex-

situ-Versuchen mit Dang et al. [189] konnte ein ähnliches Verhalten nachgewiesen werden. Die Werte der Korrelationsfunktion steigen mit zunehmendem Anteil an Defekten an, das Messsignal der Referenzprobe ist, ebenso wie in den dargestellten Ergebnissen, am geringsten und beträgt bei einer Dichte von 99,98 % $C(\tau = \max) = 0,21$. Die Änderung der Speckle-Muster scheint innerhalb dieser Versuchsreihe somit stärker zu sein.

Bei zwei Datenpunkten in Abbildung 5-25, markiert mit A und B, kommt es zu einer Überschneidung der Beträge der Korrelationsfunktion (blau markiert). Hier könnte zunächst davon ausgegangen werden, dass keine Differenzierung zwischen den angewandten Prozessparametern möglich ist. Jedoch liegen auch bei der relativen Dichte Überschneidungen vor (gelber Bereich), die auf lokal ähnliche Dichten zwischen den untersuchten Probekörpern hinweisen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wert der Korrelationsfunktion und der relativen Dichte des Materials kann somit zunächst nachgewiesen werden.

Um die Abhängigkeit der Werte der Korrelationsfunktion von der relativen Dichte für den untersuchten Fall annähern zu können, kann eine rationale Funktion gewählt werden, wie in Formel (5-6) dargestellt.

$$C(39, \rho) = \frac{a + b * \rho}{1 + c * \rho + d * \rho^2} \quad (5-8)$$

Mit: $a = -0,33346$; $b = 0,003333$; $c = -0,02479$; $d = 1,47808E - 4$
 resultiert $R^2 = 0,9949$

Dabei besitzt die gewählte Funktion eine Genauigkeit von $R^2 = 0,9997$. Besonders fällt bei Betrachtung der Daten die hohe Sensitivität des Messsignals ($C(39, \rho)$) in einem Bereich der relativen Dichte $99,8 \% \leq \rho \leq 100 \%$ auf, welche durch den hohen Betrag der Steigung in diesem Bereich abgeleitet werden kann. Insbesondere in Bezug auf die Ergebnisse aus Unterabschnitt 5.1.2, in dem der starke Einfluss geringer Abweichungen der relativen Dichte auf die mechanischen Eigenschaften dargestellt wird, scheint das Potenzial des LSP-Systems zunächst hoch. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass die Messungen während einer, der eigentlichen Belichtung zur Fertigung der Komponenten, folgenden Belichtungsphase stattfinden.

Zurückzuführen ist die Abhängigkeit des Messsignals von der relativen Dichte hauptsächlich auf zwei Aspekte:

1. Die zur LSP-Analyse benötigte Anregung der Oberfläche erfolgt unabhängig von der Materialqualität mit demselben Prozessparametersatz, vgl. Tabelle 4-5. Das reale Materialvolumen wird jedoch in Abhängigkeit von den verwendeten Prozessparametern variiert. Deshalb kann angenommen werden, dass der Temperaturanstieg durch die LSP-Belichtung erhöht ist, sobald der Defektanteil ansteigt. Durch höhere Temperaturgradienten werden stärkere Ausdehnungen der Oberfläche und somit Veränderungen der Speckle-Muster hervorgerufen. Nachgewiesen werden konnte das Phänomen des stärkeren Temperaturanstieges mit Dang et al. [132] in ex-situ-Versuchen. Bei gleichen Messbedingungen konnten Differenzen der Maximaltemperaturen an Probekörpern mit unterschiedlichen Dichten von bis zu 36,15 % ermittelt werden. Ebenso wird durch die verringerte Dichte die lokale Festigkeit eines

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Materialverbundes verändert. Befindet sich unterhalb der Oberfläche ein Defekt, so ist das Potenzial zu einer mehraxialen Ausdehnung deutlich erhöht, die Speckle-Muster erfahren deutlichere Änderungen.

2. Durch die Variation der Laserleistung zur Erzeugung unterschiedlicher Materialqualitäten ändert sich die Schmelzbadgeometrie und somit auch die Oberflächentopografie. Dadurch resultiert auch ein Anstieg der Oberflächenrauheit. Abbildung 5-26 zeigt ausgewählte Frames aus LSP-Daten zweier Probekörper, welche mit jeweils variierten Laserleistungen (für a) 195 W und b) 75 W) gefertigt wurden. Ersichtlich wird der Einfluss der Rauheit auf die Ausprägung der Speckle-Muster. In a) ist die gemessene Rauheit der Probenoberfläche mit $S_a = 12,3 \mu\text{m}$ vergleichsweise gering, die Verteilung der Intensitäten beträgt $I_m = 39,2 \pm 49$. In b) sind deutliche Unterschiede bei der Ausprägung von Speckle-Mustern zu erkennen. Diese werden auch im Mittelwert der Intensität sowie besonders in deren Standardabweichung deutlich: $I_m = 48,4 \pm 75,2$. Zurückzuführen ist dieses Phänomen auf die stärker ausgeprägten Rauheitsspitzen und -täler, die an der rauen Oberfläche von $S_a = 30 \mu\text{m}$ ausgeprägt sind. Durch Anregungen dieser Oberflächen und eine damit verbundene Ausdehnung bzw. Änderung der Topografie können deutlich stärker ausgeprägte Verzerrungen der Speckle-Muster hervorgehen, die in der Korrelationsfunktion wiedergegeben werden.

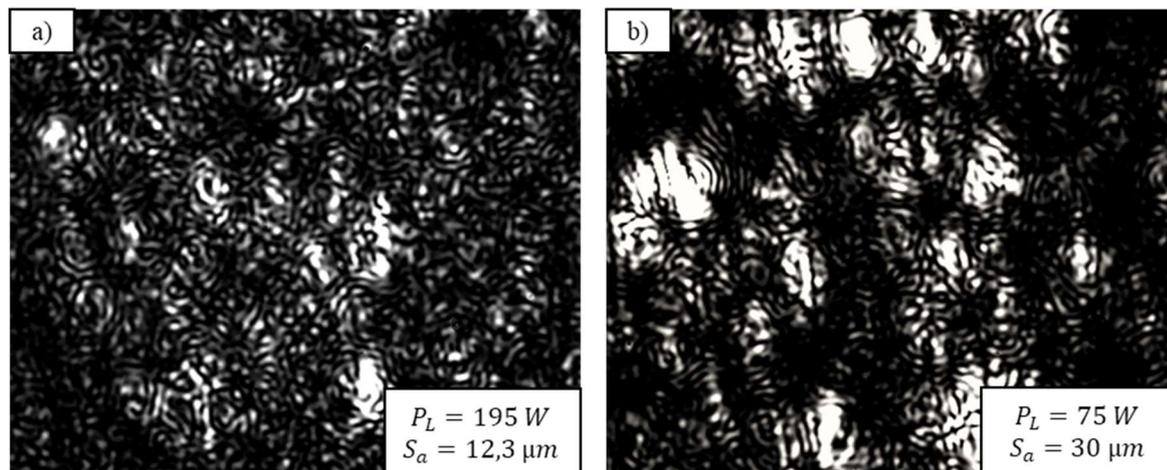


Abbildung 5-26: Frames der auszuwertenden Probenoberfläche in in-situ-LSP-Versuchen, a) relativ glatte Oberfläche, erzeugt mit Standardprozessparametern, und b) relativ raue Oberfläche an einem Probekörper gefertigt mit variierten Laserleistung auf 75 W.

5.3.4 Detektion lokaler Defekte mittels LSP-Systems

Eine Detektion von stochastisch verteilten Defekten mittels LSP-Systems gelingt unter den Umständen, die im vorangegangenen Unterabschnitt beschrieben wurden. Da Ergebnisse aus den Zugversuchen aus Abschnitt 5.1 aufzeigen, dass auch die Position der Defekte einen Einfluss auf mechanische Eigenschaften besitzt, soll die Fähigkeit des LSP-Systems zur Detektion lokaler Defekte untersucht werden. Auch aufgrund der typischen Ursachen von Fehlerausprägungen im PBF-LB/M-Prozess, bei welchem Defekte zumeist nicht im gesamten Bauteil verteilt sind, ist eine lokale Bestimmung von Defekten notwendig. Eine lokale Bestimmung von Defekten würde gleichzeitig auch die Möglichkeit zur Abbildung digitaler Zwillinge schaffen.

Um die Sensitivität des LSP-Messsystems zur Detektion lokaler Defekte in unterschiedlicher Größe und Anzahl ermitteln zu können, muss eine Strategie zur lokalen Erzeugung von Defekten hergeleitet werden. In dieser Arbeit werden Boole'sche Operationen im CAD-Modell durchgeführt, um quaderförmige Hohlräume hervorzurufen. Während der PBF-LB/M-Fertigung werden diese Volumina nicht belichtet, sodass an diesen Stellen Defekte verbleiben, die aufgrund der Oberflächenstruktur der Defektart LoF zugewiesen werden können. Für die Boole'schen Operationen werden quaderförmige Volumen genutzt, deren Grundfläche quadratisch ($a * a$) ist und deren Höhe dem Doppelten der Grundseite ($b = 2 * a$) entspricht, vgl. Abbildung 5-27. Die Kantenlänge a wird in diesen Versuchen zwischen $60 \mu\text{m}$ und $160 \mu\text{m}$ in jeweils $20\text{-}\mu\text{m}$ -Schritten variiert. Zur Bewertung der entstehenden Defekte werden Probekörper gefertigt und die entstehenden Defekte analysiert.

Abbildung 5-27 zeigt zwei beispielhafte Schlichtbilder von Probekörpern, in die Defekte der Variationen DH160 ($a = 160 \mu\text{m}$) und DH120 ($a = 120 \mu\text{m}$) eingebracht sind. In jedem Probekörper wurden 40 Defekte durch Boole'sche Operationen hervorgerufen. Mit roten Linien angezeigt sind die konstruierte Geometrie der Probe sowie die Positionen, an denen die Defekte provoziert wurden. In der oberen Reihe wird die Auswirkung der Defekte auf die Oberflächenstruktur untersucht. Dafür wurde die Position der Defekte in Relation zur Oberfläche variiert. Der erste (linke) Defekt wurde offen zur Oberfläche hervorgerufen, anschließend wurden die Volumina in Schritten einer Schichtdicke nach unten versetzt.

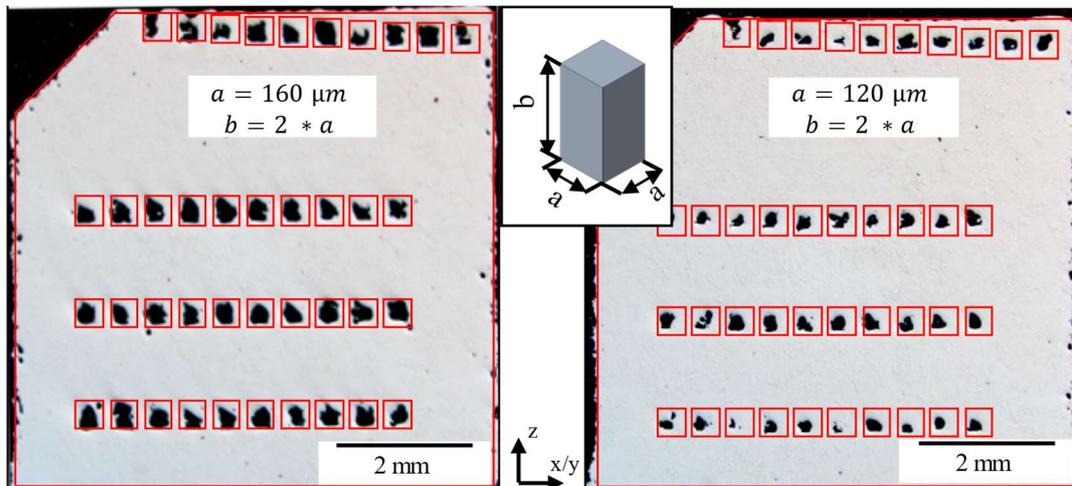


Abbildung 5-27: Ausprägung der Defekte mit quadratischer Grundform während der Fertigung im PBF-LB/M-Prozess für Kantenlänge $a = 160 \mu\text{m}$ und $a = 120 \mu\text{m}$.

Die unteren drei Zeilen, in denen insgesamt 30 Defekte provoziert sind, werden zur Auswertung der Defektausprägung genutzt. Bewertet wird zunächst, ob Defekte auftreten, wenn diese durch Boole'sche Operationen provoziert wurden. Bis zu einer Kantenlänge $a = 80 \mu\text{m}$ liegt der Anteil der Defekte, die entstanden, bei $98,9 \%$. Bei einer Kantenlänge von $a = 60 \mu\text{m}$ sinkt der Wert auf $76,7 \%$. Defekte sind somit nicht reproduzierbar zu fertigen. Da dies eine Anforderung für die LSP-Messungen ist, werden Defekte mit einer minimalen Kantenlänge von $a = 80 \mu\text{m}$ gefertigt.

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Weiterhin wird die Größe der Defekte als Fläche der Defekte in der x/z -Ebene ausgewertet, wozu das in Unterabschnitt 4.2.2 beschriebene Tool verwendet wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Anhang in Abbildung A 3 dargestellt. Ausgewertet sind die theoretischen Größen der Querschnittsfläche, die sich aus einer Multiplikation der Kantenlängen ($A = a * b$) ergibt, sowie die mittels MATLAB-Tools bestimmten Defektflächen. Grundsätzlich abgeleitet wird, dass die ermittelten Flächeninhalte der Defekte in einem Bereich von $100 \mu\text{m} \leq a \leq 160 \mu\text{m}$ nahe der theoretischen Fläche liegen. Die größte Abweichung kann in diesem Bereich bei $a = 160 \mu\text{m}$ mit 8,9 % bestimmt werden. Bei einem Wert von $a = 80 \mu\text{m}$ liegt die gemessene Querschnittsfläche deutlich (-38,04 %) unterhalb der theoretischen Größe. Wie bereits im Voraus beschrieben, ergibt diese Defektart den kleinsten reproduzierbar darstellbaren Defekt. Unterhalb dieser Größe konnte bereits ein Ausheilen der Defekte festgestellt werden. Konkrete Zahlenwerte der Defektflächen sind im Anhang in Tabelle T 5 zusammengefasst. Aus der Fläche der Querschnitte in der x/z -Ebene lassen sich die theoretischen Flächen in der x/y -Ebene bestimmen, da die Grundflächen der Volumina ein Quadrat und die Kantenlängen somit identisch sind. Für die Messung mittels LSP-Messsystem ist dieser Wert ebenso von Bedeutung, da die Messung in der x/y -Ebene erfolgt. In Abbildung 5-28 sind die berechneten Flächen sowie die aus den Schlibbildern abgeleiteten Flächen aufgetragen. Hieraus kann eine theoretische Materialdichte unterhalb der Schicht berechnet werden. Ausgewertet werden in der Folge LSP-Signale an Materialvolumen, in die Defekte der Klasse DH080 ($a = 80 \mu\text{m}$, $A_{xy} = 0,39 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$) und

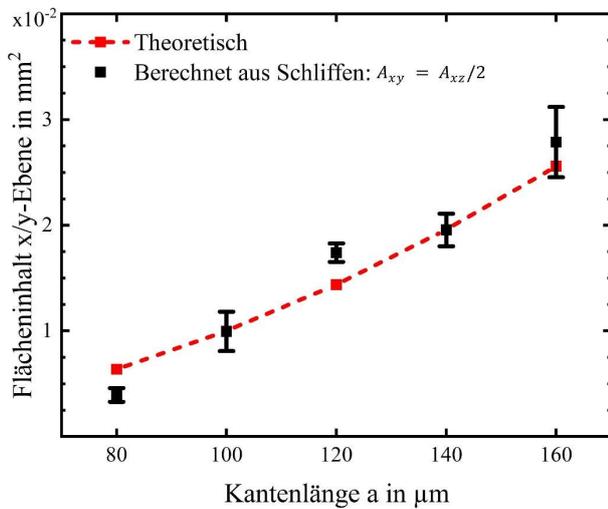


Abbildung 5-28: Querschnittsfläche der Defekte in der x/y -Ebene, abgeleitet von den Ergebnissen, die in der x/z -Ebene ermittelt wurden.

kleinsten reproduzierbar darstellbaren Defekt. Unterhalb dieser Größe konnte bereits ein Ausheilen der Defekte festgestellt werden. Konkrete Zahlenwerte der Defektflächen sind im Anhang in Tabelle T 5 zusammengefasst. Aus der Fläche der Querschnitte in der x/z -Ebene lassen sich die theoretischen Flächen in der x/y -Ebene bestimmen, da die Grundflächen der Volumina ein Quadrat und die Kantenlängen somit identisch sind. Für die Messung mittels LSP-Messsystem ist dieser Wert ebenso von Bedeutung, da die Messung in der x/y -Ebene erfolgt. In Abbildung 5-28 sind die berechneten Flächen sowie die aus den Schlibbildern abgeleiteten Flächen aufgetragen. Hieraus kann eine theoretische Materialdichte unterhalb der Schicht berechnet werden. Ausgewertet werden in der Folge LSP-Signale an Materialvolumen, in die Defekte der Klasse DH080 ($a = 80 \mu\text{m}$, $A_{xy} = 0,39 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$) und

Voraus beschrieben, ergibt diese Defektart den kleinsten reproduzierbar darstellbaren Defekt. Unterhalb dieser Größe konnte bereits ein Ausheilen der Defekte festgestellt werden. Konkrete Zahlenwerte der Defektflächen sind im Anhang in Tabelle T 5 zusammengefasst. Aus der Fläche der Querschnitte in der x/z -Ebene lassen sich die theoretischen Flächen in der x/y -Ebene bestimmen, da die Grundflächen der Volumina ein Quadrat und die Kantenlängen somit identisch sind. Für die Messung mittels LSP-Messsystem ist dieser Wert ebenso von Bedeutung, da die Messung in der x/y -Ebene erfolgt. In Abbildung 5-28 sind die berechneten Flächen sowie die aus den Schlibbildern abgeleiteten Flächen aufgetragen. Hieraus kann eine theoretische Materialdichte unterhalb der Schicht berechnet werden. Ausgewertet werden in der Folge LSP-Signale an Materialvolumen, in die Defekte der Klasse DH080 ($a = 80 \mu\text{m}$, $A_{xy} = 0,39 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$) und

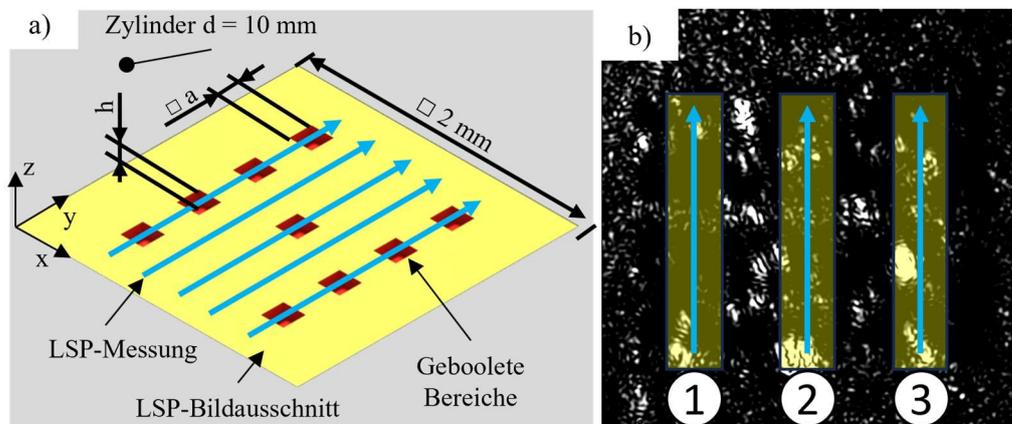


Abbildung 5-29: Schematische Darstellung der gewählten Strategie zur Erzeugung und Auswertung lokal auftretender Defekte. a) LSP-Messbereich mit lokal durch Boole'sche Operationen eingebrachten Defekten. b) Definition der auszuwertenden Bereiche und Scanvektoren innerhalb der LSP-Software.

DH160 ($a = 160 \mu m, A_{xy} = 2,79 \times 10^{-2} mm^2$) eingebracht sind. Eine schematische Darstellung der Defektpositionen und -anzahl ist in Abbildung 5-29 a) gegeben.

Während des PBF-LB/M-Prozesses werden in drei Bereichen, die parallel zur y-Achse ausgerichtet sind, Defekte provoziert: Unter den Auswertebereichen 1 und 3 werden jeweils vier Defekte äquidistant hervorgerufen, unter Bereich 2 lediglich ein einzelner, welcher in der Mitte des Quaders liegt, vgl. Abbildung 5-29 b). Da die Defekte in Bereich 1 und 3 symmetrisch hervorgerufen werden, wird davon ausgegangen, dass die Werte der LSP-Korrelationsfunktion ähnlich sind. Für die drei Auswertebereiche lassen sich in Abhängigkeit von den gewählten Defektgrößen (DH080 und DH160) die in Tabelle 5-9 dargestellten relativen Dichten in der x/y-Ebene unterhalb des Auswertebereiches berechnen. Genutzt wurde dazu die mit dem MATLAB-Tool bestimmte Querschnittsfläche der Defekte in dieser Ebene. Aus den Dichten lassen sich wiederum die erwarteten Werte für $C(39)$ mit Formel (5-8) bestimmen, die Ergebnisse sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Relative Dichten liegen in der x/y-Ebene in einem

Tabelle 5-9: Theoretische Dichten unterhalb der Messbereiche 1, 2 und 3 aus Abbildung 5-29.

Bereich	Berechnete Dichte in der x/y-Ebene nach Abbildung 5-28		Erwartete $C(39)$ nach Formel (5-8)	
	1 und 3	2	1 und 3	2
DH080	96,48 %	99,12 %	0,77	0,68
DH160	75,21 %*	93,80 %	2,93*	0,85

Gesamtfläche je Auswertebereich: $A_{ges} = 0,45 mm^2$

*: Dichte außerhalb des Bereiches, in dem Formel (5-8) hergeleitet wurde, Aussagekraft von $C(39)$ offen.

Bereich zwischen 99,12 % und 75,21 %, die berechneten Werte der Korrelationsfunktion liegen zwischen 0,68 und 2,93. Da die Dichte von 75,21 % deutlich außerhalb des Bereiches liegt, in dem Formel (5-8) kalibriert wurde ($90,72 \% \leq \rho \leq 99,98 \%$), kann die Qualität dieser Vorhersage ($C(39) = 2,93$) im Voraus nicht bewertet werden. Eine Prüfung ist anhand der realen LSP-Messungen notwendig.

In Abbildung 5-30 sind die resultierenden LSP-Messsignale ebenso wie die vorhergesagten Werte für die Defektgrößen DH080 und DH160 über den drei Auswertebereichen aufgetragen. Zusätzlich ist der Wert der Korrelationsfunktion, der an dichtem Material ermittelt wurde, als blaue horizontale Linie mit $C(39) = 0,58$ eingezeichnet. Für die Defekte der Größe DH080 ergeben sich die folgenden Erkenntnisse.

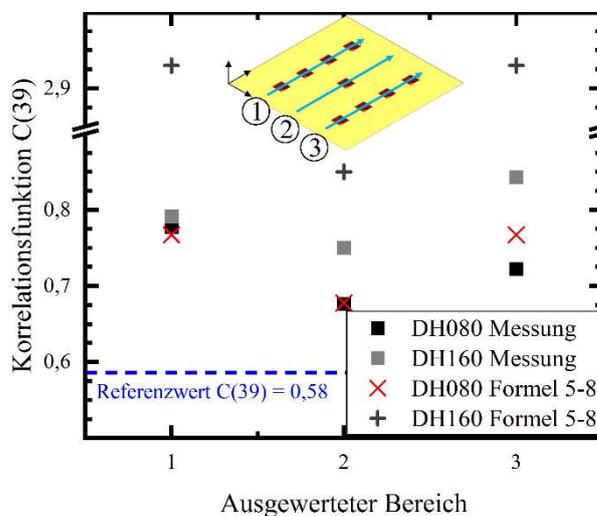


Abbildung 5-30: Vergleich der Messsignale an Proben mit Defekten an lokal definierten Positionen: a) Defektgröße DH080 und b) DH160.

Die Werte der $C(39)$ liegen für jede Messung über dem Referenzwert und deuten darauf hin, dass Defekte im Material vorkommen. Die Messsignale in den Bereichen 1 und 3, in denen vier Defekte eingebracht sind, weisen die höchsten Ausschläge auf ($C_{080_1}(39) = 0,78, C_{080_3}(39) = 0,72$). Zwischen den Messwerten kann eine relative Varianz von -7,69 % ermittelt werden. Beide Werte liegen nahe dem mit Formel (5-8) berechneten Wert von $C(39) = 0,767$. Die Abweichung des berechneten Wertes beträgt für

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Bereich 1 relativ -1,29 % und für Bereich 3 6,23 %. Der Wert der Korrelationsfunktion des zweiten Bereiches beträgt $C_{080,2}(39) = 0,68$, der berechnete Wert beträgt ebenso 0,677. Bei der Vorhersage dieses Wertes gibt es somit keine Abweichung. Die Vorhersage der $C(39)$ -Werte anhand Formel (5-8) kann zunächst als präzise beschrieben werden. Alle Werte, ebenso wie die Abweichungen zwischen den erwarteten und den gemessenen Werten der LSP-Messungen, sind nochmals in Tabelle T 4 im Anhang gegenübergestellt. Ein vergleichbarer Trend ist bei den Messsignalen der Defektklasse DH160 ersichtlich.

Das Messsignal weist immer auf Defekte in den Auswertebereichen hin, da dieses den Wert der Korrelationsfunktion von defektfreiem Material ($C(39) = 0,58$) übersteigt. Der Wert im Auswertungsbereich 2 ($C_{160,2}(39) = 0,75$) liegt unterhalb der Werte in den Bereichen 1 und 3 ($C_{160,1}(39) = 0,79$, $C_{160,3}(39) = 0,84$). Die Abweichung zwischen Bereich 1 und 3 für die Defektausprägung DH160 beträgt -5,95 %. Ein Vergleich der gemessenen mit den vorhergesagten LSP-Werten zeigt für diese Defektklasse signifikante Abweichungen von mindestens 13,33 % im Auswertebereich 2 bis zu 269,99 % in Bereich 3 auf.

Wie bereits im Voraus beschrieben, wurde Formel (5-8) lediglich für relative Dichten größer 90,72 % kalibriert, von einer Abweichung wurde bereits zu Beginn ausgegangen. Ableiten lässt sich von den Ergebnissen, dass eine Vorhersage unterhalb dieser Dichte nicht sinnvoll erscheint. Die Abweichung in Bereich 2 von 13,33 % kann durch die hohe Varianz der Querschnittsflächen in der x/y-Ebene von $\pm 11,91$ % bei der Defektgröße DH160 begründet werden, siehe Abbildung 5-28.

Um die vorgestellten Ergebnisse besser deuten zu können, wurden die Probekörper nach der Fertigung und den dabei erfolgten in-situ-Messungen mittels mCT-Verfahren (Beschreibung in Unterabschnitt 4.2.3) analysiert, um die Ausprägung der Defekte direkt mit dem Messsignal korrelieren zu können. Untersucht wurde, ob alle Defekte aufgetreten sind, ebenso wie das Volumen der Defekte. In Abbildung 5-31 sind die ermittelten Defektvolumen aufgetragen, die aus Boole'schen Operationen mit Quadern

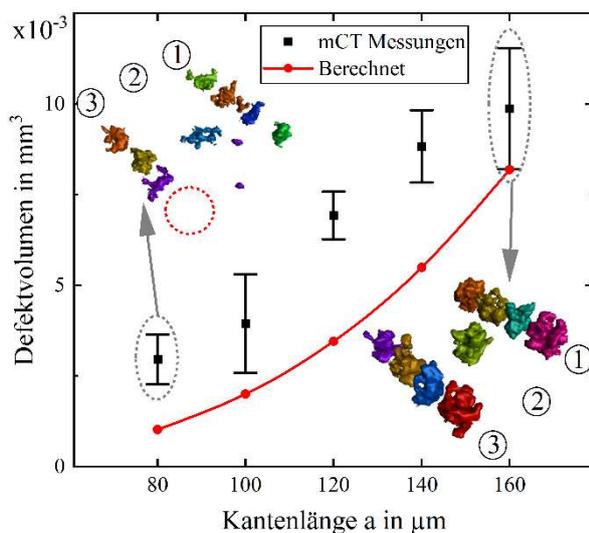


Abbildung 5-31: Reale Ausprägung der Defekte, die mittels LSP-Methode vermessen wurden, ermittelt mit dem mCT-Verfahren.

resultieren, deren quadratische Grundfläche zwischen 80 µm und 160 µm lang ist. Für die Defektklasse DH080 und DH160 sind zusätzlich die visuellen Auswertungen der Defekte eingefügt. Ersichtlich wird an den ermittelten Volumen, dass diese größer sind als das vorausgesagte Volumen. Ebenso wird anhand der mCT-Daten deutlich, dass einer der Defekte, die in Bereich 3 der Defektgröße DH080 provoziert werden sollten, nicht aufgetreten ist, markiert ist diese Position in der Abbildung durch einen rot gestrichelten Kreis. Erfolgt eine Neuberechnung des Korrelationswertes anhand

dieser Erkenntnis, so würde dieser $C(39) = 0,74$ betragen. Im Vergleich zum detektierten LSP-Wert, der ermittelt wurde ($C(39) = 0,72$), beträgt die Abweichung 2,5 %. Die Genauigkeit, die mit Formel (5-8) erreicht werden kann, kann für die Ermittlung von kleinen Defekten der Größe DH080 als hoch eingestuft werden. Die Defekte der Größe DH160 sind alle in den vorhergesehenen Bereichen hervorgerufen worden. Wie bereits im Voraus beschrieben und in Abbildung 5-28 ersichtlich, ist die Standardabweichung der Defektvolumen hoch.

Diese beträgt bei der Defektgröße DH160 16,9 %. Das Volumen des Defektes, der in Bereich 2 hervorgerufen wird, beträgt $V_2 = 0,0101 \text{ mm}^3$ – ausgewertet aus den mCT-Daten. Die Abweichung zum durchschnittlichen Volumen der Defekte ($V_m = 0,00986 \text{ mm}^3$) beträgt 2,43 %. Die deutliche Abweichung des LSP-Messsignals vom erwarteten Wert kann somit nicht durch eine Varianz der Defektgröße während der Fertigung abgeleitet werden. Eine erneute Betrachtung der Strategie zur Erzeugung der Defekte, veranschaulicht in Abbildung 5-32 a), sowie der daraus entstehenden Defekte in b) scheint nötig. Die Defekte, hervorgerufen durch Boole'sche Operationen, werden mittels LSP-Systems analysiert,

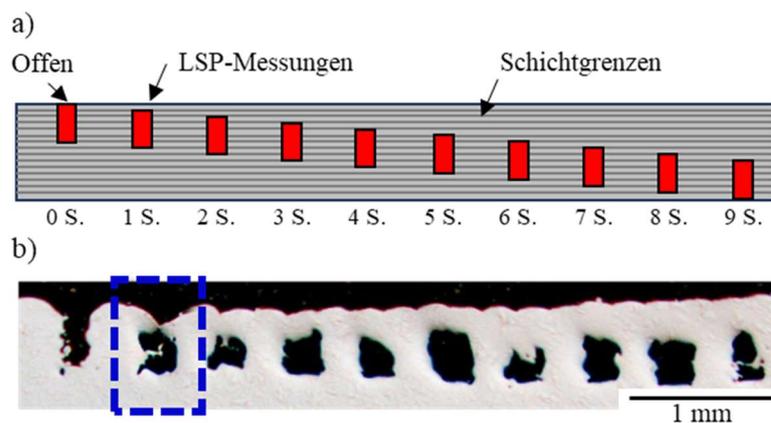


Abbildung 5-32: a) Schematische Darstellung der Erzeugung von Defekten nahe der Oberfläche unter Angabe der Anzahl an Schichten, die über dem Defekt gefertigt werden; b) Resultat der Einbringung von Defekten in Probekörpern.

nachdem eine Schicht von Vollmaterial aufgeschmolzen worden ist. Obwohl eine eindeutige Charakterisierung der Defekte in dieser Schicht nicht durchgeführt wurde, wird bereits in Abbildung 5-32 b) die Auswirkung des Defektes auf die Oberflächenstruktur ersichtlich. Besonders bei Defekten der Größe DH160 fallen in den Schlibfbildern deutliche Einflüsse auf die Oberflächentopografie auf. In LSP-Messungen können an diesen Stellen Über-, aber auch Unterbelichtungen auftreten, die eine Auswertung der Speckle-Musteränderungen erschweren. Resultieren würde folglich eine Reduzierung des Messsignals, die auch in dieser Versuchsreihe, zumindest an Bereich 2 der Defektgröße DH160, bestimmt werden konnte. Die vermutete Beeinträchtigung der Intensitäten konnte in den LSP-Videos detektiert werden. Weiterführende Versuche und Anpassungen des LSP-Systems zur Reduktion des Einflusses der Oberflächentopografie wurden innerhalb des Projektes nicht durchgeführt. Einen möglichen Ansatzpunkt zur Optimierung des Messsystems stellt jedoch eine Optimierung der Position der Speckle-Kamera sowie des Lasers dar, die idealerweise orthogonal zur Oberfläche ausgerichtet sein müssten, um die Oberfläche der Proben unabhängig vom Einfallswinkel belichten zu können, vgl. Abbildung 2-9. Andererseits wären Untersuchungen der Einflüsse von Defekten nach einer höheren Anzahl an gefertigten Schichten denkbar, um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit zu minimieren.

siert, nachdem eine Schicht von Vollmaterial aufgeschmolzen worden ist. Obwohl eine eindeutige Charakterisierung der Defekte in dieser Schicht nicht durchgeführt wurde, wird bereits in Abbildung 5-32 b) die Auswirkung des Defektes auf die Oberflächenstruktur ersichtlich. Besonders bei Defekten der Größe DH160 fallen in

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Die Ergebnisse in diesem Unterabschnitt zeigen, dass die Ermittlung kleinerer Defekte (DH080) mit einer deutlich höheren Genauigkeit vorhergesagt werden kann als die größerer Defekte (DH160). Im Voraus kann für die Defekte DH080 mittels Formel (5-8) in Abhängigkeit von der relativen Dichte in der x/y-Ebene ein Wert der Korrelationsfunktion ($C(39)$) bestimmt werden. Für unterschiedliche Defektausprägungen des Defektes DH080 kann die maximale Abweichung der prognostizierten Werte von den real ermittelten mit 2,49 % bestimmt werden, siehe Tabelle T 4 im Anhang. Vorhersagen der $C(39)$ zu Defekten mit einer Größe von DH160 weichen deutlich stärker und bis zu 269,99 % vom gemessenen Wert ab. Zurückgeführt wird diese Beobachtung auf die vorgenommene Kalibrierung von Formel (5-8), die in einem Bereich der relativen Dichte von über 90,72 % durchgeführt wurde. Die theoretische Dichte der ausgewerteten Bereiche wird jedoch auf bis zu 75,21 % reduziert. Ein Einsatz der Funktion zur Bestimmung von $C(39)$ -Werten außerhalb des Kalibrierungsbereiches sollte deshalb vermieden werden. Einzelne Defekte der Größe DH160 können hingegen genauer detektiert werden, da die relative Dichte im Messbereich 93,80 % beträgt. Trotzdem ist eine Abweichung der LSP-Messung von 13,33 % ermittelt worden, diese ist auf hohe Abweichungen der Defektgrößen, jedoch auch auf den Einfluss des Defektes auf die Oberflächentopografie zurückzuführen, da diese wiederum das LSP-Signal beeinflusst. Obwohl eine Klassifizierung der Defekte nicht möglich ist, würden die Werte der Korrelationsfunktion in jedem der drei Auswertebereiche auf Defekte hinweisen und eine Bewertung im Nachgang möglich machen.

Ogleich das LSP-System weiterhin als potent für die Analyse von Defekten im PBF-LB/M-Prozess beschrieben werden kann, ist bislang keine Analyse der Positionen von Defekten möglich. Da diese jedoch auch einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte von Bauteilen besitzen, wird im nächsten Unterabschnitt eine Methode vorgestellt, anhand derer die Position bestimmt werden kann.

5.3.5 Bestimmung der Position von Defekten

Wie in Unterabschnitt 5.1.2 dargestellt wurde, beeinflussen die Größe und Anzahl von Defekten die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen deutlich. Die Fähigkeit des LSP-Systems zur Detektion von Defekten unterhalb eines Scanvektors konnte im vorangegangenen Unterabschnitt bestimmt werden. Nicht untersucht ist bislang die Fähigkeit des LSP-Systems zur Detektion der Position oder der Anzahl von Defekten. Ein Ansatz zur Bestimmung wird in diesem Unterabschnitt vorgestellt. Dabei werden die Daten genutzt, die an Defekten der Größe DH080 aufgenommen wurden, da die Deutbarkeit der Ergebnisse im vorherigen Unterabschnitt deutlich besser gegeben war.

Grundlage der Untersuchungen stellen die Daten dar, die bereits im vorausgegangenen Unterabschnitt genutzt wurden. Da die LSP-Software keine Funktion beinhaltet, mit der eine Bestimmung der Position oder Anzahl von Defekten durchgeführt werden könnte, erfolgt eine manuelle Anpassung der Auswertebereiche in Größe und Anzahl. Die Auswertebereiche, deren Länge in den bisherigen Versuchsreihen jeweils der Länge eines Scanvektors entsprachen, werden nun in n_i einzelne Bereiche eingeteilt, siehe Abbildung 5-33. Dabei gilt theoretisch: Je höher die Anzahl n_i der Bereiche gewählt wird, desto stärker kann die räumliche Auflösung des Messsystems beeinflusst werden. Gleichzeitig reduziert sich dabei

jedoch die Anzahl der auszuwertenden Pixel, gleichbedeutend mit der Menge an Daten. Dadurch kann eine starke Beeinflussung des Messergebnisses durch Irregularitäten auf der Oberfläche, wie über- ($I = 255$) oder unterbelichtete ($I = 0$) Bereiche, hervorgehen. Zusätzlich zur Verringerung der Datenmenge auf Grundlage der reduzierten Pixelmenge wird ebenso die Anzahl auswertbarer Bilder des Videos reduziert. Zurückzuführen ist dies darauf, dass die Zeitspanne, in der der Laser erst- und letztmalig Material im ROI belichtet, reduziert wird.

Um dennoch möglichst große Datenmengen auswerten zu können, wurden sieben Auswertebereiche entlang eines Scanvektors definiert, siehe Abbildung 5-33. Die Benennung erfolgt anhand der y-Position der Auswertebereiche (1 bis 7). Äquivalent zu Unterabschnitt 5.3.4 werden drei Bereiche, markiert durch schwarze (1), graue (2) oder rote (3) Quadrate, ausgewertet. Bereich 1 (schwarz) und 3 (rot) sind identisch aufgebaut, sodass an ungeraden y-Positionen Material untersucht wird, unterhalb dessen ein Defekt auftritt. An geraden y-Positionen hingegen befindet sich Vollmaterial. Die Werte des Messsignals werden also alternierend erwartet.

In Bereich 2 (grau) ist lediglich ein Defekt in der Mitte (y-Position 4) eingebracht. Unterhalb der restlichen Auswertebereiche wurde Vollmaterial gefertigt. Grundsätzlich kann bei y-Position 4 eine Symmetrie der Auswertebereiche entlang der x-Achse abgeleitet werden.

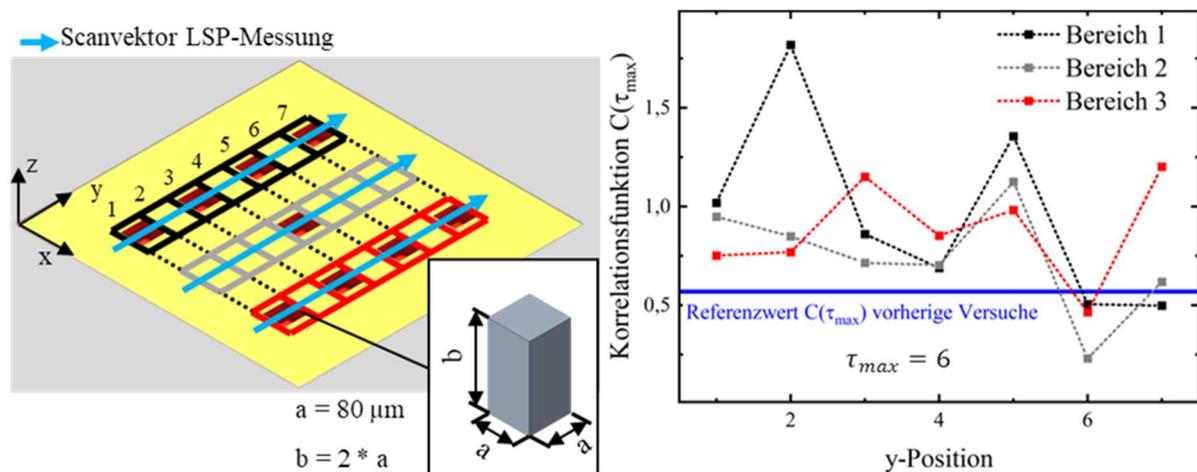


Abbildung 5-33: Schematische Darstellung der Auswertemethodik zur Detektion der Position von Defekten. a) ausgewählter Messbereich mit einem Defekt in der Mitte des Scanvektors. b) Unterteilung der Auswertebereiche entlang des Scanvektors zur Anregung der Speckle-Muster.

Der Abstand von 3 und 5 sowie 2 und 6 oder 1 und 7 zum Defekt ist jeweils identisch. Angenommen wird, dass diese geometrische Symmetrie auch in den Werten der Korrelationsfunktion ersichtlich wird. In der rechten Hälfte von Abbildung 5-33 sind die Ergebnisse der Korrelationsfunktion $C(\tau_{\max})$ in Abhängigkeit vom Messbereich sowie von der y-Position aufgetragen. Die Anzahl an Bildern, die je Auswertebereich analysiert wurden, beträgt $\tau_{\max} = 6$. Ebenso ist der Referenzwert der Korrelationsfunktion aus Unterabschnitt 5.3.3 als blaue horizontale Linie dargestellt. Ersichtlich wird bereits zu Beginn, dass die ermittelten Kennwerte nahezu alle oberhalb dieses Wertes liegen. Dies ist auf die stärkere Auswirkung von Intensitätsänderungen einzelner Pixel auf das Messergebnis zurückzuführen, da die Datenmenge reduziert wurde. Ein direkter Vergleich mit dem Referenzwert ist somit nicht möglich, weshalb

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

der globale Verlauf der Datenpunkte betrachtet wird. In Bereich 2 liegt der Wert der Korrelationsfunktion an y-Position 1 (defektfreies Material) bei $C(\tau_{max}) = 0,95$. Je weiter der Auswertebereich zum Defekt verschoben wird (y-Position 2 und 3), desto geringer wird das Messsignal und es erreicht einen Tiefpunkt bei y-Position 4 mit $C(\tau_{max}) = 0,70$. Das Auftreten eines Defektes ist vom Verlauf der Messsignale an Position 4 nicht abzuleiten. Im nächsten Auswertebereich (5) steigt das Messsignal auf $C(\tau_{max}) = 1,13$ an. Dies ist ein Ausschlag, der auf eine Änderung der Materialeigenschaften schließen lassen könnte. An der 6. Position sinkt das Messsignal deutlich und fällt auf $C(\tau_{max}) = 0,23$, worauf ein erneuter Anstieg auf $C(\tau_{max}) = 0,62$ folgt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die angenommene Symmetrie der Korrelationswerte nicht eintritt. Ebenso schwanken die Werte, die an defektfreiem Material gemessen werden, deutlich, von $C(\tau_{max}) = 0,23$ bis $C(\tau_{max}) = 1,13$ und somit um bis zu 79,65 %. Für Bereich 2 bleibt festzuhalten, dass eine Fehldetektion eines Defektes an Position 5 sowie eine fehlerhafte Nichtdetektion in Bereich 4 vorliegen.

Für die Bereiche 1 und 3 zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Zu Beginn der Auswertung wurde davon ausgegangen, dass in ungeraden Auswertebereichen höhere Werte der Korrelationsfunktion zu erwarten sind als in geraden, da in diesen Bereichen Defekte unterhalb der Oberfläche auftreten. Der Verlauf der Daten wurde alternierend erwartet. In Bereich 1 lassen die Ausreißer in positive Richtung der Korrelationsfunktion an Position 2 ($C(\tau_{max}) = 1,82$) und 5 ($C(\tau_{max}) = 1,36$) auf Defekte schließen. An Position 2 liegt dabei eine Fehldetektion vor, bei 5 eine korrekte Detektion. In Bereich 3 kann anhand des Verlaufes der Werte von $C(\tau_{max})$ darauf geschlossen werden, dass Defekte an Position 3 ($C(\tau_{max}) = 1,15$), 5 ($C(\tau_{max}) = 0,98$) und 7 ($C(\tau_{max}) = 1,20$) auftreten, da hier drei lokale Maxima vorliegen. In allen Fällen liegt unterhalb der Auswertebereiche ein Defekt.

Insgesamt können die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden. Die Detektion von Defekten, die mit einer Größe von DH080 gefertigt wurden, gelang durch die Betrachtung des globalen Verlaufes der $C(6)$ -Werte in 4 von 9 Fällen oder in 44,44 % der Fälle. Die Fehlerquote beläuft sich somit auf 55,56 %, wozu noch zwei falsche Detektionen von Defekten kommen. Insgesamt ergibt sich, dass die Werte des LSP-Systems lediglich in 4 von 11 Fällen korrekt gedeutet werden können (36,36 %). Die Fähigkeit des LSP-Systems, die Position oder Anzahl von Defekten zu bestimmen, ist in der aktuellen Ausführung (lokale und zeitliche Auflösung) sowie mit der angewandten Messmethode als ungenügend einzuschätzen.

5.3.6 Korrelation der LSP-Daten mit mechanischen Eigenschaften

Anhand der bis hierhin vorgestellten Ergebnisse kann aufgezeigt werden, dass Defekte die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen teilweise drastisch reduzieren. Dabei wurde der Einfluss von Anzahl, Größe und Position untersucht, wobei sich die Position der Defekte als ein hervorzuhebender Faktor für die mechanischen Eigenschaften darstellt. Da der Entwicklungsstand des LSP-Systems bis zum Tage der Einreichung dieser Arbeit nicht mit ausreichender Güte die Bestimmung der Position und Größe von Defekten gestattet, ist eine Korrelation in dieser Hinsicht nicht möglich.

Der vorgestellte Ansatz zur Korrelation der Korrelationswerte mit mechanischen Eigenschaften bezieht sich somit lediglich auf die Auswertung stochastisch verteilter Defekte im gesamten Bauteilvolumen, die in dieser Arbeit aus einer Variation der Laserleistung hervorgehen, siehe Unterabschnitt 5.1.2 und 5.3.3. In einem ersten Schritt wird in Anlehnung an Formel (5-8) eine Fit-Funktion abgeleitet, durch welche die relative Dichte in Abhängigkeit vom LSP-Messsignal C (39), folgend vereinfacht dargestellt als ρ , C bezeichnet, bestimmt werden kann:

$$\rho(C) = \frac{a + b * C}{1 + c * C + d * C^2} \quad (5-9)$$

Mit: $a = -5\,230,211$; $b = 28\,179,821$; $c = 100,891$; $d = 155,055$
 resultiert $R^2 = 0,9943$

Das Bestimmtheitsmaß beträgt für diesen Zusammenhang $R^2 = 0,9943$. Durch ein Einsetzen von Formel (5-9) in Formel (5-1) ergibt sich beispielhaft für die maximale Zugfestigkeit dargestellt:

$$K(C) = e * f \frac{a+b*C}{1+c*C+d*C^2} + g \quad (5-10)$$

Mit: $e = 7,41616 \times 10^{-8}$; $f = 1,25755$; $g = 245,36288$; a bis d unter Formel 5-9
 resultiert $R^2 = 0,9943$

Formel (5-9) wurde für die Kennwerte der maximalen Zugfestigkeit sowie der Bruchdehnung hergeleitet. Die mechanischen Eigenschaften, die in Abhängigkeit vom Wert der Korrelationsfunktion bestimmt werden können, sind in Abbildung 5-34 dargestellt. Die vorgenommene mathematische Beschreibung basiert bislang auf den Medianwerten, die in den vorangegangenen Unterabschnitten beschrieben wurden. Nicht berücksichtigt sind deshalb bisher die hohen Standardabweichungen der mechanischen Ei-

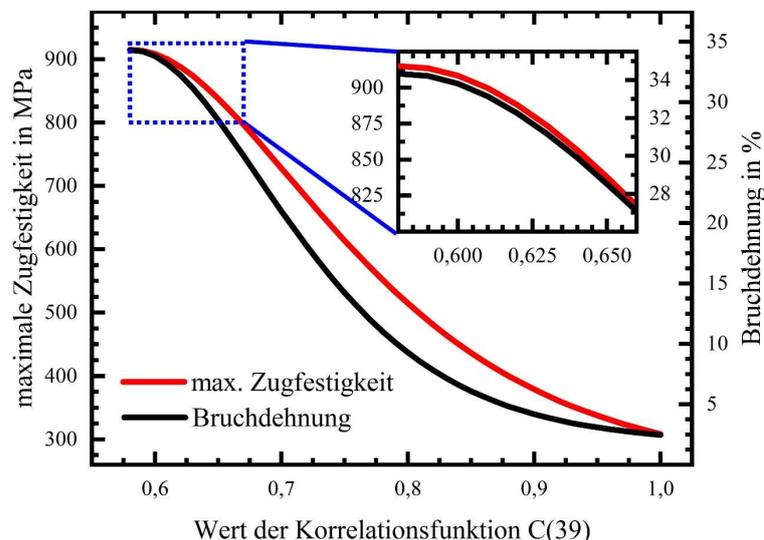


Abbildung 5-34: Zusammenhang der mechanischen Kennwerte 1. Maximale Zugfestigkeit und 2. Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Korrelationsfunktion.

nicht mehr einsatzfähig eingestuft werden und somit als Ausschuss gelten. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, muss weiterhin bedacht werden, dass die mechanischen Eigenschaften, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wurden, häufig in Laborversuchen mit streng regulierten Rahmenbedingungen ermittelt wurden. Bei Zugversuchen wurde beispielsweise eine konstante

Eigenschaften, die bei relativen Dichten zwischen 99,82 % und 97,55 % hervorgehen, vgl. Abbildung 5-5. Schlussendlich kann jedoch anhand der Funktion ein Grenzwert der $C(39)$ definiert werden, ab dem Post-Prozess-Analysen, durch beispielsweise mCT-Untersuchungen, durchgeführt werden müssen, um die Einsatzfähigkeit zu bestätigen. Ebenso können Werte definiert werden, ab denen Probekörper als

5.3 In-situ-Monitoring mittels Laser-Speckle-Photometrie

Traversengeschwindigkeit genutzt und der definierte Probekörper lediglich in axialer Richtung, also eindimensional, belastet. Auf variierende Anwendungsfälle lassen sich die Ergebnisse somit nicht direkt übertragen.

Besonders wenn Wandstärken verringert oder Probekörper ohne Nachbehandlung der Oberfläche „as-built“ eingesetzt werden, können mechanische Kennwerte deutlich abweichen [193]. Vor allem der beschriebene Fall, dass Defekte, die in der Mitte von Probekörpern auftreten, einen geringeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen, ist nicht mehr anwendbar, wenn der Abstand zur Oberfläche durch Anpassungen des Durchmessers verringert wird.

Zusammengefasst kann durch die LSP-Methode bislang eine Korrelation zwischen mechanischen Eigenschaften und den LSP-Werten für Material hergestellt werden, in welchem stochastisch verteilte Defekte in engen Grenzen hinsichtlich Verteilungen und Größe auftreten. Eine Übertragung auf weitere Eigenschaften, wie beispielsweise Härte oder Dauerfestigkeit, ist denkbar. Besonders für den Einsatz an realen Bauteilen bzw. Endprodukten ist eine Übertragbarkeit jedoch nicht gegeben, da Belastungszustände des Materials variieren können. Eine Detektion der Defekte in Position und Größe würde jedoch eine Möglichkeit bieten, digitale Zwillinge zu erzeugen, anhand derer Simulationen zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften vorgenommen werden können. Ansätze basierend auf mCT-Analysen sind dazu in der Literatur bereits diskutiert, werden hier jedoch nicht weiter ausgeführt [194–196].

5.3.7 Zwischenfazit – LSP-Messsystem

Im Rahmen der Arbeiten konnte das LSP-System erfolgreich in den PBF-LB/M-Prozess einer EOS M270 Anlage zur in-situ-Detektion von Defekten integriert werden. Die LP-Messung des gefertigten Materials wird aufgrund des Einflusses von Prozessprodukten wie Schmauch, herumfliegenden Partikeln oder Spratzern nach der ersten Belichtung zum Umschmelzen des pulverförmigen Grundmaterials durchgeführt. Mit dem LSP-System wurde die Ausprägung unterschiedlicher Defektarten untersucht, die stochastisch oder lokal verteilt sind. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

1. Messungen mit der LSP sind stark von den Ausgangsbedingungen der Messung abhängig, wie in dem in Unterabschnitt 5.3.1 beschriebenen Fall von der Ausleuchtung des Bildbereiches. Durch die entwickelte Methode zur Normierung der LSP-Messungen konnte die Streuung des Messsignals reduziert werden. Betrug die Abweichung des Messwertes am Referenzmaterial ursprünglich noch bis zu 11,2 %, so konnte diese durch die Normierung auf 2,19 % reduziert und die Reproduzierbarkeit der LSP-Messung somit um 80,45 % gesteigert werden.

2. Die Korrelation des LSP-Signals und stochastisch verteilter Defekte wurde in einem Bildbereich mit der Kantenlänge von 2 mm x 2 mm durchgeführt. Die relative Dichte wurde in diesem Bereich zwischen 99,98 % und 90,57 % variiert. Der Wert des LSP-Signals steigt mit sinkender Dichte von $C(39) = 0,57$ bei 99,98 % relativer Dichte auf $C(39) = 0,97$ bei 90,57 %. Zurückgeführt werden

kann dieses Verhalten auf die sinkende Steifigkeit des Materials sowie die erhöhte Oberflächenrauheit der Probekörper. Bei hohen relativen Dichten ist das LSP-Signal deutlich sensitiver als in Bereichen geringer relativer Dichten (90,57 %). Die Ergebnisse dazu sind in Unterabschnitt 5.3.3 beschrieben. Die Dichte kann durch eine rationale Funktion vom Messsignal hergeleitet werden.

3. Für die Untersuchungen konnten Defekte lokal durch Boole'sche Operationen hervorgerufen werden, siehe Unterabschnitt 5.3.4. Die kleinsten reproduzierbar hervorrufbaren Defekte (DH080) weisen eine Fläche von $A_{xy} = 3\,964\ \mu\text{m}^2$ in der x/y-Ebene bzw. eine Kantenlänge von ca. $a_{xy} = 62,45\ \mu\text{m}$ auf. Eine Untersuchung lokaler Defekte zeigt, dass selbst diese Defekte bestimmt werden können, wenn sie unterhalb des ausgewerteten Scanvektors liegen. Dabei ist eine Vorhersage des LSP-Signals möglich, wenn die relative Dichte, die sich im Auswertebereich durch das Einbringen der Defekte ergibt, in die Formel (5-8) eingesetzt wird, die in Unterabschnitt 5.3.3 hergeleitet wurde. Für Defekte der Größe DH080 ergeben sich Abweichungen des vorhergesagten zum detektierten Messwert von maximal 2,5 %. Auch größere Defekte können anhand des LSP-Signals detektiert werden. In der Arbeit wurden Defekte mit einer maximalen Größe von DH160 untersucht, wobei die Defektfläche $A_{xy} = 27\,881\ \mu\text{m}^2$ beträgt, woraus sich eine Kantenlänge von $a_{xy} = 166,97\ \mu\text{m}$ ergibt. Vom LSP-Signal lässt sich auch bei diesen Defekten ableiten, dass Defekte auftreten. Eine Vorhersage der Messwerte gelingt jedoch nicht, Abweichungen zwischen 13,33 % bis zu 269,99 % resultieren. Zurückgeführt wird dies auf die relative Dichte im Auswertebereich, die sich durch die Einbringung der Defekte ergibt. Diese liegt weit außerhalb der Dichte, die zur Kalibration der Funktion genutzt wurde. Zusätzlich hat die Oberflächentopografie, die durch größere Defekte stärker beeinflusst wird, einen Anteil daran, dass das LSP-Signal nicht so stark ansteigt wie angenommen. Mit dem Verfahren kann bislang nur die Position der Defekte entlang eines Scanvektors bestimmt werden, also in einer Dimension (x- bzw. y-Richtung).

4. Eine reproduzierbare Bestimmung der Position von Defekten in x- und y-Richtung der Größe DH080 gelingt nicht. Vorgestellt werden die Untersuchungen dazu in Unterabschnitt 5.3.5. Es kann aufgezeigt werden, dass von 9 eingebrachten Defekten lediglich 4 korrekt detektiert werden können, 5 Defekte hingegen nicht. Zusätzlich erfolgt eine falsche Detektion von Defekten in zwei Auswertebereichen. Eine korrekte Auswertung des LSP-Signals ist somit in 7 von 11 Fällen nicht möglich, was einen Fehleranteil von 63,63 % ergibt. Zurückzuführen ist der hohe Fehleranteil auf die Verkleinerung der Auswertebereiche in deren Ausprägung in x- und y-Richtung. Damit einher geht die Reduktion der auswertbaren Daten, da weniger Pixel und Frames der Videos ausgewertet werden können. Die Menge der Daten, die im Vergleich zur Auswertung eines Scanvektors genutzt wurde, beträgt lediglich 2,2 %. Die räumliche und zeitliche Auflösung der verwendeten Hardware wird für die lokale Auflösung als unzureichend definiert. Eine Anpassung der Hardware wäre zwingend erforderlich, wurde im Rahmen der Forschungsprojekte jedoch nicht mehr durchgeführt.

5. Eine Detektion von Defektgrößen und deren Positionen ist mit dem LSP-System nicht möglich. Deswegen kann lediglich eine Korrelation von mechanischen Eigenschaften und dem LSP-Signal für den

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

Fall stochastisch verteilter Defekte in einem Materialvolumen durchgeführt werden. Mit der Vorhersage können Werte des LSP-Signals definiert werden, ab welchen gesonderte Untersuchungen der Bauteile notwendig sind oder diese als Ausschuss definiert werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen allesamt das Potenzial der LSP-Methode zur Bestimmung von Materialeigenschaften auf. Auch wenn die Bestimmung der Position von Defekten mit dem verwendeten Set-up nicht gelingt, so wird die Möglichkeit, dies in folgenden Forschungsvorhaben zu realisieren, als hoch angesehen, wenn folgende Herausforderungen gelöst werden können:

1. Steigerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung des LSP-Systems
2. Optimierung der LSP-Software zur Erkennung von Prozessdefekten und Optimierung der Methodik zum Auswerten kleinerer Bereiche
3. Einbringung des LSP-Systems in den Strahlengang zur Analyse auf der gesamten Bauplattform

Mit der LSP-Methode können für stochastisch verteilte Defekte mechanische Eigenschaften von Zugproben vom Messsignal, nach Unterabschnitt 5.3.6 bzw. Abbildung 5-34, hergeleitet werden. Die hohe Sensitivität der LSP-Messungen bereits bei geringen Änderungen der relativen Dichte ermöglicht hohe Auflösungen von Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen. Jedoch kann mit dem System nicht nachgewiesen werden, welche Defektart (stochastisch verteilte Defekte oder lokale Hohlräume) vorliegt, da keine lokale Auflösung von Defekten möglich ist. Grundsätzlich gelingt die Detektion von Defekten mit einer Querschnittsfläche kleiner gleich $7\,330\ \mu\text{m}^2$ bzw. einer Kantenlänge von $85\ \mu\text{m}$ – Boole'sche Operationen mit einer Kantenlänge von $80\ \mu\text{m}$ der Grundflächen. Die Detektierbarkeit liegt weit unter den Defektgrößen, die für die Betrachtung der Auswirkungen auf Dauerfestigkeiten eingebracht wurden. Somit können Defekte ermittelt werden, die Dauerfestigkeitsreduktionen von weniger als 22 % hervorrufen.

Um jedoch auch die Position der Defekte bestimmen und somit falsche Interpretationen des Messsignals vermeiden zu können, wird ein eigenes Prozessmonitoring-System, basierend auf der Auswertung von Emissionen des Schmelzbades, entwickelt, welches zeitlich und räumlich höher auflösend ist. Dabei werden die genutzte Hardware und Software selbst definiert, was dynamischere Entwicklungsprozesse und tiefere Einblicke ermöglicht. Die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.4 IN-SITU-MONITORING MITTELS HIGH-SPEED-VIDEOGRAPHIE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse präsentiert, die mit dem eigens entwickelten HSK-Monitoringsystem und der dazugehörigen Python-basierten Software ermittelt wurden. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Hardware sowie der angewandten Auswertalgorithmen und -methodiken findet sich in Abschnitt 4.4. In den durchgeführten Versuchen wird die Reproduzierbarkeit des Messsystems untersucht und die Zusammenhänge zwischen den gewählten Prozessparametern und den resultierenden Schmelzbadeigenschaften werden analysiert. Auf Grundlage dieser Daten werden Methoden entwickelt,

um lokale Defekte zu detektieren. Zu den analysierten Eigenschaften gehören unter anderem die Breite und Länge des Schmelzbades sowie lokale Abkühlgradienten. Zwar sind in der Literatur bereits ähnliche Ansätze veröffentlicht, doch unterscheidet sich das verwendete HSK-System erheblich von diesen. So wird mit diesem die höchste lokale Auflösung von $1,44 \mu\text{m}$ Kantenlänge je Pixel erreicht, bei Aufnahmeraten von bis zu 800 000 Bildern pro Sekunde. In der Veröffentlichung von Herzog et al. [19] werden Messsysteme verglichen, die auf verschiedenen Sensor- und Signaltypen basieren. Systeme, die High-Speed-Videos im sichtbaren Wellenlängenbereich aufnehmen und auswerten, erreichen laut den Autoren eine maximale lokale Auflösung von $14 \mu\text{m}$ Kantenlänge je Pixel. Diese wurde von Li et al. [112] bei einer Aufnahmerate von 10 000 Bildern pro Sekunde erzielt. Bei der Analyse thermischer Wellenlängen werden Auflösungen von bis zu $3,96 \mu\text{m}$ je Pixel bei einer Aufnahmerate von 9 310 Hz erreicht, wobei diese Methode bislang nur im DED-Prozess genutzt wurde [117].

Tabelle 5-10: Verwendete Parameter zur Aufzeichnung von Videos mit dem HSK-System, falls nicht ausdrücklich anders beschrieben.

Parameter	Einstellung
Aufnahmerate – FPS	40 000
Belichtungszeit	24,8 ms
Genutzte Pixel	896 x 176
Resultierende Auflösung	$1,44 \mu\text{m}$ Kantenlänge Pixel

Für die vorliegende Arbeit wurden die in Tabelle 5-10 zusammengefassten Parameter zur Aufzeichnung der High-Speed-Videos genutzt. Bei einer Aufnahmerate von f_{HSK} 40 000 FPS können noch 896×176 Pixel genutzt werden. Die Belichtungszeit, die sich aus der Auswahl der Aufnahmerate ergibt, beträgt

$24,8 \text{ ms}$. Die Auflösung des Systems beträgt weiterhin $1,44 \mu\text{m}$ Kantenlänge je Pixel. Somit kann ein Bildbereich mit den Kantenlängen $1\,290,24 \mu\text{m} \times 253,44 \mu\text{m}$ ausgewertet werden.

Zusätzlich zu den Untersuchungen der Schmelzbadgeometrie in der x/y-Ebene erfolgt eine Korrelation der Schmelzbademissionen mit realen Temperaturen. Dieser Ansatz soll genutzt werden, um lokal variierende Abkühlauern auswerten zu können, die einen Einfluss auf das resultierende Materialgefüge besitzen.

5.4.1 Detektion von Schmelzbadeneigenschaften

Schmelzbadbreiten

Zur Detektion von Schmelzbadbreiten werden die Videos wie in den Unterabschnitt 4.4.3 beschrieben aufgenommen und ausgewertet. Ähnlich wie bei der Analyse mittels LSP-Messsystem werden dabei von jedem Pixel in jedem Bild Intensitäten ausgelesen und in eine Matrix geschrieben. Die Auswertung der Schmelzbadbreiten basiert auf der Annahme, dass die detektierten Intensitäten mit der Temperatur der Schmelze korrelieren. Somit kann ein Wert der Intensität ermittelt werden, welcher nahe der Liquidustemperatur T_{liq} liegt, bei welcher der Phasenübergang von erstarrtem zu aufgeschmolzenem Material stattfindet. Um eine Kalibration der Software durchführen zu können, müssen die Schmelzbadbreiten mit herkömmlichen, anerkannten Methoden bestimmt werden. Hierzu werden in dieser Arbeit zwei Methoden gewählt:

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

1. Fertigung von Probekörpern mit einzelnen Scanvektoren in der letzten Schicht, welche anschließend mit dem Mikroskop BX51M der Firma Olympus Europa SE & Co. KG [147] händisch vermessen werden.
2. Belichtung des Materials im PBF-LB/M-Prozess und gleichzeitige Messung mittels HSK-Systems. Nach der Messung wird eine externe Lichtquelle eingeschaltet und der Betrachtungsbereich von Pulver befreit. Anschließend wird ein Bild der Schweißbahn aufgezeichnet, an diesem werden die Breiten bestimmt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5-35 gegeben.

Anschließend erfolgt eine für jedes Material einmalige Kalibration des Intensitätswertes I_{liq} . Oberhalb dieses Intensitätswertes wird angenommen, dass das Material schmelzflüssig ist und sich somit ein Schmelzbad ausprägt. Die Ermittlung von I_{liq} erfolgt durch iteratives Einsetzen in die Auswertesoftware und den Abgleich mit den resultierenden Schmelzbadbreiten. I_{liq} wird so lange variiert, bis die Abweichung zwischen real gemessenen Schmelzbadbreiten b_{real} und mittels Software bestimmten b_S minimal ist.

In Abbildung 5-35 ist das Ergebnis der beschriebenen Methode vorgestellt. Im Diagramm ist ein Bild einer Schweißbahn dargestellt, welche mit dem Standardprozessparametersatz für das Material DEW 316L gefertigt wurde, vgl. Tabelle 5-11. Dieses Bild wurde mit dem HSK-System nach Methode 2 (siehe oben) aufgenommen. Über dem Bild sind die Ergebnisse der händischen und softwarebasierten Auswertung der Schmelzbadbreiten dargestellt.

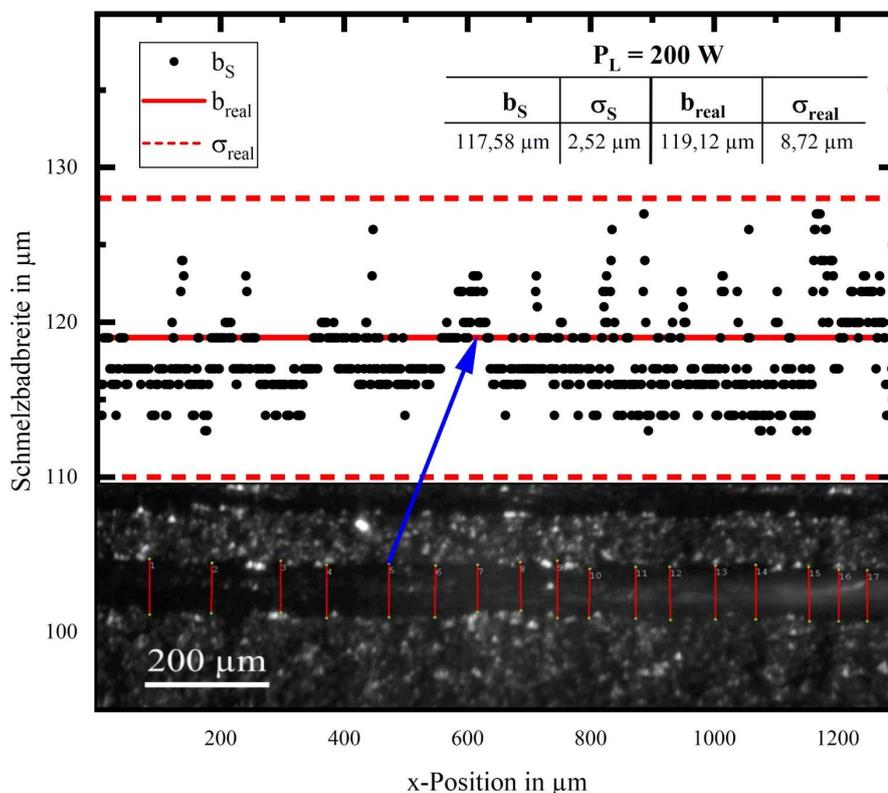


Abbildung 5-35: Vergleich händischer Messungen der Schmelzbadbreiten (b_{real}) mit Ergebnissen der softwarebasierten Auswertung der Schmelzbadbreiten (b_S).

Die rote horizontale Linie stellt den Mittelwert der händisch gemessenen Schmelzbadbreiten dar. Ebenfalls in Rot, aber gestrichelt dargestellt sind die oberen und unteren Grenzen der Standardabweichung δ_{real} . Die Breiten des Schmelzbades, die mittels HSK-Systems an jeder x-Position ermittelt wurden, sind als schwarze Punkte dargestellt. Die händisch bestimmten Breiten betragen gemittelt $b_S = 119,12 \pm 8,72 \mu\text{m}$, die mittels Software bestimmten hingegen $b_{real} = 117,58 \pm 2,52 \mu\text{m}$.

Deutlich wird hierbei, dass die mit der Software ermittelten Schmelzbadbreiten im Vergleich zur manuellen Messung geringer ausfallen. Die Abweichung zwischen den beiden Werten beträgt jedoch nur $\Delta b = 1,54 \mu\text{m}$ oder 1,29 % im Vergleich zur manuellen Messung. Die Abweichung Δb ist geringfügig größer als die Kantenlänge eines Pixels ($1,44 \mu\text{m}$) des HSK-Systems. Bei einer detektierten Breite von $117,58 \mu\text{m}$ werden somit 81,65 Pixel korrekt bewertet, während ein weiterer Pixel nicht korrekt erfasst wird. Dies lässt auf einen Fehler von 1,15 % schließen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch die manuelle Breitenmessung fehlerbehaftet sein kann. Bei der Auswahl geeigneter Positionen zur Bestimmung des oberen sowie unteren Endes der Schmelzbahnbreite müssen Punkte mittels Mausklick definiert werden. Diese Punkte werden softwareintern auf die Mittelpunkte einzelner Pixel festgelegt. Wenn der Extremfall angenommen wird, dass bei der Auswahl der Punkte jeweils die Außenkante des jeweiligen Pixels angeklickt wird, ergibt sich eine Abweichung von $1,44 \mu\text{m}$.

Nach erfolgreicher initialer Kalibrierung der Software muss zwingend eine Validierung des ermittelten Wertes für I_{liq} erfolgen, da dieser Wert für alle Messungen der Schmelzbadbreiten als konstant angenommen werden soll. Gleichzeitig können dabei die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie die Genauigkeit des HSK-Systems geprüft werden. Hierzu wurden vier Versuche durchgeführt, bei denen die Laserleistungen angepasst wurden, um variierende Schmelzbadeneigenschaften hervorzurufen, vgl. Tabelle 5-11. Die Auswahl, dass der Parameter der Laserleistung P_L in dieser Studie variiert wird, basiert auf Untersuchungen von Keshavarzkermani et al. [75]. In diesen stellten die Autoren fest, dass die La-

Tabelle 5-11: Genutzte Prozessparameter für die Erzeugung von Einzelspuren aus dem Material DEW 316L auf einer SLM 280 HL PBF-LB/M-Anlage.

Parametersatz	P_L	v_S	d	Vektororientierung
Nr. 1	140 W	800 mm/s	0,03 mm	x-Richtung, gegen die Prozessgasströmung
Nr. 2 *	200 W			
Nr. 3	260 W			
Nr. 4	320 W			

Prozessgas: Stickstoff; Material: DEW Printdur 4404; Sauerstoffgehalt: $\leq 0,05 \%$, Prozessgasgeschwindigkeit: 14 m/s

*: Standardprozessparameter

serleistung einen stärkeren Einfluss auf die Dimensionen des Schmelzbades besitzt als die Scangeschwindigkeit. Zusätzlich bleibt somit zunächst die Anzahl auswertbarer Bilder im Videoausschnitt konstant.

Während der Validierungsversuche wurden Videos mittels HSK-Systems aufgezeichnet und die Schmelzbadbreiten händisch nach Methode 2 ermittelt. Die Videos wurden anschließend mit dem im Voraus bestimmten Wert I_{liq} ausgewertet.

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

Die Ergebnisse dieser Validierungsversuche sind in Abbildung 5-36 dargestellt. Links neben dem Diagramm sind vier Frames aus den aufgezeichneten Videos für die jeweiligen Parametersätze (Nr. 1 bis Nr. 4, vgl. Tabelle 5-11) wiedergegeben. Bei Betrachtung dieser wird bereits deutlich, dass die Schmelzbadeigenschaften stark mit den gewählten Prozessparametern zusammenhängen, da sich die Breite, Länge und Fläche des Schmelzbades mit steigender Volumenenergie stärker ausprägen [75, 77]. In der rechten Hälfte der Abbildung sind die gemittelten Schmelzbahnbreiten über den verwendeten Prozessparametersätzen aufgetragen. Rote Quadrate stehen dabei für die durch die Software ermittelten Schmelzbahnbreiten b_S , schwarze Quadrate für händisch bestimmte Breiten b_{real} . Zusätzlich ist die Abweichung (graue Kreise) der b_S von b_{real} in % auf der rechten Ordinate aufgetragen.

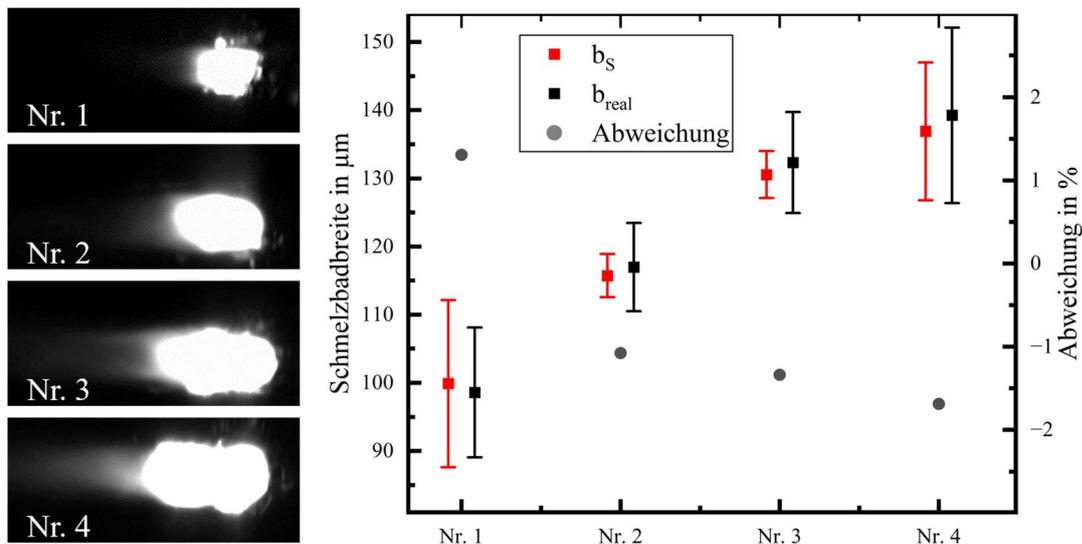


Abbildung 5-36: Gegenüberstellung von Schmelzbahnbreiten, welche durch die Software b_S und durch händische Messungen b_{real} an vier variierten Prozessparametersätzen ermittelt werden konnten.

Parametersatz Nr. 2 beschreibt dabei den Referenzparametersatz, welcher schon für die Kalibrierung der Software genutzt wurde, bei dieser Messreihe ergibt sich die Breite zu $b_{real} = 116,99 \mu\text{m}$ bzw. $b_S = 115,73 \mu\text{m}$. Wird die genutzte Laserleistung um 60 W reduziert, verringert sich die Schmelzbahnbreite um ca. $18,4 \mu\text{m}$ auf eine Breite von $b_{real} = 98,59 \mu\text{m}$. Mit steigender Laserleistung nimmt die Schmelzbahnbreite wiederum zu. So resultiert bei einer Laserleistung von 260 W eine um $15,24 \mu\text{m}$ gestiegene Breite von $b_S = 132,33 \mu\text{m}$. Wird die Laserleistung um weitere 60 W erhöht (320 W), so führt dies zu einer geringen Steigerung der Breite um $6,92 \mu\text{m}$ auf $b_S = 139,25 \mu\text{m}$. Die Schmelzbahnbreiten sowie deren Standardabweichung sind im Detail in Tabelle T 8 im Anhang darstellt. Einen ähnlichen Verlauf der Schmelzbahnbreiten in Abhängigkeit von der eingestellten Volumenenergiedichte konnten Gusarov et al. [197] nachweisen. In ihrer Veröffentlichung werden experimentelle Versuche sowie numerische Modelle vorgestellt, anhand derer das Verhalten des Materials 316L im PBF-LB/M-Prozess beschrieben werden kann. Durch Variationen der Scangeschwindigkeit konnte nachgewiesen werden, dass Schmelzbahnbreiten um bis zu $60 \mu\text{m}$ reduziert werden, wenn die eingebrachte Volumenenergiedichte halbiert wird.

Neben der Betrachtung der Mittelwerte fällt in Abbildung 5-36 auf, dass der Wert der Standardabweichung zwischen den Prozessparametersätzen variiert. Bei Parametersatz Nr. 2 und 3 ist diese am geringsten. Wird die Laserleistung jedoch erhöht (Nr. 4) oder verringert (Nr. 1), so steigt die Standardabweichung. Da diese bei händisch sowie bei softwarebasiert bestimmten Ergebnissen steigt, kann davon ausgegangen werden, dass das Schmelzbad instabil wird und Phänomene wie beispielsweise das Necking oder Balling auftreten, welche ebenfalls von Gusarov et al. [197] beobachtet werden konnten. Auch Li et al. [98] oder Cao et al. [99] konnten das Auftreten von Instabilitäten der Schweißbahnen in Abhängigkeit von den Prozessparametern nachweisen. In beiden Studien zeigten sich Balling- oder Necking-Phänomene, die einen besonders starken Einfluss auf die Standardabweichung besitzen.

Zusätzlich zur Messung der Schmelzbadbreiten ist die relative Messabweichung zwischen händisch sowie softwarebasiert bestimmten Schmelzbadbreiten nach Formel (5-11) dargestellt.

$$\Delta b = \left(\frac{b_s}{b_{real}} - 1 \right) * 100 \% \quad (5-11)$$

Die größte Abweichung zwischen den Messergebnissen tritt bei Prozessparametersatz Nr. 4 auf. Die Abweichung beträgt -1,68 %, wobei das negative Vorzeichen auf eine Unterschätzung der Schmelzbadbreite durch die Auswertung mittels Software hinweist. Eine Unterschätzung der Schmelzbadbreiten findet statt, wenn der Referenzparametersatz oder solche Parameter angewandt werden, bei denen mehr Volumenenergiegedichte eingebracht wird. Die Abweichung der detektierten Schmelzbadbreiten nimmt bei einer Erhöhung der Laserleistung in diesen Versuchsreihen von -1,07 % bei dem Referenzparametersatz (Nr. 2) konstant zu. Eine Überschätzung der Schmelzbadbreite kann hingegen beobachtet werden, wenn die eingebrachte Energie reduziert wird. Dies findet bei Parametersatz Nr. 1 statt, bei welchem das Material mit einer Laserleistung von 140 W belichtet wird. Die absolute Abweichung beträgt 1,29 µm, bzw. relativ 1,31 %.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich auf, dass die genutzte Methode zur Detektion von Schmelzbadbreiten in Abhängigkeit von Schmelzbadintensitäten valide ist. Obwohl variierte Prozessparameter zur Belichtung der Einzelspuren angewandt wurden, steigt die Abweichung auf einen maximalen relativen Wert von -1,68 % in dieser Messreihe. Die Steigerung der Laserleistung ist gleichbedeutend mit einer höheren reflektierten Intensität im Bereich der Wellenlänge des Anlagenlasers (1 040 nm), ein Einfluss auf die Schmelzbadbreitendetektion kann ebenso nicht festgestellt werden. Der HSK-Ansatz wird hardware- sowie softwareseitig zur Bestimmung der Schmelzbadbreiten als validiert definiert.

Schmelzbadlängen

Obwohl eine Kalibrierung des HSK-Messsystems zur Detektion von Schmelzbadbreiten bereits durchgeführt und validiert wurde, muss geprüft werden, ob mit derselben Vorgehensweise und dem Kennwert der Intensität I_{liq} die Schmelzbadlänge mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit detektiert werden kann. Ebenso wie bei Schmelzbadbreiten muss die Schmelzbadlänge manuell erfasst werden, um

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

einen möglichst genauen Referenzwert darstellen zu können. Anders als bei Schmelzbadbreiten ist es nicht möglich, die Längen an den erstarrten Schweißbahnen zu messen, da an diesen keine Indikatoren vorhanden sind, mit denen die Schmelzbadlänge retrospektiv bestimmt werden könnte. Zur Identifikation von Schmelzbadlängen werden deshalb High-Speed-Videos von Umschmelzvorgängen an Einzelspurversuchen aufgenommen. Während der Aufnahmen wird ein leuchtstarkes Ultra-High Power mLED-Set UHP-F-630 der Firma Prizmatrix Ltd. [198] genutzt, um den Bildausschnitt auszuleuchten. Die Auswertung der Videos erfolgt nach dem in Abbildung 5-37 veranschaulichten Schema.

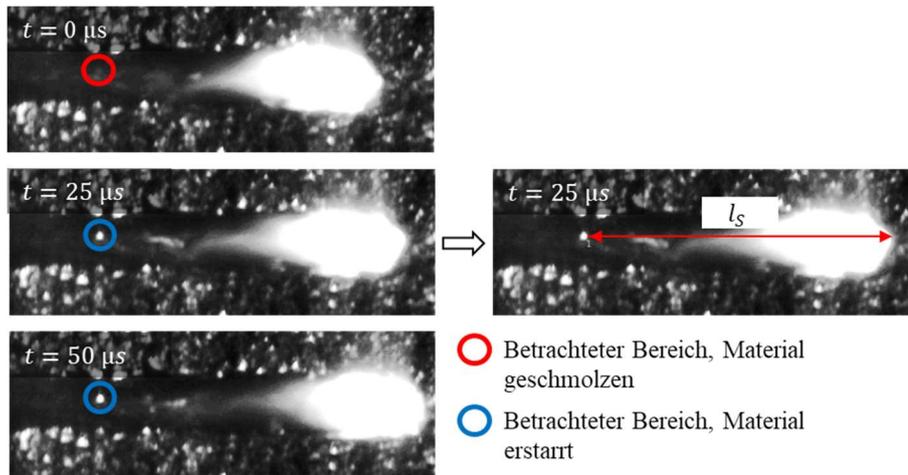


Abbildung 5-37: Beispielhafte Darstellung der Auswertung von Schmelzbadlängen anhand der Belichtung einer Einzelspur, welche auf der Substratplatte belichtet wurde.

Die Lokalisierung eines Pixels, der in zwei aufeinanderfolgenden Bildern von flüssig zu fest wechselt, ist anhand der Videos herausfordernd und könnte zu Fehlmessungen führen. Daher wurde bei der Auswertung der Schmelzbadlängen der Fokus auf die Entstehung und Lokalisierung charakteristischer Geometrien auf der Oberfläche der Schmelzbahn gelegt. Wie in Abbildung 5-37 gezeigt, werden einzelne aufeinanderfolgende Bilder der Videos manuell ausgewertet. Die linken drei Bilder, die untereinander angeordnet sind, entsprechen einer fortlaufenden Videosequenz. Im ersten Bild ($t = 0 \mu\text{s}$) sind keine besonders charakteristischen Merkmale auf der Oberfläche zu erkennen. Im darauffolgenden Bild, zum Zeitpunkt $t = 25 \mu\text{s}$, ist ein heller, nahezu kreisförmiger und überbelichteter Bereich im ersten Viertel ersichtlich. In den darauffolgenden Bildern ($t = 50 \mu\text{s}$ und spätere) bleiben die Position sowie die Ausprägung des Bereiches nahezu unverändert. Die Entstehung des Punktes muss somit im Zeitschritt $0 \mu\text{s} \leq t \leq 25 \mu\text{s}$ erfolgt sein. Hierbei wird der Aspekt genutzt, dass eine Änderung der Oberflächentopografie nur möglich ist, solange das Material in einem flüssigen Zustand ist. Verbleibt ein optisches Merkmal auf der Oberfläche, so kann diese als erstarrt betrachtet werden. Eine Messung der Schmelzbadlängen erfolgt anschließend zwischen Schmelzbadfront und dem detektierten Merkmal. Für den Referenzparametersatz werden mindestens 30 Messungen durchgeführt.

Trotz der hohen Aufnahmeraten des HSK-Systems von 40 000 Bildern pro Sekunde wird der Laser zwischen zwei Bildern bzw. bei einer Zeitdifferenz von $\Delta t = 25 \mu\text{s}$, bei den angewandten

Prozessparametern um $\Delta x_L = 20 \mu\text{m}$ abgelenkt, wie nach Formel (5-12) berechnet. In Extremfällen kann die Schmelzbadlänge also einen schematischen Fehler von $\pm 20 \mu\text{m}$ aufweisen.

$$\Delta x_L = \frac{1}{f_{HSK}} * v_S \quad (5-12)$$

Δx_L	Ablenkung Laser	25 μm
f_{HSK}	Aufnahmerate HSK-System	40 000 FPS
v_S	Scangeschwindigkeit	800 mm/s

Die Auswertung der Schmelzbadlänge erfolgt nach der in Unterabschnitt 4.4.3 beschriebenen Methodik. Dazu wird zunächst angenommen, dass die Intensität I_{liq} , bei der das Material aufschmilzt, genutzt werden kann, um die Schmelzbadlänge zu bestimmen. Durch die Software wird die Länge mit

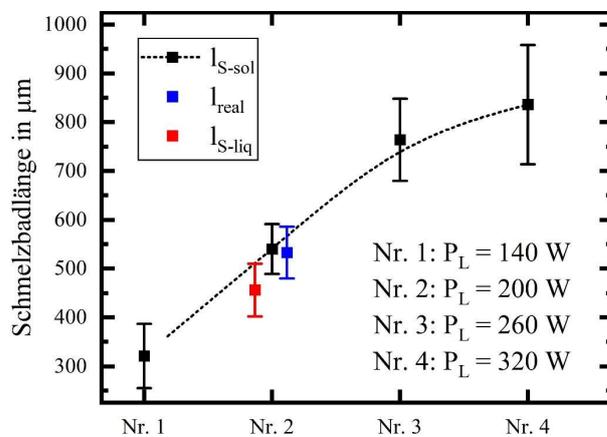


Abbildung 5-38: Händisch und mittels HSK-Systems ermittelte Schmelzbadlängen, aufgetragen über der genutzten Laserleistung zur Belichtung der Einzelspur.

$l_{S-liq} = 456,1 \pm 54 \mu\text{m}$ bestimmt. Ein Vergleich mit den händisch ermittelten Werten von $l_{real} = 533,12 \pm 53,02 \mu\text{m}$ zeigt eine deutliche Abweichung auf, siehe Abbildung 5-38. Zurückgeführt werden kann diese auf das Phänomen der unterkühlten Schmelze, wobei die Erstarrungs- unterhalb der Aufschmelztemperatur liegt [143–145]. Aus diesem Grund wird eine weitere Intensität I_{sol} definiert, mit der der Zeitpunkt der Erstarrung des Materials bestimmt werden kann. Die Länge des Schmelz-

bades wird vom Aufschmelzen (Überschreiten von I_{liq}) bis zum Unterschreiten von I_{sol} bestimmt. Durch geringfügige Anpassungen der I_{sol} im Vergleich zu I_{liq} kann die Genauigkeit der Auswertung deutlich erhöht werden. Die Länge mit der neuen Methode ergibt sich beim Standardprozessparametersatz Nr. 2 zu $l_{S-sol} = 540,6 \pm 51,21 \mu\text{m}$. Die Abweichung zu den realen Längen beträgt somit 1,5 %. Für die Auswertung wird daher die Intensität I_{sol} genutzt. Die Schmelzbadlängen verhalten sich in Abhängigkeit von der Laserleistung wie erwartet. Durch Erhöhungen der Laserleistung steigt die Schmelzbadlänge auf $l_{S-sol} = 764,5 \pm 84,1 \mu\text{m}$ (Nr. 3) bzw. $l_{S-sol} = 836,7 \pm 122 \mu\text{m}$ (Nr. 4) an. Wird die eingebrachte Leistung verringert, so sinken die Längen, wie anhand Parametersatz Nr. 1 ersichtlich: $l_{S-sol} = 321,8 \pm 66 \mu\text{m}$. Zu erkennen ist, dass mit höheren Änderungen der Prozessparameter die Standardabweichungen zunehmen. Zurückgeführt werden kann dieses Phänomen auf Irregularitäten des Schmelzbades, wie das Balling oder Necking. Lokale Minima oder Maxima von Schmelzevolumina führen zu unterschiedlichen Abkühlgradienten und somit auch Erstarrungsintervallen. Die Schmelzbadlängen bei Standardprozessparametern liegen geringfügig unter denen, die von Kan et al. [199] durch Simulationen des Schmelzbades (Material 316L; Maschine EOS 290M) bestimmt wurden: 577,35 μm , bei einer Scangeschwindigkeit von 1 000 mm/s und einer Laserleistung von 200 W.

Bestimmung von Abkühl dauern

Zusätzlich zu den beiden bisher vorgestellten Möglichkeiten zur Analyse von Schmelzbadeigenschaften kann mittels des HSK-Systems auch eine Bestimmung sogenannter Abkühl dauern erfolgen. Die Grundlagen zur Bestimmung der Abkühl dauer sind in Unterabschnitt 4.4.3 beschrieben.

Das Ergebnis einer Auswertung der Abkühl dauern von einer Einzelspur, die mit Standardprozessparametern (Nr. 2 in Tabelle 5-11) gefertigt wurde, ist in Abbildung 5-39 als Heatmap dargestellt. Die eingestellte Aufnahme rate wurde für diesen Versuch auf 20 000 FPS reduziert, um Einflüsse, die im Folgenden diskutiert werden, besser veranschaulichen zu können. Die Dauer der Abkühlungen beträgt zwischen 0 und 19 Bilder und ist durch eine Einfärbung der ausgewerteten Pixel verbildlicht. Die Farbskala ist im rechten Bereich dargestellt und reicht von der Farbe Schwarz bis Hellgelb. Weiße Pixel stellen in der Auswertung solche dar, die durch die Anwendung von Filtern nicht analysiert wurden, da sie nicht als Schmelze eingestuft wurden. Zusätzlich sind zwei geometrische Eigenschaften dargestellt. Mit weiß gestrichelten Linien ist der Einfluss der Schmelzfront auf die Auswertung angezeigt. Schwarz gepunktet ist das Schmelzende umrandet. Die Abstände der jeweilig aufeinanderfolgenden Phänomene entsprechen jeweils ca. 40 µm und somit dem Wert, um den der Laser zwischen zwei Bildern auf der Bauebene bewegt wird. Der Abstand zwischen diesen Phänomenen lässt also auf die Aufnahme rate bzw. die Scangeschwindigkeit schließen.

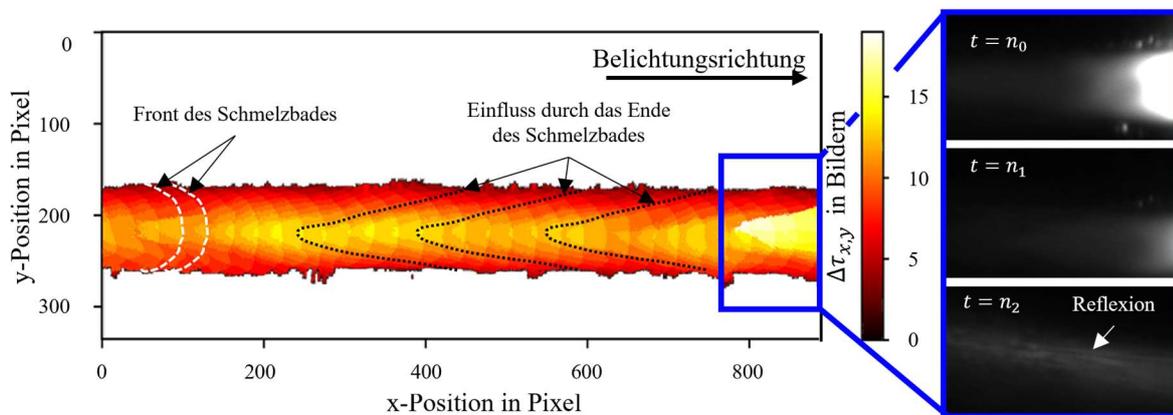


Abbildung 5-39: Abkühl dauern ermittelt mit der entwickelten HSK-Software anhand einer Einzelspur aus dem Material DEW Printdur 4404, belichtet mit Standardprozessparametern. Zusätzlich sind drei Bilder aus den HSK-Daten dargestellt, um den Einfluss von Reflexionen auf die Auswertung zu verdeutlichen.

Ersichtlich wird in dieser Abbildung, dass hohe Abkühl dauern vermehrt in der Mitte des Schmelzbades auftreten. Je näher ein Pixel am Rand (orthogonal zur Belichtungsrichtung) des Schmelzbades ausgewertet wird, desto schneller kühlt dieser ab. Hervorgerufen wird dies durch den Wärmetransfer \dot{Q}_{Metall} , welcher vom Rand des Schmelzbades in das umgebende erstarrte Material stattfindet, wie in Abbildung 5-40 aufgezeigt. Dabei gilt, dass der Wärmestrom in das umgebende Material (Metall) deutlich ausgeprägter ist als der durch die Konvektion hervorgerufene Wärmestrom \dot{Q}_N , der an der Oberfläche des Schmelzbades stattfindet [200].

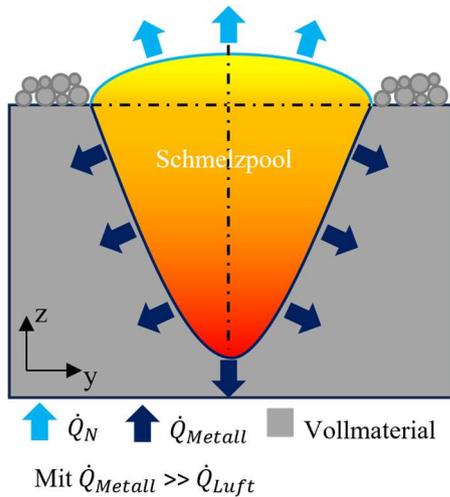


Abbildung 5-40: Wärmestrom entlang der Schmelzbadgrenzen im PBF-LB/M-Prozess.

Abbildung 5-41 a) skizziert. Zurückgeführt wird dieses Phänomen auf den Rückstoßdruck, der durch Verdampfung des Materials entsteht und sich dabei auf das Schmelzbad auswirkt. Untersucht und bestätigt wurde dieses Verhalten von Matthews et

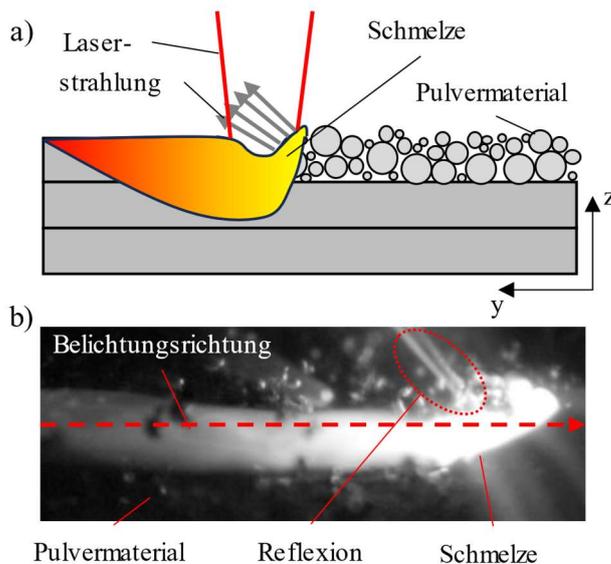


Abbildung 5-41: a) Schematische Darstellung der Ausprägung einer Absenkung der Schmelzbadoberfläche im PBF-LB/M in Anlehnung an [85, 200, 201]. b) Bild eines HSK-Videos aus eigenen Versuchen als Vergleich.

Phänomens wurde innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen nicht vorgenommen. Jedoch wurde während des manuell durchzuführenden Zuschneidens sowie des darauffolgenden Exports der HSK-Videos auf ebensolche Phänomene geachtet und solche wurden, bis auf den gezeigten Fall, von der Auswertung ausgeschlossen. Verhindert werden kann dieses Phänomen weiterhin, wenn der Scanvektor kurz hinter dem Bildausschnitt endet. Da eine Auswertung der bisher vorgestellten Methoden zur Veranschaulichung der Abkühlauern häufig manuelle Prozesse benötigt, wird ein Kennwert ermittelt, mit dem eine Bestimmung der Schmelzbadqualität ermöglicht wird. Hierzu werden die Abkühlauern der Pixel analysiert. Dabei werden Abkühlauern in Klassen mit einer Reichweite von drei unterteilt. Somit

Am rechten Rand der Einzelspur (Pixelbereich: $x \geq 800$) kann eine lokale Erhöhung der Abkühlauern festgestellt werden. Durch eine Analyse einzelner Bilder aus dem Video kann diese auf eine erhöhte Intensität im Video zurückgeführt werden, welche auftritt, nachdem der Laser aus dem Bildbereich gelenkt worden ist. Dargestellt sind drei beispielhafte Bilder dazu in Abbildung 5-39 auf der rechten Seite. Eine mögliche Ursache der Intensitätssteigerung kann in der Arbeit von Lee et al. [200] gefunden werden. Die Autoren simulieren Schmelzbadynamiken in PBF-LB/M-Prozessen.

Dabei stellen sie dar, dass sich die Oberfläche des Schmelzades unterhalb des Laserstrahls absenkt, wie schematisch in Abbildung 5-41 a) skizziert. Zurückgeführt wird dieses Phänomen auf den Rückstoßdruck, der durch Verdampfung des Materials entsteht und sich dabei auf das Schmelzbad auswirkt. Untersucht und bestätigt wurde dieses Verhalten von Matthews et al. [201], Tang et al. [202] und andere Autoren [200, 203]. Durch diese Absenkung ergeben sich geneigte Oberflächen, von denen aus Strahlung emittiert oder Intensitäten des Anlagenlasers reflektiert werden können. In Abbildung 5-41 b) ist dem Schema ein Bild aus HSK-Versuchen gegenübergestellt, wobei ein verändertes Mess-Setup mit einem Betrachtungswinkel von 45° genutzt wurde. Im Bild ersichtlich ist ein leichtes Aufbäumen der Schmelzfront, ebenso wie Reflexionen, die ihren Ursprung in der beschriebenen Zone zu haben scheinen. Eine weiterführende Analyse dieses

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

ergeben sich Abkühlklassen von 1–3 Bildern, 4–6 Bildern, 7–9 Bildern etc., welche jeweils über dem Median der Reihenweite aufgetragen sind (1–3, aufgetragen über Wert 2), siehe Abbildung 5-42.

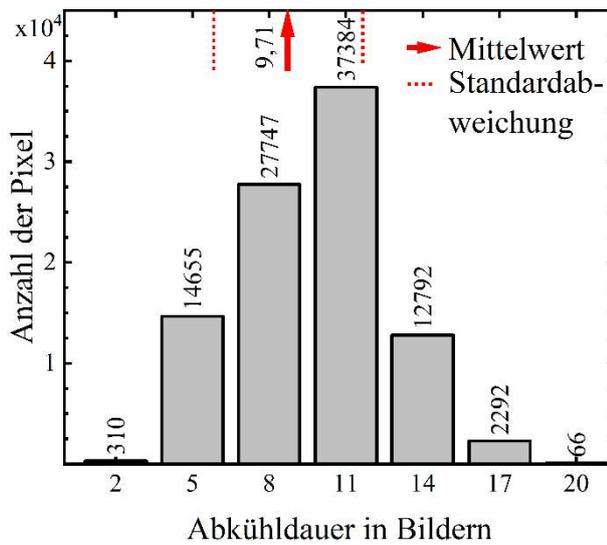


Abbildung 5-42: Analyse der Abkühldauer aller Pixel, die auf der Schmelzbahn verortet sind. Analysiert an einer Einzelspur, gefertigt mit Referenzparametern. Die Pixel sind in Klassen mit einer Reichweite von 3 unterteilt: Klasse 1: 1–3 Bilder Abkühldauer, Klasse 2: 4–6 Bilder, Klasse 3: 7–9 Bilder etc.

Abweichungen von diesem Wert weisen auf veränderte Eigenschaften hin.

Die Art der Verteilung der Abkühlzeiten ähnelt einer Normalverteilung für den Referenzparametersatz. Geringe Abkühlzeiten werden am Rand des Schmelzbades detektiert, lange Abkühlzeiten hingegen in der Mitte. Aus den Einzelwerten werden weiterführend der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Abkühlraten für den Referenzparametersatz mit $9,75 \pm 2,9$ Bildern oben als roter Pfeil bzw. gepunktete Linie dargestellt. Ebenso kann die Summe der Pixel (95 246), für welche eine Abkühlzeit bestimmt wurde, als Vergleichswert eingeführt werden. Aus diesem Wert ergibt sich eine Oberfläche der Schmelzbahn von $197\,502\ \mu\text{m}^2$. Positive oder negative Abwei-

5.4.2 In-situ-Detektion von Defekten mittels High-Speed-Kamera

Mit dem HSK-System wurden bislang drei Eigenschaften von Schmelzbädern separat bestimmt und ausgewertet: Abkühlzeiten, Schmelzbadlängen sowie -breiten. Diese drei Eigenschaften sollen im Folgenden in Kombination genutzt werden, um die Qualität einer Belichtung zu bewerten. Dabei kann das Potenzial einer Mehrfachauswertung bewertet werden. Beispielhaft wird eine Untersuchung anhand eines Parametersatzes durchgeführt, bei der die Laserleistung mit $P_L = 350\ \text{W}$ definiert wurde. In Abbildung 5-43 sind die ermittelten Kennwerte gegenübergestellt. Durch die Anpassung der Laserleistung wird die Volumenenergiedichte um 75 % erhöht. In Teil a) sind die von der HSK-Software detektierten Schmelzbadbreiten (linke Ordinate) als Punkt-Linien-Diagramm über den Pixeln aufgetragen. Zusätzlich ist die Schmelzbadlänge, ermittelt an jedem 100. Pixel, als rotes Quadrat gezeigt, aufgetragen an der rechten Ordinate. Die ermittelten Breiten befinden sich zwischen $106\ \mu\text{m}$ und $200\ \mu\text{m}$, der Mittelwert beträgt $148,99\ \mu\text{m} \pm 20,03\ \mu\text{m}$. Bereits anhand dieses Wertes ist eine deutliche Abweichung zum Referenzzustand ($b_S = 115,7\ \mu\text{m} \pm 3,16\ \mu\text{m}$) ersichtlich. Die Breite steigt um 28,77 %, die Standardabweichung sogar um 533,86 % – ein Indiz für eine Schmelzbahn mit irregulären Eigenschaften. Die Schmelzbadlängen sind ebenfalls höher als bei dem Referenzzustand mit $l_S = 533,12\ \mu\text{m}$. Die Werte der Längen reichen von $1\,140\ \mu\text{m}$ bis zu $1\,400\ \mu\text{m}$. Die Schmelzbäder sind somit um mindestens 113,83 % vergrößert. Nahe der x-Position $x_1 = 221$ und $x_2 = 522$ ist ein deutlicher Anstieg der Schmelzbadbreiten, aber auch der Schmelzbadlängen ersichtlich. Zwischen diesen beiden x-Positionen sinkt die Breite des Schmelzbades deutlich und erreicht den Tiefstwert bei $x_3 = 383$ mit $106\ \mu\text{m}$.

Ähnliche Veränderungen können bei den Schmelzbadlängen detektiert werden. Diese steigen zunächst bis zu einem x-Wert von 200 an. An der Position $x = 400$ wird das Minimum der Längen detektiert, $l_S = 1\,140\ \mu\text{m}$, im Anschluss folgt ein erneuter Anstieg, bei welchem das Maximum der Schmelzbadlängen erreicht wird ($l_S(500) = 1\,400\ \mu\text{m}$).

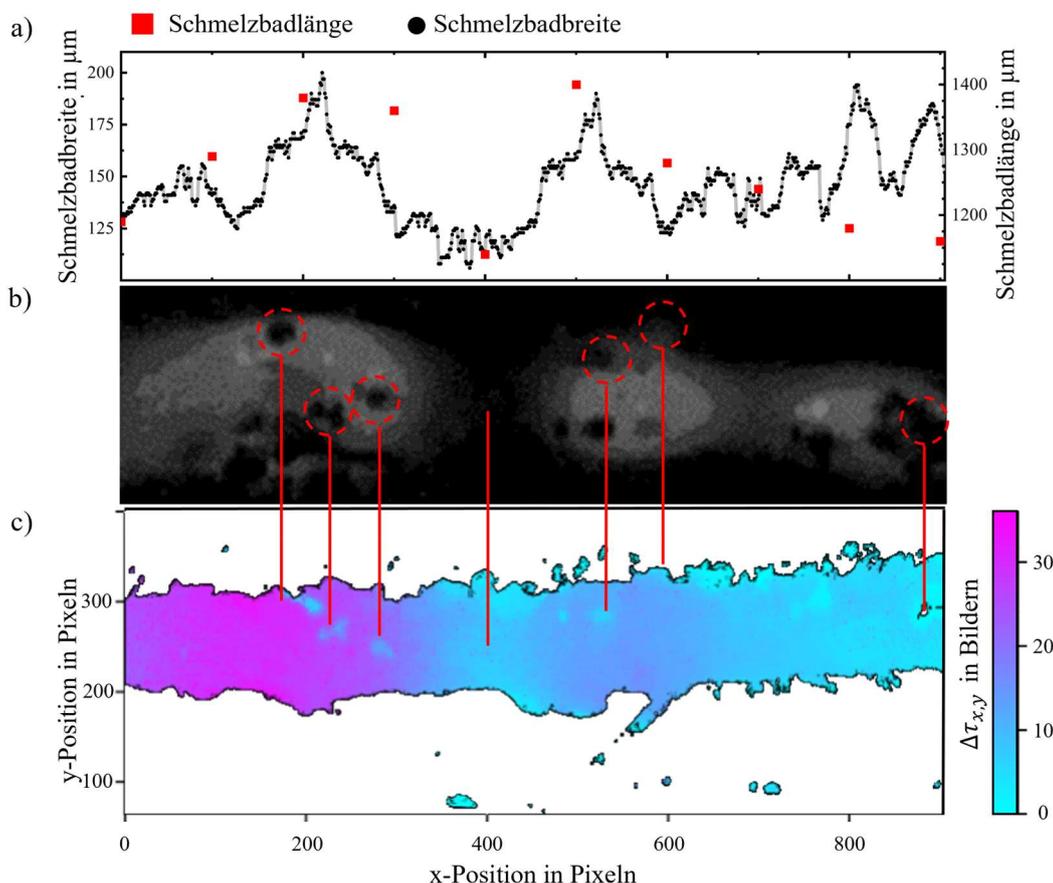


Abbildung 5-43: Ergebnisse einer umfangreichen HSK-Auswertung anhand einer Einzelspur, belichtet mit einer Laserleistung von $P_L = 350\ \text{W}$. Ermittelt wurden dabei die Kennwerte der a) Schmelzbahnbreite, -länge und die Abkühlzeiten in c). Ebenso ist in b) ein Bild des HSK-Videos dargestellt, der Laser befindet sich außerhalb des Bildausschnittes.

Im Anschluss sinken die Längen geringfügig, jedoch stetig. Die Breiten sinken zunächst auch, steigen jedoch nahe dem rechten Ende des Diagramms erneut an. Besonders durch die Erkenntnisse im Bereich zwischen $150 \leq x \leq 550$ kann darauf geschlossen werden, dass eine Irregularität des Schmelzbades vorliegt, wobei von einer Einschnürung ausgegangen werden kann. Die Erkenntnisse lassen sich mit Abbildung 5-43 b) bestätigen. Im Anhang sind in Abbildung A 6 zusätzliche Bilder in zeitlicher Reihenfolge dargestellt, auf denen weitere Phänomene betrachtet werden können.

Dargestellt ist ein Bild aus dem ausgewerteten HSK-Video, welches durch eine Nachbearbeitung aufgehellt wurde, um die Phänomene besser darstellen zu können. Die Skalierung der Breite dieses Bildes ist gleich derjenigen der x-Achse aus dem Diagramm in a). Somit ist ein Vergleich der Ergebnisse möglich, die vertikal übereinanderliegen. Bedacht werden muss dabei jedoch, dass die Schweißbahn wie dargestellt nicht dem Endzustand entspricht, sich beispielsweise Pulverpartikel noch bewegen und das Material noch abkühlt. Besonders interessant ist der Vergleich von a) und b) in dem Bereich, an dem

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

die beiden linken Maxima der Breite sowie das dazwischen befindliche Minimum in a) vorliegen. In b) ist an den Maxima eine langanhaltende Intensität zu erkennen, die noch besteht, obwohl der Laser nicht mehr im Bildbereich ersichtlich ist, was auf lange Abkühl dauern hinweist. Beide Bereiche besitzen eine große Ausprägung orthogonal zur Belichtungsrichtung. Stellenweise sind dunklere zusammenhängende Pixel zu erkennen, bei diesen handelt es sich um Pulverpartikel, welche sich auf der Oberfläche ansammeln und deutlich kälter sind. Ebenso ist das Minimum der Schmelzbadbreiten ersichtlich, in b) ist an dieser Stelle ein Bereich mit geringen Intensitäten nahe 0 zu erkennen. Grundsätzlich kann somit von dem Phänomen Balling ausgegangen werden, bestätigt werden kann dies durch nachträgliche Fertigungen von Einzelvektoren, an denen Balling-Effekte nachgewiesen werden können, siehe Abbildung A 7 im Anhang. In Abbildung c) sind die Abkühl dauern aller Pixel der Schmelze dargestellt, die x-Achse stimmt ebenfalls mit a) und b) überein, auch hier ist ein Vergleich möglich. Die Skala der Abkühl dauern reicht in dieser Abbildung von 0 bis 37 Bildern. Die ermittelten Abkühl dauern bestätigen, was bereits im Voraus in b) betrachtet werden konnte. Die Abkühl dauer nahezu aller Pixel ist länger als am Referenzmaterial, was auf ein Schmelzbad mit höherem Volumen zurückzuführen ist. An den lokalen Maxima der Breiten und Längen werden besonders hohe Abkühl dauern (bis zu 37 Bilder) detektiert. Zwischen diesen beiden erreicht die lokale Abkühl dauer das Minimum. In b) sind markante Stellen durch rote Linien und rot gestrichelte Kreise hervorgehoben. Zu beobachten ist, dass Pulverpartikel, die sich nach der Belichtung auf der Oberfläche der Schmelzbahn ablegen, in den Ergebnissen ersichtlich sind. Trotz des Einflusses der Partikel verändert sich die Gesamtaussage jedoch nicht. Abbildung 5-44 zeigt den Vergleich der Abkühl dauern in Abhängigkeit von der Belichtungsstrategie.

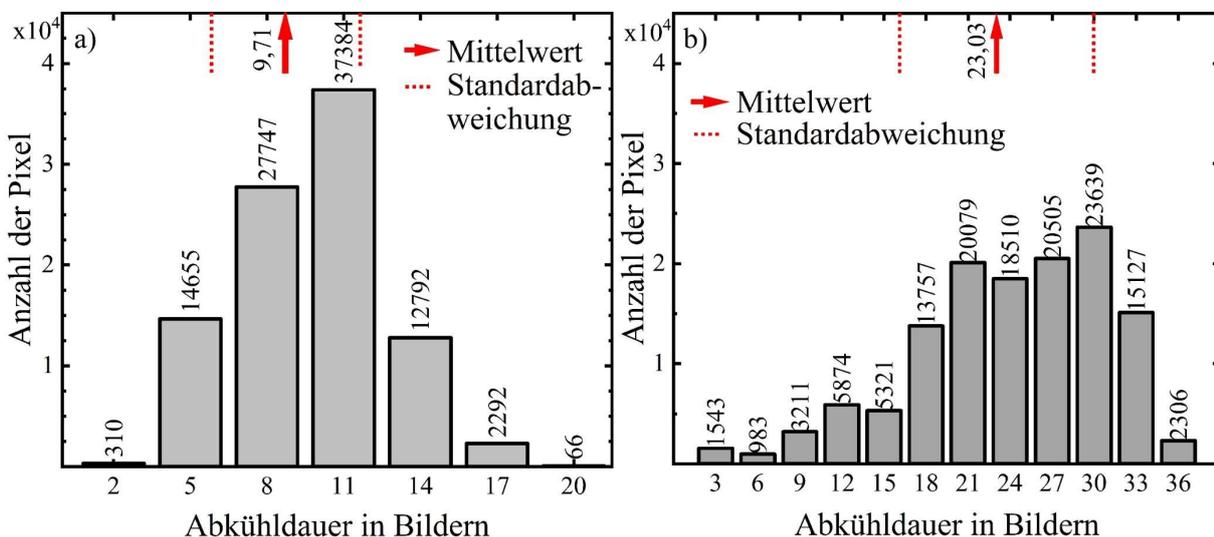


Abbildung 5-44: Verteilung der Abkühl dauern nach Pixel, ermittelt anhand der Belichtung einer Einzelspur mit a) einer Laserleistung von $P_L = 200 \text{ W}$; b) einer Laserleistung von $P_L = 350 \text{ W}$.

Die Steigerung der Abkühl dauern wird deutlich, der Mittelwert der Abkühl dauer steigt von $9,71 \pm 2,9$ auf $23,05 \pm 6,93$ um mehr als 137,38 %. Auch hier zeigt sich erneut eine prägnante Steigerung der Standardabweichung (138,96 %), welche als Indiz für unregelmäßig ausgeprägte Schmelzbäder

angenommen werden kann. Die Fläche in der x/y-Ebene, welche als umgeschmolzen detektiert wurde, steigt von $197\,502\ \mu\text{m}^2$ um $36,85\%$ auf $270\,287\ \mu\text{m}^2$.

Alle vorgestellten Ergebnisse weisen auf eine Anomalie der erzeugten Schweißbahn hin. Auch wenn für diese Versuchsreihe die Variation der Parameter bekannt war, so hätte der vorliegende Mechanismus auch ohne dieses Wissen hergeleitet werden können. Denn anhand aller Werte kann abgeleitet werden, dass mehr Volumenenergie in das Material eingetragen wurde als beim Referenzparametersatz. Anhand der Schmelzbadbreite kann abgeleitet werden, dass mehr Laserleistung als $P_L = 320\ \text{W}$ genutzt wurde, da die detektierte Breite ($148,99\ \mu\text{m} \pm 20,03\ \mu\text{m}$) die resultierende Breite einer solchen Belichtung $b_S = 136,9 \pm 10,1$ überschreitet. Gleiches gilt für die Auswertung der Schmelzbadlängen. Die Abkühlauern weisen darauf hin, dass insgesamt ein größeres Volumen an Metall umgeschmolzen wurde, da die lokale, aber auch die durchschnittliche Abkühldauer deutlich angestiegen ist.

Auch wenn die deutliche lokale Erhöhung der Energie, die in dieser Arbeit eingebracht wurde, um solche Veränderungen der Schmelzbadgeometrie zu provozieren, in realen Prozessen unrealistisch ist, so können andere Ursachen zu instabilen Schmelzbädern führen. Reijonen et al. [204] konnten beispielsweise Veränderungen der Schmelzbadgeometrie nachweisen, sobald Strömungsgeschwindigkeiten des Prozessgases verändert werden. Bei zu geringen Geschwindigkeiten wurden ähnliche Anomalien der Schmelzbäder nachgewiesen wie in diesen Untersuchungen vorgestellt. Auch von diesen Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass eine möglichst vollumfängliche Analyse von Prozessbedingungen erfolgen muss.

Schlussendlich zeigt sich, dass eine kombinierte Auswertung der Schmelzbadcharakteristika die Güte der Vorhersage erhöhen kann. Vergleiche der Parameter können angeführt werden, um Irregularitäten mehrfach zu bestätigen oder Fehldetektionen zu vermeiden.

5.4.3 Korrelation von Temperatur und Strahlungsintensitäten

Einen weiteren Ansatz zur Bestimmung von resultierenden Materialeigenschaften im PBF-LB/M stellt die Messung lokaler Temperaturen der Schmelzbäder und somit lokaler Abkühlgradienten dar. Anhand dieser können Rückschlüsse auf die Ausprägungen der Gefügeanteile getroffen werden. Besonders wenn Material amorph erstarren soll, besitzen die Abkühlraten eine übergeordnete Rolle für die Qualität, da kritische Abkühlraten überschritten werden müssen [205–207].

Temperaturmessungen werden bislang zumeist mit Pyrometern, Wärmebildkameras oder ähnlichen Sensoren durchgeführt, die infrarote Wellenlängen detektieren [28]. Mitchell et al. [118] nutzen zwei High-Speed-Kameras, um Emissionen in zwei schmalen ($\Delta\lambda = 50\ \text{nm}$) Wellenlängenbereichen aufzuzeichnen und mit dem Quotienten dieser Temperaturen des Schmelzbades ableiten zu können. Die räumliche Auflösung beträgt $21\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$ bei $6\,000 - 7\,000$ aufgezeichneten Bildern pro Sekunde.

In dem Ansatz, der in dieser Arbeit hergeleitet wird, wird lediglich eine High-Speed-Kamera eingesetzt. Dazu wird die Hardware wie in Unterabschnitt 4.4.4 beschrieben genutzt, der bislang verwendete Filter SP785 wird durch einen BP635 [208] ersetzt. Dadurch kann die Strahlungsemission über einem

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

schmaleren Wellenlängenbereich von $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ ausgewertet werden ($615 \text{ nm} \leq \lambda \leq 645 \text{ nm}$), siehe Abbildung 5-45. Dies ermöglicht eine verbesserte Auflösung bei höheren Intensitäten, vgl. Abbildung 2-12.

Zur Korrelation der Temperatur und der Intensität wird eine ex-situ-Kalibration des HSK-Systems durchgeführt, beschrieben in Unterabschnitt 4.4.4. Probekörper aus dem Material DEW Printdur 4404 werden unter Schutzgasatmosphäre mittels Induktionsspule in einem Glasrohr erhitzt. Die Messungen der Temperatur (Quotientenpyrometer) sowie der Strahlungsintensität (HSK-System) werden zeitgleich und an derselben Position auf der Probenoberfläche durchgeführt. Die Messung findet auf der As-built-Up-Skin-Fläche eines zylindrischen Probekörpers statt. Für die Erwärmung der Probe wird die Ausgangsleistung des Induktionsofens prozentual eingestellt, die Temperaturdifferenzen zwischen Messpunkten sind deshalb nicht konsistent. Die Temperaturmessung erfolgt $t = 60 \text{ s}$ nach jeder Anpassung der Ausgangsleistung, um eine Homogenisierung der Temperaturverteilung zu ermöglichen.

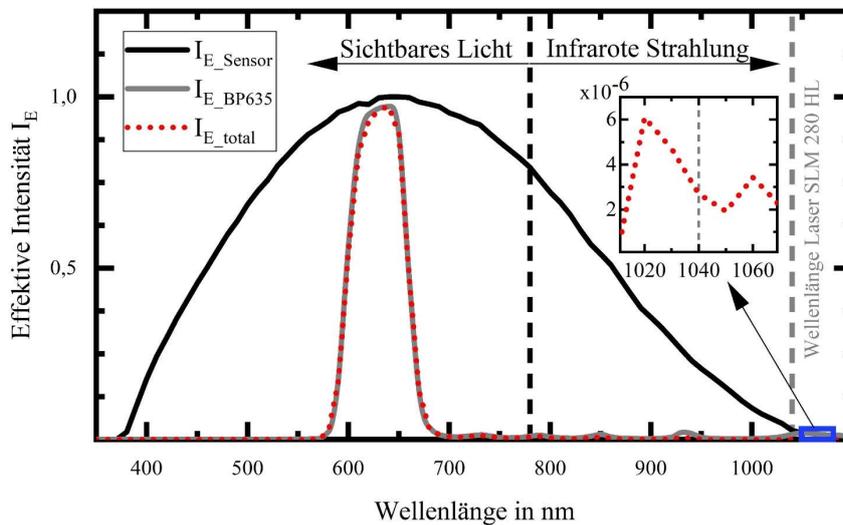


Abbildung 5-45: Transmission des Bandpassfilters BP635 I_{E_BP635} sowie die Detektierbarkeit von Intensitäten des Kamerasensors I_{E_Sensor} in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie die aus diesen beiden Werten resultierenden totalen Detektionsraten von Intensitäten I_{E_total} .

Innerhalb der Versuche wird die Belichtungszeit der High-Speed-Kamera in drei Stufen variiert, wobei die höchstmögliche und zwei Abstufungen genutzt werden (1: 2 000 ms; 2: 500 ms; 3: 100 ms). Durch die Anwendung besonders hoher Belichtungszeiten wird die detektierte Intensität länger integriert, sodass die Messgenauigkeit bei geringem Messsignal bzw. bei geringen Temperaturen gesteigert werden kann. Während der Versuche wurde eine maximale Temperatur von $1\,350 \text{ °C}$ definiert, um ein Aufschmelzen der Probekörper (Liquidustemperatur $1\,400 \text{ °C} - 1\,445 \text{ °C}$ [143–145]) zu verhindern. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-46 gezeigt, wobei die Strahlungsintensität über der Oberflächentemperatur aufgetragen ist.

Mit blauen Punkten ist der Verlauf der Intensität über den Temperaturen bei einer Belichtungszeit von 2 000 ms dargestellt. Ein Vergleich mit Daten bei geringeren Belichtungsdauern zeigt auf, dass Temperaturen in höheren Intensitäten resultieren. Im Bereich $800 \text{ °C} < T < 1\,200 \text{ °C}$ können die Temperaturen besser aufgelöst werden. Der Nachteil von – in Relation – langen Belichtungszeiten ist jedoch, dass die Auflösungsgrenze der Kamera schnell erreicht wird ($I = 255$). Solche Intensitäten weisen keine verwertbaren Informationen mehr auf, da nicht deutbar ist, wie hoch die reale Temperatur ist. Ein

solcher Fall ist durch die beiden rot umkreisten Datenpunkte bei einer Belichtungszeit von 2 000 ms ab ca. $T = 1\,300\text{ °C}$ dargestellt. Zur Herleitung einer Fit-Funktion für die Daten bei einer Belichtungszeit von 2 000 ms können diese beiden Datenpunkte somit nicht berücksichtigt werden.

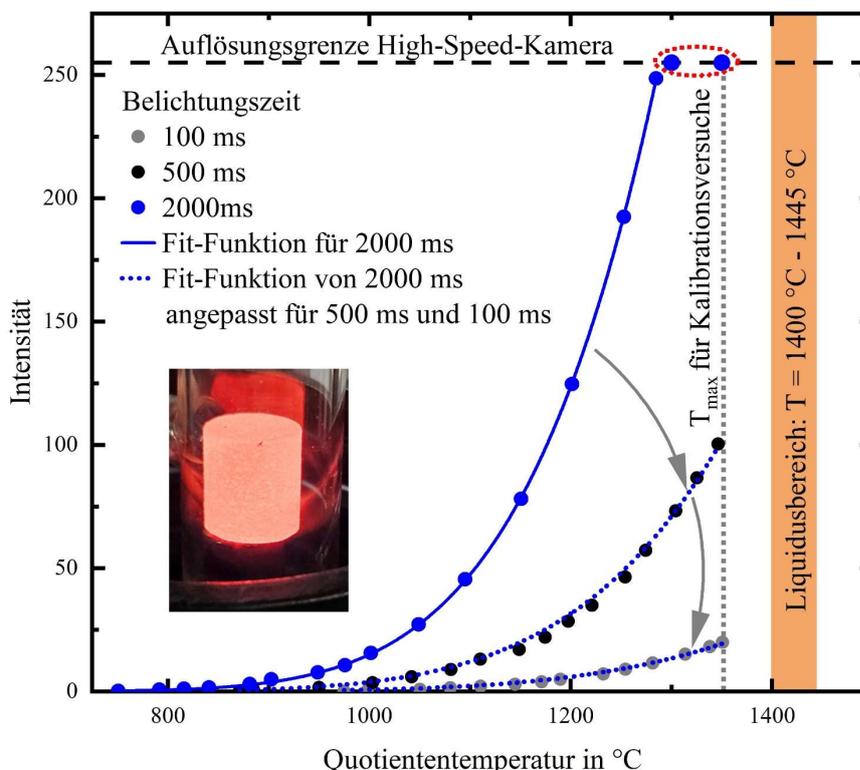


Abbildung 5-46: Mittels High-Speed-Kamera detektierte durchschnittliche Intensität aufgetragen über der mittels Quotientenpyrometer gemessenen Temperatur an der gleichen Position auf der Probe bei eingestellten Belichtungszeiten der High-Speed-Kamera von 100 ms, 500 ms, 2 000 ms; eine für 2 000 ms Belichtungszeit abgeleitete Fit-Funktion (blaue durchgängige Linie), die für die restlichen Belichtungszeiten (blaue unterbrochene Linien) angepasst wurde.

Zur Herleitung der Fit-Funktion wird das Planck'sche Strahlungsgesetz (Formel (2-6)) als Grundlage genutzt und wie in Formel (2-6) gezeigt parametrisiert. Da steter Wellenlängenbereich ausgewertet wird, wird die Wellenlänge λ als konstant angenommen und in die Konstanten a und b integriert.

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) dAd\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} dAd\lambda = I(T) = \frac{a}{e^{\frac{b}{T}} - 1} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (5-13)$$

mit: $a = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}$; $b = \frac{hc}{\lambda k}$

Durch Anwendung dieser Funktion für eine Belichtungszeit von 2 000 ms kann ein Wertepaar für die beiden Variablen bestimmt werden ($a = 4\,770\,146,38$; $b = 12\,670,73$), dabei ergibt sich ein $R^2 = 0,998$.

Zur Korrelation der Strahlungsintensitäten und Temperaturen bei den Belichtungszeiten 500 ms und 100 ms ist die Herleitung über die gleiche Formel möglich. Jedoch soll auf Basis der bereits bestehenden Fit-Funktion ein Ansatz entwickelt werden, durch welchen Temperaturen mit Strahlungsintensitäten in Abhängigkeit von der Belichtungsdauer korreliert werden können. Somit müsste das HSK-System nicht

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

für jede Belichtungsdauer korreliert werden. Dafür kann der Zusammenhang genutzt werden, dass die Werte der Intensität bei einzelnen Temperaturen in Abhängigkeit von der Belichtungszeit proportional zu- bzw. abnehmen. So bewirkt eine Reduktion der Belichtungszeit von 2 000 ms auf 500 ms nahezu genau eine Vierteilung des detektierten Intensitätswertes ($I_{2\,000}(948,9) = 7,8$; $I_{500}(950,1) = 1,9$; $I_{500}/I_{2\,000} = 0,247$). Das Verhältnis der Belichtungszeiten wird genutzt, um die Korrelationsfunktion zu ergänzen, und ergibt sich somit zu:

$$I(T) = \frac{a}{\frac{b}{e^T} - 1} * c \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (5-14)$$

mit: $a = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}$; $b = \frac{hc}{\lambda k}$ und $c = \frac{t_{Bel}}{t_{Fix}}$ mit $t_{Fix} = 2\,000\,ms$ und $t_{Bel} = var.$

Durch Anwendung von Funktion (5-14) sowie der Parameter a und b , die aus den Datenpunkten bei einer Belichtungszeit von 2 000 ms ermittelt wurden, ergeben sich die blau gestrichelt dargestellten Funktionen in Abbildung 5-46. Bereits optisch kann eine hohe Qualität der Korrelation abgeleitet werden, die durch hohe Bestimmtheitsmaße (500 ms: $R^2 = 0,995$; 100 ms: $R^2 = 0,996$) bestätigt werden kann. Mit der hergeleiteten Funktion lassen sich Temperaturen in Abhängigkeit von variierenden Belichtungsdauern bestimmen. Grafisch dargestellt sind die Daten für 100 ms, 49,8 ms und 24,8 ms im Anhang in Abbildung A 8. Für das System können Temperaturen zwischen 1 050 °C und maximal 2 325 °C ermittelt werden. Um die Intensitäten aus den Videos in Temperaturen umrechnen zu können, wird Formel (5-14) nach T in °C umgestellt, woraus sich Formel (5-15) ergibt.

$$T(I) = \frac{b}{\ln\left(\frac{a * c}{I} + 1\right)} [^{\circ}C] \quad (5-15)$$

mit: $a = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}$; $b = \frac{hc}{\lambda k}$ und $c = \frac{t_{Bel}}{t_{Fix}}$ mit $t_{Fix} = 2\,000\,ms$ und $t_{Bel} = 49,8\,ms$

Angewandt wird die entwickelte Methodik in dieser Arbeit abschließend an Einzelvektoren, die auf der SLM280 HL aus dem Material DEW Printdur 4404 mit Standardprozessparametern (vgl. Tabelle 5-11) gefertigt wurden. In Abbildung 5-47 sind die detektierten Temperaturverläufe während der Abkühlung für drei repräsentative Messpunkte bzw. Pixel über der Zeit in ms aufgetragen. Die maximale Temperatur, die in diesen Versuchen über die Intensität aufgelöst werden kann, beträgt $T_{max} = 2\,062\,^{\circ}C$ ($I = 255$), die geringste $T_{min} = 1\,084\,^{\circ}C$ ($I = 0$). Anhand der Temperaturverläufe können Einflüsse während der Belichtung des Materials abgeleitet werden. Besonders in Messung 3 ist zu Beginn ein deutlicher Abfall der Temperaturen ersichtlich, anschließend erfolgt ein erneuter Anstieg auf ca. 1 680 °C. Ein solcher Verlauf ist ohne eine erneute Einbringung von Energie nicht möglich, kann jedoch auf Prozessedukte wie Schmauch, Spratzer oder herumfliegende Pulverpartikel zurückgeführt werden, die den Messfleck verdecken und das Signal somit verringern. Grundlegend sind die zeitlichen Skalen zwischen maximal aufgelöster bis zum Erreichen der geringsten Temperatur in einem engen Rahmen. Die Abkühlraten, die anhand der Daten abgeleitet werden können, ergeben sich zu $1,26 \times 10^{-6}\,K/s$,

$1,41 \times 10^{-6} \text{ K/s}$ und $1,59 \times 10^{-6} \text{ K/s}$ und liegen somit in dem Wertebereich, der in der Literatur angegeben wird [79–82].

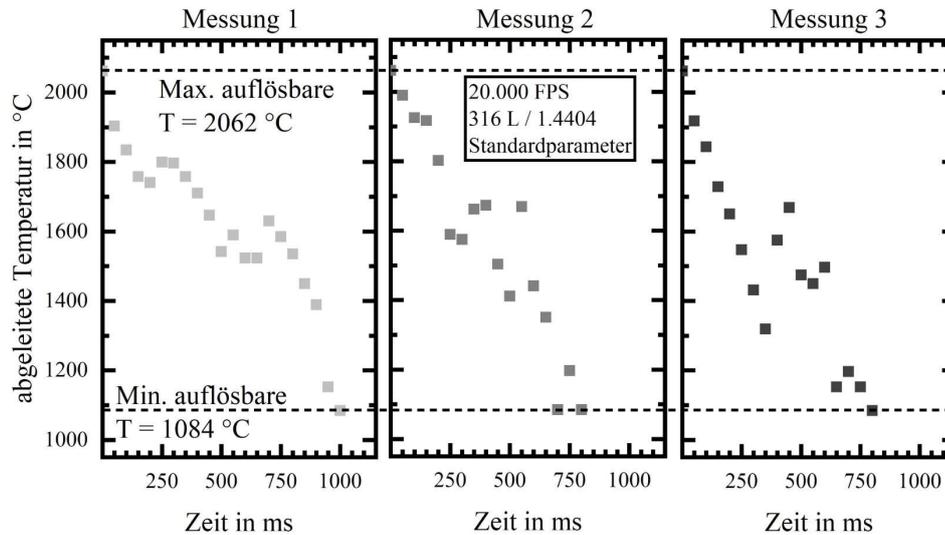


Abbildung 5-47: Umrechnung der mittels HSK-Systems ermittelten Intensitäten an drei Pixeln, die in der Mitte des Schmelzbades liegen.

Die Temperaturmessungen mittels HSK-Systems werden als validiert angesehen. Vertiefte Untersuchungen werden in dieser Arbeit nicht weiter vorgestellt, grundsätzlich können aus den Daten der Abkühl dauern wie in Abbildung 5-43 jedoch nun auch Heatmaps zu lokalen Abkühlraten hergeleitet werden. Dieser Wert lässt, besonders in Bezug auf die Ausprägung des Gefüges, deutlichere Schlüsse zu.

5.4.4 Zwischenfazit – Potenzial des HSK-Systems zur Detektion von Anomalien und Defekten

Die Erkenntnisse zur Analyse von Schmelzbadeigenschaften mit dem HSK-System lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Schmelzbadbreiten lassen sich in Abhängigkeit von einer – für jedes Material spezifischen – Intensität bestimmen. Abweichungen zwischen realen Schmelzbadbreiten und mit HSK-System bestimmten wurden bei Validierungsversuchen zwischen -1,68 % bei Erhöhung der Laserleistung um 60 % und 1,31 % bei einer Reduktion von 30 % ermittelt. Über die Schmelzbadbreiten kann auf die Art entstehender Defekte oder lokale Dichte geschlossen werden. Standardabweichungen der Breiten besitzen ein starkes Potenzial zur Bewertung von Schmelzbadanomalien.

Schmelzbadlängen werden in der Mitte des Schmelzbades bestimmt. Optisch bestimmte Längen weisen im Vergleich zu solchen, die mit HSK-System bestimmt wurden, eine Abweichung von 1,5 % auf. Zur Bestimmung wird eine weitere Intensität eingeführt, mit der die Erstarrung des Materials beschrieben wird. Schmelzbadlängen sind abhängig von der genutzten Laserleistung.

Abkühl dauern des Schmelzbades können genutzt werden, um Anomalien des Schmelzbades zu detektieren. Schmelzbad einschnürungen oder -ausläufer, ebenso wie lokale Materialanhäufungen oder -reduktionen, wie beim Balling, können detektiert und sichtbar gemacht werden. Da nur Pixel der Schmelzbahn analysiert werden, kann anhand der Daten ein Rückschluss auf die Schmelzbadoberfläche erfolgen.

5.4 In-situ-Monitoring mittels High-Speed-Videographie

Korrelationen der Intensitäten mit Temperaturen werden in dieser Arbeit als Ansatz dargestellt. Die Temperaturkorrelation wird erfolgreich an einem ex-situ-Prüfstand durchgeführt. Lokale Temperaturen lassen sich bestimmen, wodurch auch Rückschlüsse auf Abkühlgradienten erfolgen können. Die ermittelten Abkühlraten in dieser Arbeit entsprechen denen, die in der Literatur veröffentlicht wurden. Der Ansatz zur Temperaturmessung mit einem einzelnen CMOS-Sensor im PBF-LB/M-Verfahren zeigt vielversprechende Ergebnisse und scheint in der Literatur bisher einzigartig zu sein. Ebenso stellt dieser einen kostengünstigeren Ansatz dar als der von Hooper [209], der zwei High-Speed-Kameras nutzt, um Schmelzbademissionen in zwei schmalen Wellenlängenbereichen zu detektieren und aus deren Quotienten die Temperatur abzuleiten.

Auch wenn das Potenzial des vorgestellten HSK-Systems zur Detektion von Anomalien hoch ist, so ist dieses aufgrund der gewählten Positionierung nicht geeignet, um den gesamten Prozess bzw. den gesamten Bauraum vollständig zu monitoren. Um dies zu ermöglichen, könnte beispielsweise eine Integration in den Strahlengang erfolgen, womit jedoch Verluste der räumlichen Auflösung einhergehen würden. Aber auch durch Anpassungen des Systems, durch Optimierung der genutzten Objektive, sind die produzierten Datenmengen hoch und Auswertungen dieser herausfordernd. Aktuell werden für die Analyse einer Einzelspur mit einer Länge von 1,29 mm bei Aufnahmezeiten von 40 000 FPS Videos mit 8 MB aufgezeichnet. Je nach Probenanzahl könnten sich Datenmengen im Terabyte-Bereich ergeben, die ausgewertet werden müssten. Echtzeit-Messungen sind zusätzlich bislang nicht möglich.

Auch wenn eine direkte Anwendung als Prozessmonitoring-System somit bislang ebenfalls nicht möglich ist, so kann das entwickelte System für Grundlagenforschung genutzt werden. Es können beispielsweise lokale Phänomene betrachtet werden. Dazu kann unter anderem die Verarbeitung von Grundmaterial zählen, welches mit Diamanten additiviert wurde. Mittels HSK-Systemen können die Verteilung sowie Temperaturgradienten, die zu Denaturierungen dieser führen können, analysiert werden [178, 210, 211]. Ebenfalls sind Temperaturgradienten von Materialien analysierbar, deren Eigenschaften deutlich von diesen abhängen, zu nennen sind Materialien der Klasse der ‚amorphen Metalle‘ [206, 207, 212]. Zusätzlich bieten sich Möglichkeiten zur Validierung von bspw. Schmelzbadsimulationen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

6.1 AUSWIRKUNGEN VON DEFEKTEN AUF MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von Defekten auf die mechanischen Eigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Probekörper untersucht. Am martensitischen Material EOS GP1 wurde nachgewiesen, dass geringe Abweichungen der relativen Dichte, durch ansteigende Anteile von LoF-Defekten im gesamten Volumen, einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen. Bereits durch Reduktionen der Dichte von 99,98 % auf 99,82 % wird die maximale Zugfestigkeit R_m um 14,5 % reduziert, die Bruchdehnung A nimmt sogar um 39,2 % ab. Die durchschnittliche Größe der Defekte beträgt $47 \pm 101 \mu\text{m}^2$, wobei diese durchschnittlich 26-mal pro mm^2 auftreten. Dichten oberhalb von 99,89 %, durchschnittlich 9 Defekte je mm^2 mit einer Fläche von $47 \pm 52 \mu\text{m}^2$, haben einen geringeren Einfluss (R_m : -1,02 %; A : -1,12 %) und gelten als tolerierbar. Anhand hoher Standardabweichungen bei Dichten unterhalb 99,89 % kann abgeleitet werden, dass neben der Defektgröße und -anzahl die Defektposition einen entscheidenden Einfluss auf die Kennwerte besitzt. In Versuchen, bei denen LoF-Defekte in definierten Volumen (relative Dichte 90,57 %), mittig in Zugproben positioniert, provoziert wurden, kann nachgewiesen werden, dass lediglich der Querschnitt des defektfreien Materials (99,98 % Dichte) die maximale Zugfestigkeit der Probekörper bestimmt. Es wird gezeigt, dass die Zugfestigkeit besonders von der Position der LoF-Defekte beeinflusst wird, die Bruchdehnung von der Anzahl und Fläche der Defekte. Der Einfluss von Defekten auf mechanische Eigenschaften in vertikaler Richtung ist um den Faktor 1,4 höher als in horizontaler. In Versuchen, in denen die Position von LoF-Defekten in Zugstäben untersucht wird, kann gezeigt werden, dass diese einen höheren Einfluss besitzt als die Größe des defektbehafteten Volumens. Eine Verschiebung in Richtung Probenoberfläche bewirkt Reduktionen der maximalen Zugfestigkeiten um 30,7 %, eine Verdopplung der Defektfläche mittig im Probekörper hingegen um -28,4 %.

Weiterhin kann aufgezeigt werden, dass die Form der Defekte einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzt. Defekte, die durch Boole'sche Operationen in Probekörper eingebracht werden, wodurch die relative Dichte auf 97,30 % (vertikale Probekörper) reduziert wird, besitzen keinen eindeutigen Einfluss (-0,24 %) auf die maximalen Zugfestigkeiten. Zurückgeführt wird dies auf durch die Defekte hervorgerufene mehraxiale Spannungszustände.

Am austenitischen Material DEW Printdur 4404 (316L bzw. 14404) wurden Defekte in Zugproben durch Boole'sche Operationen mit Quadern (Kantenlänge 0,75 mm; $\rho_{th} = 97,33 \%$) hervorgerufen. Die Position der Defekte in Relation zur Oberfläche wurde dabei variiert. Die maximale Zugfestigkeit wird nur geringfügig beeinflusst (-0,17 % – vertikale Ausrichtung), wenn der Defekt mittig in der Zugprobe provoziert wird. Verschiebungen der Defekte um 1,79 mm in Richtung der Oberfläche verringern die maximale Zugfestigkeit lediglich um insgesamt -0,71 %. Die Bruchdehnung hingegen wird um bis zu 70,88 % reduziert.

6.2 Potenziale von Messmethoden zur in-situ-Defektdetektion

Dauerschwingversuche an horizontal gefertigten Probekörpern aus 316L zeigen, dass deutliche Beeinflussungen der Dauerfestigkeiten von den Defektgrößen ausgehen. Defekte mit einer Kantenlänge im CAD-Modell von 0,3 mm ($\rho_{th} = 99,62\%$) reduzieren die Dauerfestigkeit um ca. 22 %. Bei Probekörpern mit einer verbleibenden Dichte von $\rho_{th} = 89,08\%$ verbleibt eine durchschnittliche Dauerfestigkeit von 8,75 %. Weitere Untersuchungen mit Stern [188] zeigen, dass die Dauerfestigkeit ebenso von der Position der Defekte beeinflusst wird.

Für die wissenschaftlichen Fragestellungen aus Abschnitt 3.1 gilt:

- Der Einfluss, den die Defektposition auf die mechanischen Eigenschaften PBF-LB/M-gefertigter Produkte besitzt, übersteigt den Einfluss der Defektgröße.
- Mechanische Eigenschaften werden in vertikaler Belastungsrichtung stärker durch Defekte beeinflusst als in horizontaler Richtung.
- Bruchdehnungen und Dauerfestigkeiten werden stärker durch Defekte beeinflusst als maximale Zugfestigkeiten.
- Defekte, die durch Boole'sche Operationen hervorgerufen werden, können nicht als Substitution von stochastisch verteilten LoF-Defekten genutzt werden.
- Anzahl, Größe und insbesondere Position von tolerierbaren Defekten müssen anhand des Anwendungsfalles (statisch oder dynamisch) bewertet werden.

6.2 POTENZIALE VON MESSMETHODEN ZUR IN-SITU-DEFEKTDETEKTION

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Methoden zur in-situ-Analyse von Defekten angewandt: 1. die Laser-Speckle-Photometrie und 2. Emissionsmessungen des Schmelzbades mittels CMOS-Sensors einer High-Speed-Kamera (HSK).

Das LSP-Signal ist abhängig von Prozessbedingungen des PBF-LB/M-Verfahrens, ebenso wie von der Ausleuchtung des Bildbereiches. LSP-Messungen finden zur Steigerung der Reproduzierbarkeit in einer zusätzlichen Belichtungsphase statt, in der das Material möglichst stark angeregt, jedoch nicht aufgeschmolzen wird. Eine entwickelte Normierung entkoppelt die Abhängigkeit des LSP-Signals von der initialen Ausleuchtung des Bildbereiches. Varianzen der Daten, ermittelt an Referenzmaterial, können dadurch von 11,18 % auf 2,19 % gesenkt werden.

Es wird nachgewiesen, dass das LSP-Signal mit relativen Dichten von Probekörpern korreliert werden kann, wenn Bildbereiche von 2 mm x 2 mm analysiert werden. Das LSP-Signal steigt mit abnehmender Dichte, zurückzuführen ist dies auf sinkende lokale Steifigkeiten. Zusätzlich kann eine höhere Temperaturdifferenz durch die Anregung von Material mit geringerer Dichte detektiert werden, da eine konstante Energie in ein geringeres Materialvolumen eingebracht wird [189]. Beide Effekte führen zu erhöhten Ausdehnungen der Proben. Der Zusammenhang zwischen dem LSP-Signal und der Dichte kann durch eine rationale Funktion dargestellt werden. Die höchste Steigung der Funktion kann im Bereich hoher Dichten, nahe $\rho_{rel} = 99,98\%$ ($C(39) = 0,57$), ausgemacht werden, gleichbedeutend mit einer

hohen Sensitivität. Besonders im Hinblick auf die starke Beeinflussung mechanischer Kennwerte durch bereits geringe Dichteschwankungen ist dies als sehr positiv zu bewerten. Proben mit der geringsten relativen Dichte von $\rho_{rel} = 90,57\%$ weisen einen LSP-Wert von $C(39) = 0,97$ auf, eine Differenz von 0,4 zu nahezu dichtem Material bzw. relativ 70,18 % Steigerung.

Durch Einbringung von Defekten mit Boole'schen Operationen, Vorhersagen der erwarteten LSP-Signale in Abhängigkeit von den Defektausprägungen und mCT-Analysen der untersuchten Probekörper wird die Fähigkeit des LSP-Systems geprüft, kleine Defekte zu detektieren. Das Auftreten von Defekten mit einer Querschnittsfläche von $A_{xy} = 0,39 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ in der Auswerteebene kann mit hoher Präzision und lediglich geringen Abweichungen des LSP-Signals von -1,29 %, 0 % und 2,49 % zum vorhergesagten Wert bestimmt werden. Die Präzision zur Vorhersage der LSP-Werte für große Defekte ($A_{xy} = 2,79 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$) ist mit Abweichungen von 269,99 %; 13,33 %; 247,09 % als gering zu beschreiben. Die Fit-Funktion, mit der die Vorhersage der LSP-Werte vorgenommen wird, wurde jedoch nicht für die relativ geringen Dichten hergeleitet, die durch die Einbringung der Defekte entstehen. Ebenso wird Oberflächentopografie durch große Defekte beeinflusst, wodurch Über- und Unterbelichtungen im Bildbereich entstehen, die weniger Änderungen bei Anregungen aufweisen. Trotz der Abweichung der LSP-Signale kann das Auftreten von Defekten in jedem Fall bestimmt werden.

Um bewerten zu können, ob die Position der Defekte bestimmt werden kann, wurden Größen von Auswertebereichen manuell verringert – solche Auswertungen sind bislang nicht in der Software vorgesehen. Die Verkleinerung von Messbereichen führt theoretisch zu einer Erhöhung der lokalen Auflösung, resultiert aber auch zeitgleich in einer Reduktion der auswertbaren Datenmenge je Bereich. Es zeigt sich, dass lediglich 4 von 11 Detektionen von Defekten korrekt sind. Somit ergibt sich eine Fehlerquote von 63,63 %. Eine lokale Bestimmung von Defekten ist in der aktuellen Version des LSP-Systems nicht möglich.

Für die LSP-Methode können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Eine Korrelation zwischen dem LSP-Signal und Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten ist möglich. Das Ableiten von relativen Dichten vom LSP-Signal ist – in Grenzen – möglich, dabei konnte die Detektierbarkeit von Defekten mit einer Kantenlänge von ca. 60,54 μm und größer nachgewiesen werden.
- Eine Auflösung der Position von Defekten ist bislang nicht möglich. Dies wird auf die begrenzte zeitliche und räumliche Auflösung des Systems zurückgeführt.

Die zweite Methode, Defekte in situ detektieren zu können, basiert auf der Analyse von Emissionen der Schmelzbäder von Einzelspuren. Mit der Hardware, Software und Positionierung des Systems gelingt es, höchste in der Literatur bekannte Auflösungen des Schmelzbades in zeitlicher (bis zu 800 000 FPS) und räumlicher (1,44 μm Kantenlänge je Pixel) Hinsicht zu erreichen – besonders in deren Kombination. Mit dem HSK-System gelingt die Analyse von Schmelzbahnbreiten, -längen, lokalen Abkühl dauern sowie von Temperaturen bzw. Abkühlraten. Dabei können Schmelzbadbreiten in den Versuchen mit

6.2 Potenziale von Messmethoden zur in-situ-Defektdetektion

einer Genauigkeit zwischen 1,31 % und -1,68 % bestimmt werden. Schmelzbadlängen können am Standardprozessparametersatz mit einer Genauigkeit von 1,5 % bestimmt werden. Abkühlauern werden lediglich im Schmelzbad analysiert, Einflüsse umherfliegender Partikel oder von Reflexionen können durch Filter minimiert werden. Mit Heatmaps, die von den Abkühlraten abgeleitet werden, können Schmelzbadeneigenschaften visualisiert werden, jedoch auch lokale Volumenänderungen der Schmelze, beispielsweise durch das Phänomen des Ballings, abgeleitet werden. Eine Kombination der drei beschriebenen Charakteristika hat ein hohes Potenzial, Defekte zu analysieren. Bislang erfolgten eine Auswertung und der Vergleich der Daten jedoch manuell.

Zusätzlich wird eine Methode vorgestellt, mit der eine Korrelation der Schmelzbadintensitäten und der realen Temperatur erfolgen kann. Exemplarisch wird die Korrelation für das Material DEW Printdur 4404 (316L) vorgestellt. An Einzelspuren, die in Versuchen ermittelt werden, können mit einer Auflösung von $1,44 \mu\text{m}$ pro Pixel Temperaturen des Schmelzbades bestimmt werden. Die durchschnittliche bestimmte Abkühlrate beträgt in den Versuchen mit Standardprozessparametern $1,42 \times 10^{-6} \text{ K/s}$. Die ableitbaren lokalen Abkühlraten können genutzt werden, um beispielsweise die Ausprägung von Materialgefügen zu untersuchen oder um Rückschlüsse auf die Zersetzung von Diamanten zu ziehen, die dem Grundmaterial zugesetzt wurden.

7 AUSBLICK

In dieser Arbeit konnte der Einfluss der Position und Größe von Lack-of-Fusion-Defekten (LoF) ebenso wie von gebooleten Defekten in Zugstäben nach DIN 50125 auf mechanische Eigenschaften nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse helfen, die Auswirkungen von Defekten besser verstehen zu können, jedoch müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um ein vollumfängliches Verständnis erlangen und mechanische Eigenschaften von Bauteilen vorhersagen zu können. Das Verfahren der Computertomografie kann dabei als zerstörungsfreie Prüfmethode angewandt werden, um dreidimensionale Abbildungen von bspw. Zugstäben zu erstellen. Nach anschließenden Zugversuchen können die resultierenden mechanischen Eigenschaften mit den aufgetretenen Defekten korreliert werden. Um die Auswertungen zu optimieren, eignen sich Methoden basierend auf künstlicher Intelligenz (KI). Mit ihnen wird eine automatisierte Verknüpfung der Daten und somit eine Vorhersage von Eigenschaften ermöglicht [213].

Weiterhin ist zu beachten, dass eine Übertragbarkeit der in dieser Arbeit erlangten Ergebnisse auf Strukturen und Geometrien, die dem typischen Komplexitätsgrad von PBF-LB/M-gefertigten Komponenten entsprechen, bislang nicht nachgewiesen wurde. Zu den Strukturen zählen beispielsweise bionische Strukturen, Gitter oder dünnwandige Geometrien. Simulationen, mit denen der Einfluss und die grundlegenden Mechanismen der Strukturschwächungen, die durch Defekte hervorgerufen werden, bestimmt werden können, stellen einen Ansatz dar, um den Einfluss geometrieübergreifend bestimmen zu können. Auch muss die Analyse der Materialeigenschaften je nach Anwendungsgebiet der gefertigten Komponenten erweitert werden. Beispiele können mit Druck beaufschlagte Fließkanäle oder Druckbehälter für Materialien in der flüssigen oder gasförmigen Phase sein. Dafür müssten besonders die resultierenden Druckfestigkeiten untersucht werden. In diesem Gebiet bestehen noch keine Richtlinien, wie Prüfungen von PBF-LB/M-gefertigten Komponenten durchgeführt werden müssen oder welche Wandstärken für welche Drücke genutzt werden müssen. Dies liegt auch an der variierenden geometrischen Form, die zumeist nicht einem Rohrquerschnitt entspricht, sondern für die Fertigungsprozesse, aber auch die Anwendung optimiert ist. Ebenso ist der Einfluss von Defekten auf diese Eigenschaft noch nicht bekannt. Ziel muss es weiterhin sein, Methoden zu entwickeln, mit denen tolerierbare Defektgrößen und -positionen für Bauteile bestimmt werden können, unabhängig von Randfaktoren wie dem genutzten Material oder der Fertigungsanlage. Dabei besitzt nicht nur die Größe des Defektes einen Einfluss, sondern vielmehr auch die Form und die Ursache der Defektausprägung. Lokal variierte Änderungen der Mikrostruktur, hervorgerufen durch lokal veränderte Temperaturhistorien, haben ebenso einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen.

Die Entwicklung von Prozessmonitoring-Systemen muss weiter vorangetrieben werden, um die Zuverlässigkeit dieser zu optimieren und somit eine Reduktion von Stückkosten von PBF-LB/M-Komponenten, durch Reduktionen notwendiger Qualitätssicherungsprozesse, wie des mCT, realisieren zu können. Die Laser-Speckle-Photometrie (LSP) hat sich als potentes Verfahren herausgestellt, wobei durch

7 Ausblick

Optimierungen des Verfahrens deutliche Steigerungen der Reproduzierbarkeit und Detektierbarkeit von Defekten möglich scheinen. Die Potenziale zur Steigerung der Fähigkeit der LSP werden in die Bereiche Hardware, Positionierung und Software unterteilt. Die Hardware muss so angepasst werden, dass zeitlich und räumlich höhere Auflösungen realisierbar sind, besonders wenn LSP-Messungen während der Belichtung der Bauteile durchgeführt werden sollen – Scangeschwindigkeiten sind dabei 3,33-mal höher als in den Laborversuchen. Wenn die Messungen während der Belichtung zur Fertigung der Komponenten erfolgen sollen, muss weiterhin eine Anpassung der Software vorgenommen werden. Mit dieser können automatisiert bislang nur relativ große Bereiche analysiert werden, lokale Detektionen von Defekten sind somit nur eingeschränkt durchführbar. Außerdem ist es essenziell, die Software zu befähigen, Prozessprodukte automatisiert zu bestimmen und die dadurch hervorgehenden Änderungen des LSP-Messsignals zu minimieren. Da die Messungen mittels HSK-Systems gezeigt haben, welches Potenzial in der Analyse von Schmelzbadcharakteristika wie Breite, Länge oder Abkühl dauern liegt, wäre eine Implementation solcher Analysen in die LSP-Messung sinnvoll. Weitere Potenziale zur Steigerung der Fähigkeit der LSP-Methode liegen in der Positionierung des Messsystems. Eine Integration in den Bau- raum oder den Strahlengang der Fertigungsanlagen würde eine verbesserte Ausrichtung des Sensors zur Oberfläche ermöglichen und den Einfluss des Betrachtungswinkels reduzieren.

Auch zur Auswertung der Messsignale der LSP- oder HSK-Messungen bieten sich Auswertungen mittels KI-Modellen an, um die großen Datenmengen zu bewältigen. Dabei ist das Zusammenführen möglichst vieler die Qualität beeinflussender Daten sinnhaft, wie Sauerstoffgehalte, Pulverfeuchtigkeit, Häufigkeit der Wiederverwertung des Materials, Prozessgasgeschwindigkeiten, aber auch Temperaturhistorien der Bauteile während der Fertigung.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Brandt, Ed., *Laser additive manufacturing: Materials, design, technologies, and applications*. Oxford: Woodhead Publishing, 2016.
- [2] H. A. Richard, *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4838322>
- [3] R. Lachmayer, T. Ehlers, and R. B. Lippert, *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022.
- [4] T. Wohlers, R. I. Campbell, O. Diegel, R. Huff, and J. Kowen, *Wohlers report 2023: 3D printing and additive manufacturing : global state of the industry*. [Fort Collins, Colo.], Washington,DC: Wohlers Associates; ASTM International, 2023.
- [5] Y. Zhang, S. Jedeck, L. Yang, and L. Bai, "Modeling and analysis of the on-demand spare parts supply using additive manufacturing," *RPJ*, vol. 25, no. 3, pp. 473–487, 2019, doi: 10.1108/RPJ-01-2018-0027.
- [6] Y. Kok *et al.*, "Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review," *Materials & Design*, vol. 139, pp. 565–586, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.
- [7] J. J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 151–186, 2016, doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024.
- [8] DIN EN ISO/ASTM, "DIN EN ISO/ASTM 52900 PBF-LB/M: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie,"
- [9] P. Block, J. Knippers, N. J. Mitra, and W. Wang, Eds., *Advances in Architectural Geometry 2014*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [10] R. Hölker-Jäger and A. E. Tekkaya, "Additive manufacture of tools and dies for metal forming," in *Laser Additive Manufacturing*: Elsevier, 2017, pp. 439–464.
- [11] A. Nouri, A. Rohani Shirvan, Y. Li, and C. Wen, "Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 94, pp. 196–215, 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2021.03.058.
- [12] B. Blakey-Milner *et al.*, "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [13] A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, and K. Hayward, "Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1213, 2021, doi: 10.3390/app11031213.
- [14] E. M. Sefene, "State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 63, pp. 250–274, 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.04.002.

8 Literaturverzeichnis

- [15] M. Munsch, "Laser additive manufacturing of customized prosthetics and implants for biomedical applications," in *Laser Additive Manufacturing*: Elsevier, 2017, pp. 399–420.
- [16] R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, and J. Newkirk, "Aerospace applications of laser additive manufacturing," in *Laser Additive Manufacturing*: Elsevier, 2017, pp. 351–371.
- [17] *Medizinprodukte - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen für regulatorische Zwecke*, ISO 13485:2016, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dec. 2021.
- [18] *Biologische Beurteilung von Medizinprodukten - Teil 1: Beurteilung und Prüfungen im Rahmen eines Risikomanagementsystems*, DIN EN ISO 10993, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., May. 2021.
- [19] T. Herzog, M. Brandt, A. Trinchi, A. Sola, and A. Molotnikov, "Process monitoring and machine learning for defect detection in laser-based metal additive manufacturing," *J Intell Manuf*, vol. 35, no. 4, pp. 1407–1437, 2024, doi: 10.1007/s10845-023-02119-y.
- [20] S. Chowdhury *et al.*, "Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2109–2172, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.121.
- [21] A. Du Plessis, I. Yadroitsava, and I. Yadroitsev, "Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights," *Materials & Design*, vol. 187, p. 108385, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108385.
- [22] I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, A. Du Plessis, and E. MacDonald, Eds., *Fundamentals of laser powder bed fusion of metals*. Amsterdam, Kidlington, Oxford, Cambridge, MA: Elsevier, 2021.
- [23] B. Zhang, Y. Li, and Q. Bai, "Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 515–527, 2017, doi: 10.1007/s10033-017-0121-5.
- [24] J. V. Gordon *et al.*, "Defect structure process maps for laser powder bed fusion additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101552, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101552.
- [25] J. T. Sehr, *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation. Aachen: Shaker, 2010.
- [26] X. Peng, L. Kong, H. An, and G. Dong, "A Review of In Situ Defect Detection and Monitoring Technologies in Selective Laser Melting," *3D printing and additive manufacturing*, vol. 10, no. 3, pp. 438–466, 2023, doi: 10.1089/3dp.2021.0114.
- [27] B. Wu *et al.*, "In situ monitoring methods for selective laser melting additive manufacturing process based on images — A review," *China Foundry*, vol. 18, no. 4, pp. 265–285, 2021, doi: 10.1007/s41230-021-1111-x.
- [28] M. Grasso, A. Remani, A. Dickins, B. M. Colosimo, and R. K. Leach, "In-situ measurement and monitoring methods for metal powder bed fusion: an updated review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 11, p. 112001, 2021, doi: 10.1088/1361-6501/ac0b6b.

- [29] Y. AbouelNour and N. Gupta, "In-situ monitoring of sub-surface and internal defects in additive manufacturing: A review," *Materials & Design*, vol. 222, p. 111063, 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111063.
- [30] S. Clijsters, T. Craeghs, S. Buls, K. Kempen, and J.-P. Kruth, "In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 75, 5-8, pp. 1089–1101, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6214-8.
- [31] M. Armstrong, H. Mehrabi, and N. Naveed, "An overview of modern metal additive manufacturing technology," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 84, pp. 1001–1029, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
- [32] Y. Cai, J. Xiong, H. Chen, and G. Zhang, "A review of in-situ monitoring and process control system in metal-based laser additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 70, pp. 309–326, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.018.
- [33] M. C. Brennan, J. S. Keist, and T. A. Palmer, "Defects in Metal Additive Manufacturing Processes," *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 30, no. 7, pp. 4808–4818, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05919-6.
- [34] *Gießereiwesen – Magnetpulverprüfung*, DIN EN 1369:2012, DIN-Normenausschuss Gießereiwesen (GINA).
- [35] *Steel and iron castings — Visual testing of surface quality*, ISO 11971:2020(E), ISO copyright office.
- [36] *Ventile - Geflanscht, mit Gewinde und Vorschweißende*, ANSI/ASME B 16.34, American National Standards Institute.
- [37] *Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (50.8 mm) in Thickness*, ASTM E 446:2020, American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [38] T. Sugiyama, M. Araie, C. E. Riva, L. Schmetterer, and S. Orgul, "Use of laser speckle flowgraphy in ocular blood flow research," *Acta ophthalmologica*, vol. 88, no. 7, pp. 723–729, 2010, doi: 10.1111/j.1755-3768.2009.01586.x.
- [39] C. Schott, J. Steingroewer, T. Bley, U. Cikalova, and B. Bendjus, "Biospeckle-characterization of hairy root cultures using laser speckle photometry," *Engineering in life sciences*, vol. 20, no. 7, pp. 287–295, 2020, doi: 10.1002/elsc.201900161.
- [40] U. Cikalova, B. Bendjus, T. Stüwe, and R. V. Reyes de Acosta, "Defect detection during laser welding by laser speckle photometry," in *Speckle 2018: VII International Conference on Speckle Metrology*, Janów Podlaski, Poland, Sep. 2018 - Sep. 2018, p. 13. [Online]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10834/2318535/Defect-detection-during-laser-welding-by-laser-speckle-photometry/10.1117/12.2318535.full>
- [41] L. Chen, U. Cikalova, B. Bendjus, S. Muench, and M. Roellig, "Characterization of ceramics based on laser speckle photometry," *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 345–354, 2020, doi: 10.5194/jsss-9-345-2020.

8 Literaturverzeichnis

- [42] B. Bendjus, U. Cikalova, C. Schott, J. Steingroewer, T. Bley, T. Werner, "Determination of Biomass in Biotechnological Processes by Laser-Speckle-Photometry," in *19th World Conference on Non-Destructive Testing*.
- [43] S. Muench, M. Roellig, U. Cikalova, B. Bendjus, L. Chen, and S. Sudip, "A laser speckle photometry based non-destructive method for measuring stress conditions in direct-copper-bonded ceramics for power electronic application," in *2017 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, Dresden, Germany, 2017, pp. 1–8.
- [44] J. van Welzen, F. G. Yuan, and R. Y. Fong, "Hidden damage visualization using laser speckle photometry," *NDT & E International*, vol. 131, p. 102700, 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2022.102700.
- [45] U. Cikalova, B. Bendjus, S. Roy Sudip, L. Chen, "Laser Speckle Photometry (LSP) - Optical Sensor System for Monitoring of Material Condition and Processing," *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, Vol. 21(7), 2016.
- [46] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.," No. 4,575,330.
- [47] S. Crump, "Apparatus and Method for Creating Three-dimensional Objects," No. 5,121,329.
- [48] C. R. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering.," No. 4,863,538.
- [49] M. Feygin, "Laminated object manufacturing.," No. 4,752,352.
- [50] J. Manriquez-Frayre, and D. Bourell, "Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder," 1990.
- [51] *Understanding additive manufacturing: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. Munich, Cincinnati: Hanser Publishers, 2012.
- [52] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [53] A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [54] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [55] N. N., "DIN EN ISO/ASTM 52911-1:2020-05, Additive Fertigung – Konstruktion – Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (ISO/ASTM 52911-1:2019); 2019); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52911-1:2019," 2020.
- [56] N. N., "DIN EN ISO 17296-2:2016-12, Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO 17296-2:2015), 2015); Deutsche Fassung EN ISO 17296-2:2016," 2016.
- [57] W. Associates, *Wohlers report 2022: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry*. Fort Collins (Colo.): Wohlers Associates, 2022.

- [58] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [59] G. R. Kumar *et al.*, "Metal additive manufacturing of commercial aerospace components – A comprehensive review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 237, no. 2, pp. 441–454, 2023, doi: 10.1177/09544089221104070.
- [60] *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung; Deutsche und Englische Fassung EN 9100:2018: Qualitätsmanagementsysteme*, DIN EN 9100, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Aug. 2018.
- [61] V. Seyda, *Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [62] D. Jansen, T. Hanemann, M. Radek, A. Rota, J. Schröpfer, and M. Heilmaier, "Development of actual powder layer height depending on nominal layer thicknesses and selection of laser parameters," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 298, p. 117305, 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117305.
- [63] R. Poprawe, *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur; mit 26 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [64] A. Ladewig, G. Schlick, M. Fisser, V. Schulze, and U. Glatzel, "Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process," *Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.01.004.
- [65] F. Dorsch and S. Kaierle, Eds., *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*: SPIE, 2016.
- [66] C. Panwisawas, Y. T. Tang, and R. C. Reed, "Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys," *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 2327, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16188-7.
- [67] E. Pei *et al.*, *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [68] W. Meiners, *Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. Technische Hochschule Aachen, Dissertation. Aachen: Shaker, 1999.
- [69] R. Nandhakumar and K. Venkatesan, "A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness," *Materials Today Communications*, vol. 35, p. 105538, 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105538.
- [70] E. Beyer *et al.*, "High-power laser materials processing," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Anaheim, California, USA, 2012, pp. 1–10.

8 Literaturverzeichnis

- [71] M. A. Buhairi *et al.*, "Review on volumetric energy density: influence on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V manufactured via laser powder bed fusion," *Prog Addit Manuf*, vol. 8, no. 2, pp. 265–283, 2023, doi: 10.1007/s40964-022-00328-0.
- [72] R. Zhao *et al.*, "On the role of volumetric energy density in the microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion Ti-6Al-4V alloy," *Additive Manufacturing*, vol. 51, p. 102605, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102605.
- [73] M. Schneider *et al.*, "Reproducibility and Scattering in Additive Manufacturing: Results from a Round Robin on PBF-LB/M AlSi10Mg Alloy," *Practical Metallography*, vol. 59, no. 10, pp. 580–614, 2022, doi: 10.1515/pm-2022-1018.
- [74] T. Kurzynowski, W. Stopyra, K. Gruber, G. Ziółkowski, B. Kuźnicka, and E. Chlebus, "Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLM-ed H13 Steel in Relation to Specimen Size," *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 12, no. 2, 2019, doi: 10.3390/ma12020239.
- [75] A. Keshavarzkermani *et al.*, "An investigation into the effect of process parameters on melt pool geometry, cell spacing, and grain refinement during laser powder bed fusion," *Optics & Laser Technology*, vol. 116, pp. 83–91, 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.03.012.
- [76] S. Afkhami, M. Dabiri, S. H. Alavi, T. Björk, and A. Salminen, "Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting," *International Journal of Fatigue*, vol. 122, pp. 72–83, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.029.
- [77] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, and J. Ma, "Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 193, p. 108762, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108762.
- [78] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, and B. Stucker, "Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes," *Additive Manufacturing*, 1-4, pp. 87–98, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.002.
- [79] I. A. Roberts, C. J. Wang, R. Esterlein, M. Stanford, and D. J. Mynors, "A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, 12-13, pp. 916–923, 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.004.
- [80] Y. Li and D. Gu, "Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 856–867, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.006.
- [81] U. Scipioni Bertoli, G. Guss, S. Wu, M. J. Matthews, and J. M. Schoenung, "In-situ characterization of laser-powder interaction and cooling rates through high-speed imaging of powder bed fusion additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 135, pp. 385–396, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.09.044.
- [82] D. L. Wenzler, K. Bergmeier, S. Baehr, J. Diller, and M. F. Zaeh, "A Novel Methodology for the Thermographic Cooling Rate Measurement during Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser

- Beam," *Integrating materials and manufacturing innovation*, vol. 12, no. 1, pp. 41–51, 2023, doi: 10.1007/s40192-023-00291-w.
- [83] H.-Z. Jiang *et al.*, "Effect of Process Parameters on Defects, Melt Pool Shape, Microstructure, and Tensile Behavior of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting," *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, vol. 34, no. 4, pp. 495–510, 2021, doi: 10.1007/s40195-020-01143-8.
- [84] A. Kidess, S. Kenjereš, B. W. Righolt, and C. R. Kleijn, "Marangoni driven turbulence in high energy surface melting processes," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 104, pp. 412–422, 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.015.
- [85] S. A. Khairallah, A. T. Anderson, A. Rubenchik, and W. E. King, "Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones," *Acta Materialia*, vol. 108, pp. 36–45, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.
- [86] V. e. V, "VDI Richtlinie 3405 Blatt 2.8 - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl: Fehlerkatalog – Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen," 2022.
- [87] S. Kleszczynski and A. Elspaß, "Influence of isolated structural defects on the static mechanical properties of PBF-LB/M components," *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 188–193, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.036.
- [88] F. Stern *et al.*, "Influence assessment of artificial defects on the fatigue behavior of additively manufactured stainless steel 316LVM," *Procedia Structural Integrity*, vol. 37, pp. 153–158, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.01.071.
- [89] S. Tammam-Williams, H. Zhao, F. Léonard, F. Derguti, I. Todd, and P. B. Prangnell, "XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting," *Materials Characterization*, vol. 102, pp. 47–61, 2015, doi: 10.1016/j.matchar.2015.02.008.
- [90] I. Segovia Ramírez, F. P. García Márquez, and M. Papaelias, "Review on additive manufacturing and non-destructive testing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 66, pp. 260–286, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.12.005.
- [91] J. Elambasseril *et al.*, "3D characterization of defects in deep-powder-bed manufactured Ti–6Al–4V and their influence on tensile properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 761, p. 138031, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.138031.
- [92] The MathWorks, Inc., *Measure properties of image regions - MATLAB regionprops - MathWorks Deutschland*. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html> (accessed: Dec. 18 2023).
- [93] A. Y. Al-Maharma, S. P. Patil, and B. Markert, "Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 12, p. 122001, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/abcc5d.

8 Literaturverzeichnis

- [94] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, and A. Fortunato, "Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 249, pp. 255–263, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042.
- [95] K. Moussaoui, W. Rubio, M. Mousseigne, T. Sultan, and F. Rezai, "Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 735, pp. 182–190, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.08.037.
- [96] L. X. Meng *et al.*, "Effects of defects and microstructures on tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V alloys fabricated in the optimal process zone," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 830, p. 142294, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2021.142294.
- [97] M. Xia, D. Gu, G. Yu, D. Dai, H. Chen, and Q. Shi, "Porosity evolution and its thermodynamic mechanism of randomly packed powder-bed during selective laser melting of Inconel 718 alloy," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 116, pp. 96–106, 2017, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.01.005.
- [98] R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang, and W. Jiang, "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 59, 9-12, pp. 1025–1035, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3566-1.
- [99] S. Cao *et al.*, "Defect, Microstructure, and Mechanical Property of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by High-Power Selective Laser Melting," *JOM*, vol. 69, no. 12, pp. 2684–2692, 2017, doi: 10.1007/s11837-017-2581-6.
- [100] N. D. Dejene and H. G. Lemu, "Current Status and Challenges of Powder Bed Fusion-Based Metal Additive Manufacturing: Literature Review," *Metals*, vol. 13, no. 2, p. 424, 2023, doi: 10.3390/met13020424.
- [101] M. Mazur and P. Selvakannan, "Laser Powder Bed Fusion—Principles, Challenges, and Opportunities," in *Additive Manufacturing for Chemical Sciences and Engineering*, S. K. Bhargava, S. Ramakrishna, M. Brandt, and P. Selvakannan, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 77–108.
- [102] G. B. Bang *et al.*, "Effect of process parameters for selective laser melting with SUS316L on mechanical and microstructural properties with variation in chemical composition," *Materials & Design*, vol. 197, p. 109221, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109221.
- [103] Č. Donik, J. Kraner, I. Paulin, and M. Godec, "Influence of the Energy Density for Selective Laser Melting on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel," *Metals*, vol. 10, no. 7, p. 919, 2020, doi: 10.3390/met10070919.
- [104] D. Sánchez-Ávila, R. Barea, E. Martínez, J. R. Blasco, L. Portolés, and F. Carreño, "Determination of the instantaneous strain rate during small punch testing of 316 L stainless steel,"

- International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 149, pp. 93–100, 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.09.042.
- [105] M. Mahmoudi, A. Elwany, A. Yadollahi, S. M. Thompson, L. Bian, and N. Shamsaei, "Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel," *RPJ*, vol. 23, no. 2, pp. 280–294, 2017, doi: 10.1108/RPJ-12-2015-0192.
- [106] T. Kim, M.-K. Kim, Y. Fang, and J. Suhr, "Moisture Effects on Qualities and Properties of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Additive Manufacturing of As-Built 17-4PH Stainless Steel Parts," *Metals*, vol. 13, no. 9, p. 1550, 2023, doi: 10.3390/met13091550.
- [107] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2015. [Online]. Available: <https://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1617/2014953293-b.html>
- [108] M. Grasso and B. M. Colosimo, "Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 4, p. 44005, 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa5c4f.
- [109] L. R. Goossens and B. van Hooreweder, "A virtual sensing approach for monitoring melt-pool dimensions using high speed coaxial imaging during laser powder bed fusion of metals," *Additive Manufacturing*, vol. 40, p. 101923, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101923.
- [110] B. Lane *et al.*, "Measurements of melt pool geometry and cooling rates of individual laser traces on IN625 bare plates," *Integrating materials and manufacturing innovation*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s40192-020-00169-1.
- [111] B. Yuan *et al.*, "Machine-Learning-Based Monitoring of Laser Powder Bed Fusion," *Adv Materials Technologies*, vol. 3, no. 12, 2018, doi: 10.1002/admt.201800136.
- [112] J. Li, L. Cao, J. Xu, S. Wang, and Q. Zhou, "In situ porosity intelligent classification of selective laser melting based on coaxial monitoring and image processing," *Measurement*, vol. 187, p. 110232, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110232.
- [113] O. Kwon, H. G. Kim, W. Kim, G.-H. Kim, and K. Kim, "A Convolutional Neural Network for Prediction of Laser Power Using Melt-Pool Images in Laser Powder Bed Fusion," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23255–23263, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970026.
- [114] L. Yang, L. Lo, S. Ding, and T. Özel, "Monitoring and detection of meltpool and spatter regions in laser powder bed fusion of super alloy Inconel 625," *Prog Addit Manuf*, vol. 5, no. 4, pp. 367–378, 2020, doi: 10.1007/s40964-020-00140-8.
- [115] L. Scime and J. Beuth, "Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm," *Additive Manufacturing*, vol. 19, pp. 114–126, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.11.009.
- [116] X. Xiao, X. Liu, M. Cheng, and L. Song, "Towards monitoring laser welding process via a coaxial pyrometer," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 277, p. 116409, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116409.

8 Literaturverzeichnis

- [117] Stockman, T., Horan, C., Knapp, C., Henderson, K., Patterson, B., Carpenter, "Differentiating defect types in LENS™ metal AM via in situ pyrometer process monitoring," *Minerals, metals and materials series*, pp. 197–204, 2019.
- [118] J. A. Mitchell, T. A. Ivanoff, D. Dagel, J. D. Madison, and B. Jared, "Linking pyrometry to porosity in additively manufactured metals," *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100946, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100946.
- [119] H. Baumgartl, J. Tomas, R. Buettner, and M. Merkel, "A deep learning-based model for defect detection in laser-powder bed fusion using in-situ thermographic monitoring," *Prog Addit Manuf*, vol. 5, no. 3, pp. 277–285, 2020, doi: 10.1007/s40964-019-00108-3.
- [120] B. Gould *et al.*, "In Situ Analysis of Laser Powder Bed Fusion Using Simultaneous High-Speed Infrared and X-ray Imaging," *JOM*, vol. 73, no. 1, pp. 201–211, 2021, doi: 10.1007/s11837-020-04291-5.
- [121] J. C. Dainty, *Laser Speckle and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975.
- [122] H. J. Rabal and R. A. Braga, *Dynamic Laser Speckle and Applications*: CRC Press, 2018.
- [123] W. Lauterborn and T. Kurz, *Coherent Optics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [124] B. Horvath, *Entwicklung einer optischen Messmethode zur Analyse lateraler Mikrostrukturoberflächen*. Ilmenau, Technische Universität, Dissertation, 2007.
- [125] *Tagungsband*: AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2015.
- [126] L. Chen, U. Cikalova, and B. Bendjus, "Laser speckle photometry: an advanced method for defect detection in ceramics," in *Speckle 2018: VII International Conference on Speckle Metrology*, Janów Podlaski, Poland, Sep. 2018 - Sep. 2018, p. 15. [Online]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10834/2318537/Laser-speckle-photometry--an-advanced-method-for-defect-detection/10.1117/12.2318537.full>
- [127] B. Bendjus, U. Cikalova, and S. Sudip, "Laser-Speckle-Photometrie – optische Sensorik zur Zustands- und Prozessüberwachung," in *Tagungsband*, Hotel Elbflorenz, Dresden, 2015, pp. 245–250.
- [128] B. Bendjus, U. Cikalova, L. Chen, "Crack Detection of Ceramics based on Laser Speckle Photometry," *Journal of Ceramic Science and Technologie*, no. 08, 2017.
- [129] D. Dang, S. Weingarten, F. Frost, B. Bendjus, and U. Scheithauer, "Laser Speckle Photometry investigation of the thermal conductivity of 3D printed ceramic green bodies using Multi Material Jetting," *Open Ceramics*, vol. 8, p. 100193, 2021, doi: 10.1016/j.oceram.2021.100193.
- [130] U. Cikalova, J. Schreiber, N. Meyendorf, "Evaluation of Fatigue Damage by Analyzing the Scale Properties of NDE Signals," in *13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*.

- [131] K. Ritter, J. Unglaub, and K. Thiele, "Untersuchung der Mikroschädigung in Baustahl mit E-SPI," *Bautechnik*, vol. 97, no. 3, pp. 180–187, 2020, doi: 10.1002/bate.201800006.
- [132] D. Dang, A. Elspas, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, and G. Witt, "Material Characterization of Additively Manufactured Metals by Laser Speckle Photometry," in *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1–6.
- [133] D.-K. Dang, *Porositäts- und Rauheitsmessung beim Laserstrahlschmelzen mit der Laser-Speckle-Photometrie*. Technische Universität Dresden, Dissertation. Dresden: TUDpress - Dresdener Beiträge zur Sensorik, Band 84, 2022.
- [134] L. Crovini and L. Galgani, "On the accuracy of the experimental proof of Planck's radiation law," *Lett. Nuovo Cimento*, vol. 39, no. 10, pp. 210–214, 1984, doi: 10.1007/bf02783673.
- [135] P. von Böckh and T. Wetzel, "Strahlung," in *Wärmeübertragung*, P. von Böckh and T. Wetzel, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 191–215.
- [136] M. Planck, "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum," *Phys. Bl.*, vol. 4, no. 4, pp. 146–151, 1948, doi: 10.1002/phbl.19480040404.
- [137] *EOSINT M270*. [Online]. Available: https://www.eos.info/01_parts-and-applications/industry_different_parts_applications/metal_parts_applications/parts_metal_medical/dental/eos_m-270_dental_2017_en_web.pdf (accessed: Jul. 31 2023).
- [138] EOS GmbH - Electro Optical Systems, *EOS StainlessSteel GP1 für EOSINT M 270*. [Online]. Available: https://lightway-3d.de/wp-content/uploads/2019/11/LIGHTWAY_EOS_StainlessSteel-GP1_de_Datenblatt.pdf (accessed: Jan. 12 2024).
- [139] Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG, *Printdur® 4404: Materialdatenblatt*. [Online]. Available: https://www.dew-powder.com/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Deutsch/2020-04-15_Printdur4404_Datenblatt_DE.pdf (accessed: May 20 2024).
- [140] SLM Solutions Group AG, *316L - Material Data Sheet*. [Online]. Available: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_316L_2023-04_EN.pdf (accessed: May 20 2024).
- [141] S. D. Meredith, J. S. Zuback, J. S. Keist, and T. A. Palmer, "Impact of composition on the heat treatment response of additively manufactured 17–4 PH grade stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 738, pp. 44–56, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.09.066.
- [142] Z. Yu *et al.*, "Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 284, p. 116738, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116738.
- [143] V. Bobkov, L. Fokin, E. Petrov, V. Popov, V. Rumiantsev, A. Savvatimsky, "Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data: Nuclear Power Technology Development Section," *IAEA*, 2008.

8 Literaturverzeichnis

- [144] P. Pichler, B. J. Simonds, J. W. Sowards, and G. Pottlacher, "Measurements of thermophysical properties of solid and liquid NIST SRM 316L stainless steel," *Journal of materials science*, vol. 55, 2020, doi: 10.1007/s10853-019-04261-6.
- [145] F. L. Serafini *et al.*, "Microstructure and mechanical behavior of 316L liquid phase sintered stainless steel with boron addition," *Materials Characterization*, vol. 152, pp. 253–264, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.04.009.
- [146] P. Ansari *et al.*, "Selective Laser Melting of 316L Austenitic Stainless Steel: Detailed Process Understanding Using Multiphysics Simulation and Experimentation," *Metals*, vol. 11, no. 7, p. 1076, 2021, doi: 10.3390/met11071076.
- [147] Olympus Global, *System Microscopy BX51*. [Online]. Available: <http://olympusconfocal.com/> (accessed: 06.26.2023).
- [148] S. Dražić, N. Sladoje, and J. Lindblad, "Estimation of Feret's diameter from pixel coverage representation of a shape," *Pattern Recognition Letters*, vol. 80, pp. 37–45, 2016, doi: 10.1016/j.patrec.2016.04.021.
- [149] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., "DIN 50125 Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben," 2016.
- [150] H.-J. Bargel, *Werkstoffkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022.
- [151] PHOTRON USA, INC., *Photron GmbH Fastcam Mini AX50*. [Online]. Available: <https://photron.com/de/fastcam-mini-ax/> (accessed: Aug. 17 2023).
- [152] Navitar Inc, *Navitar Inc. 12X Distanz Makro Zoom*. [Online]. Available: <https://navitar.com/products/imaging-optics/high-magnification-imaging/12x-zoom/> (accessed: Apr. 17 2023).
- [153] Novanta Europe GmbH, *Novanta Europe. Opus 532*. [Online]. Available: https://novantaphotonics.com/wp-content/uploads/2021/12/NOVT_Datasheet_opus.pdf (accessed: Aug. 18 2023).
- [154] I. Midwest Optical Systems, *MidOpt. BP525 Light Green Bandpass Filter*. [Online]. Available: <https://midopt.com/filters/bp525/> (accessed: Dec. 18 2023).
- [155] M. Ma, Z. Wang, and X. Zeng, "A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 685, pp. 265–273, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2016.12.112.
- [156] PHOTRON USA, INC., *Photron GmbH NOVA S6-800K-M-16GB*. [Online]. Available: <https://photron.com/de/fastcam-nova-s/> (accessed: Aug. 17 2023).
- [157] I. Midwest Optical Systems, *MidOpt. SP785 Near-IR Dichroic Shortpass*. [Online]. Available: <https://midopt.com/filters/sp785/> (accessed: Jun. 18 2024).
- [158] AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, *ARGON SPEKTRO W5: Gasgemisch Argon und Wasserstoff*. [Online]. Available: <https://mygas.airliquide.de/catalog-gas-products/argon-spektro-w5-gasgemisch/blue-h2-5ar-cylinder-50l-200-bar/p3385150r2a001> (accessed: Jan. 13 2024).

- [159] A. Rukini, M. A. Rhamdhani, G. A. Brooks, and A. van den Bulck, "Metals Production and Metal Oxides Reduction Using Hydrogen: A Review," *J. Sustain. Metall.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–24, 2022, doi: 10.1007/s40831-021-00486-5.
- [160] Sensortherm GmbH, *METIS H311 / H322: Highspeed-Quotientenpyrometer*. [Online]. Available: https://www.sensortherm.de/userfiles/file/datenblaetter/de/Sensortherm-Datenblatt_Metis_H311_H322.pdf (accessed: Jan. 13 2024).
- [161] T. Larimian, M. Kannan, D. Grzesiak, B. AlMangour, and T. Borkar, "Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 770, p. 138455, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2019.138455.
- [162] S. P. Kumar and P. D. Babu, "Effect of laser energy density on surface morphology, microstructure and mechanical behaviour of direct metal laser melted 17-4 PH stainless steel," *International Journal of Materials Research*, vol. 114, 10-11, pp. 911–924, 2023, doi: 10.1515/ijmr-2022-0242.
- [163] *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [164] N. Fonstein, *Advanced High Strength Sheet Steels*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [165] K. Davut, *Relation between microstructure and mechanical properties of a low-alloyed TRIP steel*. Technische Hochschule Aachen, Dissertation. Aachen: Shaker, 2013.
- [166] EOS, *Material Datasheet eos stainlesssteel 316l*. [Online]. Available: <https://www.eos.info/>
- [167] T.-H. Hsu *et al.*, "Effect of processing parameters on the fractions of martensite in 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 859, p. 157758, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157758.
- [168] K. Dietrich, J. Diller, S. Dubiez-Le Goff, D. Bauer, P. Forêt, and G. Witt, "The influence of oxygen on the chemical composition and mechanical properties of Ti-6Al-4V during laser powder bed fusion (L-PBF)," *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 100980, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100980.
- [169] P. A. Kuznetsov, I. V. Shakirov, A. S. Zukov, V. V. Bobyr', and M. V. Starytsin, "Effect of particle size distribution on the structure and mechanical properties in the process of laser powder bed fusion," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1758, no. 1, p. 12021, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1758/1/012021.
- [170] C. Song *et al.*, "Study on the influence of oxygen content evolution on the mechanical properties of tantalum powder fabricated by laser powder bed fusion," *Materials Characterization*, vol. 205, p. 113235, 2023, doi: 10.1016/j.matchar.2023.113235.
- [171] D. J. Shaffer, A. E. Wilson-Heid, J. S. Keist, A. M. Beese, and T. A. Palmer, "Impact of retained austenite on the aging response of additively manufactured 17-4 PH grade stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 817, p. 141363, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141363.

8 Literaturverzeichnis

- [172] A. Yadollahi, N. Shamsaei, S. M. Thompson, and D. W. Seely, "Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 644, pp. 171–183, 2015, doi: 10.1016/J.MSEA.2015.07.056.
- [173] M. A. Aripin *et al.*, "Effects of Build Orientations on Microstructure Evolution, Porosity Formation, and Mechanical Performance of Selective Laser Melted 17-4 PH Stainless Steel," *Metals*, vol. 12, no. 11, p. 1968, 2022, doi: 10.3390/met12111968.
- [174] T. Ronneberg, C. M. Davies, and P. A. Hooper, "Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment," *Materials & Design*, vol. 189, p. 108481, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108481.
- [175] S. L. Hernández-Trujillo, V. H. Lopez-Morelos, M. A. García-Rentería, R. García-Hernández, A. Ruiz, and F. F. Curiel-López, "Microstructure and Fatigue Behavior of 2205/316L Stainless Steel Dissimilar Welded Joints," *Metals*, vol. 11, no. 1, p. 93, 2021, doi: 10.3390/met11010093.
- [176] M. Landowski, A. Świerczyńska, G. Rogalski, and D. Fydrych, "Autogenous Fiber Laser Welding of 316L Austenitic and 2304 Lean Duplex Stainless Steels," *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 13, no. 13, 2020, doi: 10.3390/ma13132930.
- [177] G. Rogalski, A. Świerczyńska, M. Landowski, and D. Fydrych, "Mechanical and Microstructural Characterization of TIG Welded Dissimilar Joints between 304L Austenitic Stainless Steel and Incoloy 800HT Nickel Alloy," *Metals*, vol. 10, no. 5, p. 559, 2020, doi: 10.3390/met10050559.
- [178] N. Schnell, J. Wegner, A. Elspaß, and S. Kleszczynski, "Effective absorptivity of diamond-reinforced metal matrix composites for powder bed fusion using a laser beam," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 6, p. 100138, 2023, doi: 10.1016/j.addlet.2023.100138.
- [179] D. Gatões, R. Alves, B. Alves, and M. T. Vieira, "Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels," *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/ma15217575.
- [180] S. Kleszczynski, *Potenziale der bildgestützten Prozessanalyse zur Steigerung des technologischen Reifegrades von Laser-Strahlschmelzverfahren*, 2018.
- [181] B. Diepold *et al.*, "Rotating Scan Strategy Induced Anisotropic Microstructural and Mechanical Behavior of Selective Laser Melted Materials and Their Reduction by Heat Treatments," *Adv Eng Mater*, vol. 23, no. 12, 2021, doi: 10.1002/adem.202100622.
- [182] O. O. Salman *et al.*, "Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 45, pp. 255–261, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.07.010.
- [183] M. Jaskari, S. Ghosh, I. Miettunen, P. Karjalainen, and A. Järvenpää, "Tensile Properties and Deformation of AISI 316L Additively Manufactured with Various Energy Densities," *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 14, no. 19, 2021, doi: 10.3390/ma14195809.

- [184] D. Kotzem *et al.*, "Impact of single structural voids on fatigue properties of AISI 316L manufactured by laser powder bed fusion," *International Journal of Fatigue*, vol. 148, p. 106207, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106207.
- [185] A. Riemer, S. Leuders, M. Thöne, H. A. Richard, T. Tröster, and T. Niendorf, "On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 120, pp. 15–25, 2014, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.03.008.
- [186] T. Rautio, A. Mustakangas, J. Kumpula, and A. Järvenpää, "Scanning strategy effect on the edge porosity and fatigue life of 316L PBF-LB parts," *Procedia CIRP*, vol. 111, pp. 130–133, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.08.106.
- [187] M. Zhang, C.-N. Sun, X. Zhang, J. Wei, D. Hardacre, and H. Li, "Predictive models for fatigue property of laser powder bed fusion stainless steel 316L," *Materials & Design*, vol. 145, pp. 42–54, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.054.
- [188] F. J. Stern, *Systematische Bewertung des defektdominierten Ermüdungsverhaltens der additiv gefertigten austenitischen Stähle X2CrNiMo17-12-2 und X2CrNiMo18-15-3*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023.
- [189] D. Dang, A. Elspaß, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, and G. Witt, "Investigation of the Roughness Influence on the Absorption Behavior of additively manufactured Metals by the Laser Speckle Photometry," in *2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Bautzen, Germany, 2021, pp. 1–6.
- [190] D. Dang, A. Elspaß, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, and G. Witt, "First investigations of Laser Speckle Photometry for in-situ Density Measurement during Laser Powder Bed Fusion of Metals," Berlin, 2020.
- [191] W. Rasband, *ImageJ Software*. [Online]. Available: <https://imagej.net/ij/download.html> (accessed: Jul. 7 2024).
- [192] A. Elspaß *et al.*, "Introduction and accuracy improvement of laser speckle photometry for in-situ monitoring material densities in laser powder bed fusion of metals," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 108, pp. 475–484, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.10.077.
- [193] R. Rennert, E. Kullig, M. Vormwald, A. Esderts, and D. Siegele, Eds., *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile: Aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*, 6th ed. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2012.
- [194] P. Wang, H. Lei, X. Zhu, H. Chen, and D. Fang, "Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 789, pp. 852–859, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.03.135.
- [195] A. Ahmadi, R. Mirzaeifar, N. S. Moghaddam, A. S. Turabi, H. E. Karaca, and M. Elahinia, "Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework," *Materials & Design*, vol. 112, pp. 328–338, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.09.043.

8 Literaturverzeichnis

- [196] G. Vera-Rodríguez, L. Moreno-Corrales, I. Marín-González, D. Barba, F. J. Montáns, and M. Á. Sanz-Gómez, "Incorporation of Defects in Finite Elements to Model Effective Mechanical Properties of Metamaterial Cells Printed by Selective Laser Melting," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1167, 2024, doi: 10.3390/su16031167.
- [197] A. V. Gusarov, I. Yadroitsev, P. Bertrand, and I. Smurov, "Model of Radiation and Heat Transfer in Laser-Powder Interaction Zone at Selective Laser Melting," *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, no. 7, 2009, doi: 10.1115/1.3109245.
- [198] Prizmatix Ltd., *UHP-F-LED: Ultra High Power Lightguide Coupled LEDs for Lab*. [Online]. Available: <https://www.prizmatix.com/LEDUHP/LED-UHP-TFF.aspx> (accessed: Jun. 1 2024).
- [199] X. Kan, Y. Yin, D. Yang, W. Li, and J. Sun, "Micro pool characteristics of 316L and the influence of sulfur during SLM," *Optics & Laser Technology*, vol. 142, p. 107136, 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107136.
- [200] Y. S. Lee and W. Zhang, "Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, vol. 12, pp. 178–188, 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.05.003.
- [201] M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond, and W. E. King, "Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes," *Acta Materialia*, vol. 114, pp. 33–42, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.05.017.
- [202] C. Tang, J. L. Tan, and C. H. Wong, "A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, pp. 957–968, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.073.
- [203] W. Yuan, H. Chen, T. Cheng, and Q. Wei, "Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser melting: Simulation and experiment," *Materials & Design*, vol. 189, p. 108542, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108542.
- [204] J. Reijonen, A. Revuelta, T. Riipinen, K. Ruusu vuori, and P. Puukko, "On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101030, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.101030.
- [205] H. Liu, Q. Jiang, J. Huo, Y. Zhang, W. Yang, and X. Li, "Crystallization in additive manufacturing of metallic glasses: A review," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101568, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101568.
- [206] H. Schonrath *et al.*, Eds., *Analytical Modeling of Cooling Rates in PBF-LB/M of Bulk Metallic Glasses*. University of Texas at Austin, 2023.
- [207] J. Wegner, "Funktionalisierung der prozessinhärenten Abkühlraten des Laser-Strahlschmelzens zur Verarbeitung metallischer Massivgläser," DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany, 2023.
- [208] I. Midwest Optical Systems, *MidOpt. BP635 Light Red Bandpass Filter*. [Online]. Available: <https://midopt.com/filters/bp635/> (accessed: Dec. 18 2023).

- [209] P. A. Hooper, "Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 548–559, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.032.
- [210] N. Schnell, M. P. Ferreira, J. Wegner, W. Tillmann, and S. Kleszczynski, "Process strategy for crack-free production of diamond-reinforced metal matrix composites with minimal graphitization through laser powder bed fusion," *Diamond and Related Materials*, vol. 135, p. 109788, 2023, doi: 10.1016/j.diamond.2023.109788.
- [211] J. Wegner, J. P. Best, N. Schnell, and S. Kleszczynski, "Structural deviations of bulk metallic glasses in downfacing surfaces fabricated via Laser Powder Bed Fusion," *Procedia CIRP*, vol. 111, pp. 105–110, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.08.147.
- [212] M. Frey *et al.*, "Laser powder bed fusion of Cu-Ti-Zr-Ni bulk metallic glasses in the Vit101 alloy system," *Additive Manufacturing*, vol. 66, p. 103467, 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103467.
- [213] R. Weber and P. Seeberg, *KI in der Industrie: Grundlagen, Anwendungen, Perspektiven*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [214] SLM Solutions GmbH, *SLM 280 HI 1.0*. [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/slm-solutions/slm-280-hi/114591-626987.html> (accessed: May 25 2023).

9 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wachstum des AM-Segmentes der Herstellung von metallischen Komponenten: a) Verkauf von Systemen, mit denen Metall verarbeitet werden kann, in den Jahren 2002 bis 2022; b) Erlöse, die durch den Verkauf von Grundmaterialien für metallverarbeitende AM-Verfahren in den Jahren 2009 bis 2022 generiert wurden, nach Wohlers 2023 [4].	1
Abbildung 1-2: Optimierung der a) Geometrie konventioneller Komponenten für b) die additive Fertigung unter Berücksichtigung der Belastung zur Gewichtsreduzierung, aus [9].	2
Abbildung 1-3: Prozentuale Verteilung der Stückkosten metallischer AM-Bauteile in den Jahren 2017 bis 2022, in Anlehnung an [4].	2
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten einer PBF-LB/M-Anlage sowie der drei verfahrensspezifischen Prozessschritte.	7
Abbildung 2-2: Typische Prozessprodukte im PBF-LB/M-Prozess: ausgestoßenes Pulver, Schmelztropfen, Metaldampf, Kondensat sowie Interaktionen dieser Edukte mit dem Laserstrahl, in Anlehnung an [64].	8
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Einflusses von Prozessparametern auf die resultierende Porosität: Keyhole-Defekte bei geringer Scangeschwindigkeit und hoher Laserleistung; Lack-of-Fusion-Defekte bei hohen Scangeschwindigkeiten und geringer Laserleistung; Balling bei hoher Scangeschwindigkeit und Laserleistung, in Anlehnung an [77].	10
Abbildung 2-4: Rekonstruktion aus Xia et al. [97]: LoF-Defekt, der zwischen zwei Schichten ausgeprägt ist.	14
Abbildung 2-5: Anomalien der Schmelzbahnen: a) an Einzelspuren, durch Variation der Laserleistung; b) an Einzelspuren, durch Variation der Schichtdicke, beide rekonstruiert aus [98]; c) in einer belichteten Schicht [99].	14
Abbildung 2-6: a) Anzahl von Veröffentlichungen mit dem Schwerpunkt In-situ-Erfassen und/oder In-situ-Überwachung im PBF-LB/M-Prozess in den Jahren 2010 bis 2020; b) Verteilung der im Jahr 2020 veröffentlichten Ergebnisse hinsichtlich der betrachteten Ebene, in Anlehnung an [28, 108].	17
Abbildung 2-7: Verteilung der Veröffentlichungen im Bereich des Prozessmonitorings in Abhängigkeit von den genutzten Messsignalen von 2017 bis 2023, in Anlehnung an [19].	18
Abbildung 2-8: Strahlungsprofil des Schmelzbades im PBF-LB/M während der Belichtung einer Substratplatte, rekonstruiert aus [110].	19
Abbildung 2-9: a) Reflexion von kohärentem Licht auf einer rauen Oberfläche sowie die daraus resultierenden Bereiche mit Intensitätsminima und -maxima b) Resultierendes Bild aus der Beleuchtung einer rauen Oberfläche mit kohärentem Licht.	21
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Auswertemöglichkeiten von Speckle-Mustern a) statische Analyse eines Pixels in einem Bild, b) dynamische Analyse eines Pixels anhand aufeinanderfolgender Bilder (t_1 bis t_n).	21
Abbildung 2-11: Schematischer Aufbau eines Laser-Speckle-Photometrie-Messsystems mit dessen Hauptkomponenten sowie ein beispielhaftes Bild von Speckle-Mustern, in Anlehnung an [132].	23
Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der emittierten Intensitäten eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge in nm und der Temperatur in K, nach Formel (2-6). Ebenso aufgetragen sind das Wien'sche Verschiebungsgesetz nach Formel (2-7) sowie die resultierenden Farben der Strahlungen bei variierenden Wellenlängen.	25
Abbildung 2-13: Übersicht der Intensitäten, die von einem Schmelzbad im PBF-LB/M-Prozess ausgehen.	27
Abbildung 4-1: a) PBF-LB/M-Fertigungsanlage EOS M270 der EOS GmbH aus [137]; b) Schematische Darstellung des Bauraumes der EOS M270 nach durchgeführter Anpassung des Prozessgasstromes mit neuer Prozessgasdüse und Absaugung.	29
Abbildung 4-2: a) PBF-LB/M-Fertigungsanlage SLM 280 HL des Anlagenherstellers Nikon SLM Solutions AG; b) Bauraum der Anlage mit den wichtigsten Komponenten.	30
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Trennebenen, von denen die Ausrichtung der Schlifffbilder abgeleitet werden kann.	32
Abbildung 4-4: Darstellung des Verfahrens zur Auswertung von Mikroskopie-Aufnahmen zur Bestimmung unterschiedlicher Kennwerte. a) Mikroskopie-Aufnahme; b) Transformation in ein schwarz-weißes Bild und Detektion sowie Anzeige von Defekten; c) Detektion und Entfernen von Reflexionen innerhalb von Defekten; d) Resultierendes Bild mit Analyse der Defektausdehnungen in x- und y-Richtung.	33
Abbildung 4-5: Schematische Darstellung eines Designs für einen Probekörper, der mittels PBF-LB/M-Verfahren auf einer EOS M270 gefertigt wurde. Die Farben definieren unterschiedliche CAD-Modelle zur Einbringung von Defekten. Die Probekörper wurden gleichzeitig mittels LSP-Messsystem und anschließend mittels Mikro-Computertomografen analysiert.	35
Abbildung 4-6: Form der in dieser Dissertation gewählten Zugstäbe nach DIN 50125 - C 5 x 25 [149].	35
Abbildung 4-7: Schematische Darstellung eines typischen Spannungs-Dehnungs-Diagramms einer Probe mit ausgeprägter Streckgrenze.	36

Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Positionierung des LSP-Systems vor dem Laser-Window einer EOS M270 PBF-LB/M Anlage. Ebenso gezeigt sind die Hauptkomponenten des LSP sowie PBF-LB/M-Systems.	38
Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines LSP-Messzyklus in drei Stufen: 1. Fertigung des auszuwertenden Materials; 2. Nachbelichtung und LSP-Messung; 3. Transfer der Daten und Auswertung in LSP-Software.	39
Abbildung 4-10: Transmission des Kurzpassfilters SP785 sowie die Detektierbarkeit von Intensitäten des Kamerasensors in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie die aus diesen beiden Werten resultierenden totalen Detektionsraten von Intensitäten.	44
Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des HSK-Systems sowie Positionierung des Systems an der genutzten SLM 280 HL PBF-LB/M-Anlage.	44
Abbildung 4-12: Beispielhafte Darstellung der vorhandenen Datenbasis zur Auswertung der Schmelzbadeigenschaften: Bilder eines Videos, aufgenommen mit HSK-System.	45
Abbildung 4-13: Vergleich von HSK-Daten: Oben: Die höchsten Intensitäten eines jeden Pixels innerhalb des Videos in einem Bild dargestellt. Ersichtlich werden Reflexionen und Artefakte aufgeschmolzener Partikel. Unten: Bereich, den die HSK-Software nach der Nutzung von Filtern als Schmelze detektiert.	46
Abbildung 4-14: Beispielhafte Auswertung von Intensitäten an Linienprofilen (y-Richtung) in vier aufeinanderfolgenden Bildern eines HSK-Videos. Zusätzlich dargestellt ist eine frei gewählte Intensität, mit der die Bestimmung der Breite des Schmelzbades schematisch dargestellt wird.	48
Abbildung 4-15: Schematische Darstellung der Methode zur Auswertung von Schmelzbadlängen anhand der Datenbasis, welche mittels des HSK-Systems aufgenommen wurde.	49
Abbildung 4-16: Oben: Sieben aufeinanderfolgende Bilder aus einem HSK-Video unter Angabe des Pixels (rotes Kreuz), der für die Auswertung der zeitlichen Intensitätsverläufe ausgewählt wurde. Unten: Zeitlicher Verlauf der Intensität über der Zeit, mit Darstellung der Methode zur Ermittlung der Abkühlung.	50
Abbildung 4-17: Hauptkomponenten des Prüfstandes zur Korrelation der mittels High-Speed-Kamera detektierten Intensitäten und Oberflächentemperaturen gemessen mittels Quotienten-Pyrometer: 1) Optik des Quotienten-Pyrometers; 2) Objektiv der High-Speed-Kamera mit vorgeschaltetem Spiegel zur Umlenkung des Strahlengangs; 3) Induktionsspule des Induktionsofens; 4) Erwärmter Probekörper; 5) Messbereich nahe der Mittelachse der Probe; 6) Intensität hervorgerufen durch den Positionierungslaser des Pyrometers.	52
Abbildung 5-1: Ermittelte relative Dichte von Probekörpern aus dem Werkstoff EOS GP1 gefertigt auf einer EOS M270 mit den variierten Prozessparametern: Laserleistung, Hatchabstand, Scangeschwindigkeit.	54
Abbildung 5-2: Defektgröße je mm ² und durchschnittliche Defektfläche in x/z-Ebene in Abhängigkeit von der Laserleistung.	55
Abbildung 5-3: Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Zugversuchen an Probekörpern gefertigt im PBF-LB/M-Verfahren aus dem Material EOS GP1, wobei der Parameter Laserleistung <i>PL</i> variiert wurde, um Defekte definiert hervorzurufen.	57
Abbildung 5-4: Zugstäbe nach Zugversuchen: a) duktiler Bruch bei Proben mit einer relativen Dichte von 99,98 %; b) spröder Bruch bei <i>prel</i> = 90,78 %.	58
Abbildung 5-5: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an vertikal ausgerichteten Zugstäben, welche mit variierten Laserleistungen gefertigt wurden, bei sonst konstanten Prozessparametern, die den Referenzparametern entsprechen. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über der relativen Dichte; b) Bruchdehnung über der Dichte aufgetragen.	59
Abbildung 5-6: Simulation von Spannungszuständen in y/z-Richtung an Probekörpern ohne Defekt (Referenz) und mit einem Defekt mit einer Kantenlänge von 1,5 mm in y/z-Ebene bei gleich starker Belastung in x-Richtung.	60
Abbildung 5-7: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Zugprobenvarianten, um Größe und Position des Bereiches zu veranschaulichen, welcher mit variierten Prozessparametern belichtet wird.	61
Abbildung 5-8: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven vertikal gefertigter Probekörper der Variation 'Referenz'.	62
Abbildung 5-9: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an vertikal aufgebauten Zugstäben mit defektbehafteten Volumina, die in Größe und Position variiert wurden. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über der theoretischen Dichte im Querschnitt; b) Bruchdehnung aufgetragen über der theoretischen Dichte im Querschnitt.	65
Abbildung 5-10: Ergebnisse aus Zugversuchen, durchgeführt an horizontal aufgebauten Zugstäben mit defektbehafteten Volumina, die in Größe und Position variiert wurden. a) Maximale Zugfestigkeit aufgetragen über Anteil und Position der Volumina; b) Bruchdehnung aufgetragen über Anteil und Position der Volumina.	67
Abbildung 5-11: Schematische Darstellung eines Materialbereiches in Zugproben mit den resultierenden Schmelzbadgrenzen. In a) wird das Material parallel zur Aufbaurichtung belastet, in b) orthogonal zur Aufbaurichtung, ein möglicher Rissfortschritt, skizziert als rote Linie, an den Schmelzbadgrenzen variiert, in Anlehnung an [173]. c) Orientierung der Körner im Gefüge.	68

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 5-12: Kennwerte der maximalen Zugfestigkeit in a) und der Bruchdehnung in b) für Probekörper gefertigt in vertikaler sowie horizontaler Ausrichtung in Abhängigkeit von der Position des defektbehafteten Bereiches mit einem Anteil an der Querschnittsfläche von 1/6.....	70
Abbildung 5-13: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Zugprobenvarianten, um Größe und Position des gebooleten Bereiches veranschaulichen zu können.....	74
Abbildung 5-14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Zugstäben, welche a) horizontal und b) vertikal während des PBF-LB/M-Prozesses gefertigt wurden.....	75
Abbildung 5-15: Bruchdehnung und maximale Zugfestigkeit von Zugstäben mit variierten Positionen eines Defektes: Inn – Defekt auf der Mittelachse des Zylinders; Aus – Mittelpunkt des Defektes um 1,79 mm nach außen verschoben; Mit – Defektposition zwischen Inn und Aus; Ref – Zugstab ohne Defekt.....	76
Abbildung 5-16: Analyse von Bruchflächen mittels Elektronenstrahlmikroskops für Probekörper ohne gezielt eingebrachte Defekte, Defekte, welche koaxial auf der Achse der Probekörper oder außen liegen.....	77
Abbildung 5-17: Schematische Skizze der Querschnittsflächen unterschiedlicher Dauerfestigkeitsproben, um Größe und Position des gebooleten Bereiches veranschaulichen zu können.....	79
Abbildung 5-18: Ergebnisse von zyklischen Belastungsversuchen mit konstanter Amplitude (CAT) für PBF-LB/M-gefertigte Proben aus AISI 316L mit unterschiedlichen Kantenlängen der eingebrachten quadratischen Defekte sowie ein Referenzzustand.....	81
Abbildung 5-19: Bruchfläche eines a) Probekörpers mit einer Kantenlänge des Defektes von $lK = 0,3 \text{ mm}$ bei $\sigma_{CAT} = 340 \text{ MPa}$ und b) einer Kantenlänge von $lK = 1,0 \text{ mm}$ bei $\sigma_{CAT} = 340 \text{ MPa}$	83
Abbildung 5-20: Defektausprägungen in Abhängigkeit der gewählten Methode zur Erzeugung der Defekte in x/z-Ebene. a) Durch Variation der Laserleistung, b) durch Boole'sche Operationen.....	85
Abbildung 5-21: Auswertung variierten Leistungen des BelichtungsLasers anhand: a) von Bildern des LSP-Systems vor der Messung; b) der Häufigkeitsverteilung von Intensitäten im Messbereich sowie c) der gemittelten Intensitäten im betrachteten Bildausschnitt des LSP-Systems.....	87
Abbildung 5-22: Änderung der LSP-Messsignale in Abhängigkeit von den gewählten Leistungseinstellungen des Speckle-Lasers: a) über den Frames τ ; b) zum Zeitpunkt $\tau = 39$	89
Abbildung 5-23: Abhängigkeit der Beleuchtungsintensität des Messbereiches sowie der Ausprägung des LSP-Signals von der Leistung des Speckle-Lasers.....	90
Abbildung 5-24: Ergebnis der Normierung von LSP-Messergebnissen durch die Normierungsfunktion $Cn\tau$	91
Abbildung 5-25: Resultierende Werte der Korrelationsfunktion für unterschiedlich stark ausgeprägte Dichten der analysierten Probekörper.....	92
Abbildung 5-26: Frames der auszuwertenden Probenoberfläche in In-situ-LSP-Versuchen, a) relativ glatte Oberfläche, erzeugt mit Standardprozessparametern, und b) relativ raue Oberfläche an einem Probekörper gefertigt mit variierten Laserleistung auf 75 W.....	94
Abbildung 5-27: Ausprägung der Defekte mit quadratischer Grundform während der Fertigung im PBF-LB/M-Prozess für Kantenlänge $a = 160 \mu\text{m}$ und $a = 120 \mu\text{m}$	95
Abbildung 5-28: Querschnittsfläche der Defekte in der x/y-Ebene, abgeleitet von den Ergebnissen, die in der x/z-Ebene ermittelt wurden.....	96
Abbildung 5-29: Schematische Darstellung der gewählten Strategie zur Erzeugung und Auswertung lokal auftretender Defekte. a) LSP-Messbereich mit lokal durch Boole'sche Operationen eingebrachten Defekten. b) Definition der auszuwertenden Bereiche und Scanvektoren innerhalb der LSP-Software.....	96
Abbildung 5-30: Vergleich der Messsignale an Proben mit Defekten an lokal definierten Positionen: a) Defektgröße DH080 und b) DH160.....	97
Abbildung 5-31: Reale Ausprägung der Defekte, die mittels LSP-Methode vermessen wurden, ermittelt mit dem mCT-Verfahren.....	98
Abbildung 5-32: a) Schematische Darstellung der Erzeugung von Defekten nahe der Oberfläche unter Angabe der Anzahl an Schichten, die über dem Defekt gefertigt werden; b) Resultat der Einbringung von Defekten in Probekörpern.....	99
Abbildung 5-33: Schematische Darstellung der Auswertemethodik zur Detektion der Position von Defekten. a) ausgewählter Messbereich mit einem Defekt in der Mitte des Scanvektors. b) Unterteilung der Auswertebereiche entlang des Scanvektors zur Anregung der Speckle-Muster.....	101
Abbildung 5-34: Zusammenhang der mechanischen Kennwerte 1. Maximale Zugfestigkeit und 2. Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Korrelationsfunktion.....	103
Abbildung 5-35: Vergleich händischer Messungen der Schmelzbadbreiten b_{real} mit Ergebnissen der softwarebasierten Auswertung der Schmelzbadbreiten b_S	108

Abbildung 5-36: Gegenüberstellung von Schmelzbadbreiten, welche durch die Software <i>bS</i> und durch händische Messungen <i>breal</i> an vier variierten Prozessparametersätzen ermittelt werden konnten	110
Abbildung 5-37: Beispielhafte Darstellung der Auswertung von Schmelzbadlängen anhand der Belichtung einer Einzelspur, welche auf der Substratplatte belichtet wurde.	112
Abbildung 5-38: Händisch und mittels HSK-Systems ermittelte Schmelzbadlängen, aufgetragen über der genutzten Laserleistung zur Belichtung der Einzelspur.	113
Abbildung 5-39: Abkühl dauern ermittelt mit der entwickelten HSK-Software anhand einer Einzelspur aus dem Material DEW Printdur 4404, belichtet mit Standardprozessparametern. Zusätzlich sind drei Bilder aus den HSK-Daten dargestellt, um den Einfluss von Reflexionen auf die Auswertung zu verdeutlichen.	114
Abbildung 5-40: Wärmestrom entlang der Schmelzbadgrenzen im PBF-LB/M-Prozess.	115
Abbildung 5-41: a) Schematische Darstellung der Ausprägung einer Absenkung der Schmelzbadoberfläche im PBF-LB/M in Anlehnung an [85, 200, 201]. b) Bild eines HSK-Videos aus eigenen Versuchen als Vergleich.	115
Abbildung 5-42: Analyse der Abkühl dauern aller Pixel, die auf der Schmelzbahn verortet sind. Analysiert an einer Einzelspur, gefertigt mit Referenzparametern. Die Pixel sind in Klassen mit einer Reichweite von 3 unterteilt: Klasse 1: 1–3 Bilder Abkühl dauern, Klasse 2: 4–6 Bilder, Klasse 3: 7–9 Bilder etc.	116
Abbildung 5-43: Ergebnisse einer umfangreichen HSK-Auswertung anhand einer Einzelspur, belichtet mit einer Laserleistung von $PL = 350\text{ W}$. Ermittelt wurden dabei die Kennwerte der a) Schmelzbadbreite, -länge und die Abkühl dauern in c). Ebenso ist in b) ein Bild des HSK-Videos dargestellt, der Laser befindet sich außerhalb des Bildausschnittes.	117
Abbildung 5-44: Verteilung der Abkühl dauern nach Pixel, ermittelt anhand der Belichtung einer Einzelspur mit a) einer Laserleistung von $PL = 200\text{ W}$; b) einer Laserleistung von $PL = 350\text{ W}$	118
Abbildung 5-45: Transmission des Bandpassfilters BP635 <i>IE_BP635</i> sowie die Detektierbarkeit von Intensitäten des Kamerasensors <i>IE_Sensor</i> in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie die aus diesen beiden Werten resultierenden totalen Detektionsraten von Intensitäten <i>IE_total</i>	120
Abbildung 5-46: Mittels High-Speed-Kamera detektierte durchschnittliche Intensität aufgetragen über der mittels Quotientenpyrometer gemessenen Temperatur an der gleichen Position auf der Probe bei eingestellten Belichtungszeiten der High-Speed-Kamera von 100 ms, 500 ms, 2 000 ms; eine für 2 000 ms Belichtungszeit abgeleitete Fit-Funktion (blaue durchgängige Linie), die für die restlichen Belichtungszeiten (blaue unterbrochene Linien) angepasst wurde.	121
Abbildung 5-47: Umrechnung der mittels HSK-Systems ermittelten Intensitäten an drei Pixeln, die in der Mitte des Schmelzbad liegen.	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht über verschiedene Defektarten, deren häufigste Ursachen sowie potenzielle Auswirkungen auf die resultierenden Produkte [19, 90].	12
Tabelle 2-2: Lokale und zeitliche Auflösungen verschiedener optischer Messsysteme, eingesetzt in PBF-LB/M-Prozessen.	20
Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung der verarbeiteten Materialien EIS GP1 und DEW 316L nach den jeweiligen Datenblättern.	31
Tabelle 4-2: Ausgewählte mechanische Eigenschaften der verarbeiteten Materialien EOS GP1 und DEW Printdur 4404 bzw. DEW 316L.	31
Tabelle 4-3: Darstellung des Funktionsumfangs des auf C++ basierten Tools zur Analyse von Defekten in PBF-LB/M-gefertigten Komponenten.	33
Tabelle 4-4: Verwendete Hardwarekomponenten und deren Merkmale für die Versuche zur Laser-Speckle-Photometrie.	37
Tabelle 4-5: Verwendete Prozessparameter zur Anregung der Speckle-Muster im Bereich der LSP-Messungen sowie Einstellungen der LSP-Kamera.	40
Tabelle 4-6: Standard-Prozessparameter zur Fertigung von EOS GP1 auf der EOS M270.	41
Tabelle 4-7 Verwendete Hardwarekomponenten und deren Merkmale für die Versuche zur High-Speed-Videographie.	43
Tabelle 4-8: Eigenschaften und Einstellungen des verwendeten High-Speed-Pyrometers zur Korrelation der detektierten Intensität mit Oberflächentemperaturen [160].	51
Tabelle 5-1: Genutzte Prozessparameter zur Fertigung von Zugstabrohlingen mit stochastisch verteilten Defekten.	56
Tabelle 5-2: Auswahl an Faktoren, die für die mathematische Beschreibung der maximalen Zugfestigkeit und Bruchdehnung genutzt wurden.	67
Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Zugversuchen von Probekörpern mit stochastisch verteilter LoF-Porosität.	71
Tabelle 5-4: Gewählte Spannungsamplituden für die Durchführung der Dauerfestigkeitsversuche.	80

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-5: Anzahl der Zyklen, die der Referenzprobekörper unter Belastung mit unterschiedlichen Spannungsamplituden ausgehalten hat. Zusätzlich dargestellt sind die Anteile der Zyklen, die von den defektbehafteten Probekörpern ausgehalten wurden.	82
Tabelle 5-6: Einfluss der Defekte auf die mechanischen Kennwerte maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Relation zu den Kennwerten der Referenzproben.....	84
Tabelle 5-7 Genutzte Parameter für die Versuchsreihe zur Bewertung des Einflusses der Leistung des BelichtungsLasers auf das LSP-Messergebnis.	87
Tabelle 5-8: Gegenüberstellung der Messwerte der Korrelationsfunktion, ermittelt mit unterschiedlichen Belichtungsintensitäten, vor $C(39)$ und nach Normierung $Cn(39)$ mittels Normierungsfunktion (5-2).....	91
Tabelle 5-9: Theoretische Dichten unterhalb der Messbereiche 1, 2 und 3 aus Abbildung 5-29.	97
Tabelle 5-10: Verwendete Parameter zur Aufzeichnung von Videos mit dem HSK-System, falls nicht ausdrücklich anders beschrieben....	107
Tabelle 5-11: Genutzte Prozessparameter für die Erzeugung von Einzelspuren aus dem Material DEW 316L auf einer SLM 280 HL PBF-LB/M-Anlage.....	109

10 ANHANG

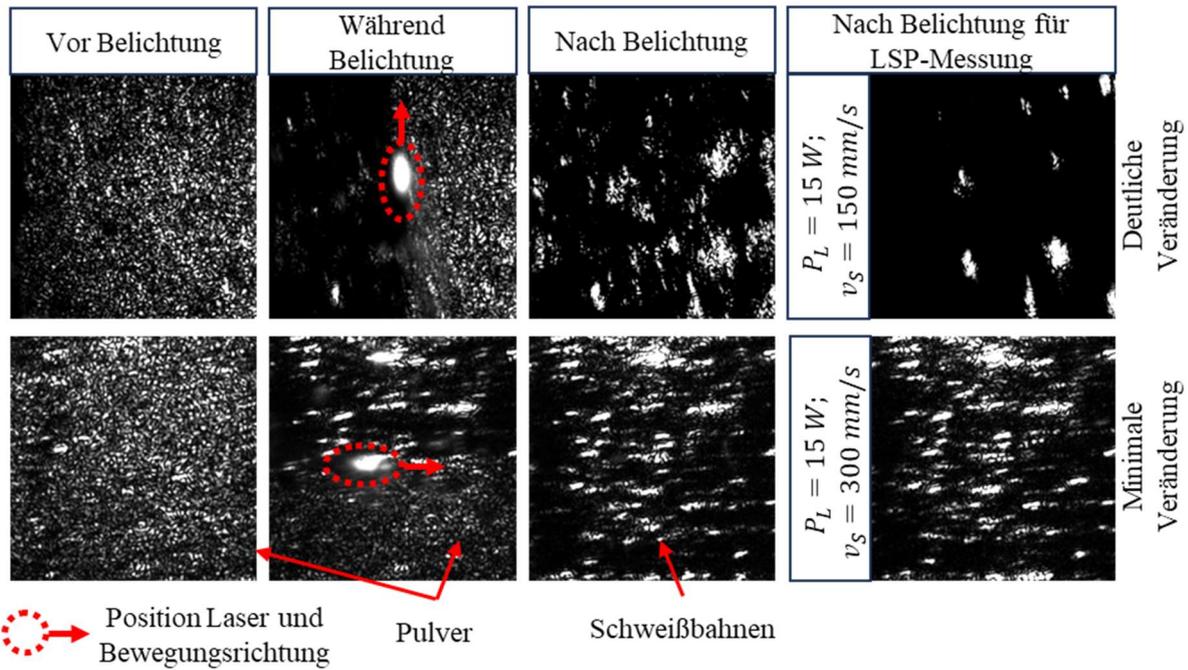
Abbildungen

The screenshot shows the 'Videoauswahl' window with the following configuration:

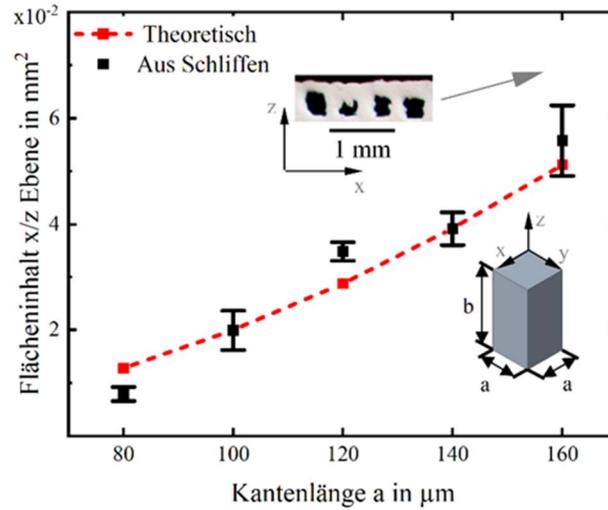
- Ornderauswahl:**
 - Eingabeordner: C:\Users\Arno\Desktop\Arno Test\V
 - Ausgabeordner: C:\Users\Arno\Desktop\Arno Test\A
- Kamera und Maschinenparameter:**
 - Frames/Sekunde: 40000
 - Scangeschw.[m/s]: 1
 - Untere Intensität: 20
 - Obere Intensität: 255
- Auswertungsoptionen:**
 - Video-Overlay
 - Maximale Temperaturen/Abkühlframes
 - Schmelzbadlänge auslesen
 - Schmelzbadlängenhistogramm
 - Breitenauslesen
 - Breiten x Schmelzbad
 - Abkühlratenhistogramm
 - Abkühlraten x Heat
 - Defekterkennung
 - Abkühlungen Manuell bestimmen
 - Autoskalierung
- Filteroptionen:**
 - Filter 1: 02
 - Filter 2: 03
 - Filter 3: 04
- Falschfarben Grenzen:**
 - Formula: $i1 \geq 255 > i2 > G1 \geq i3 > G2 \geq i3 > G3 \geq i4 > G4 \geq i5 > 2$
 - G1: 200
 - G2: 100
 - G3: 0
 - G4: -100

A 'Speichern' button is located at the bottom left of the window.

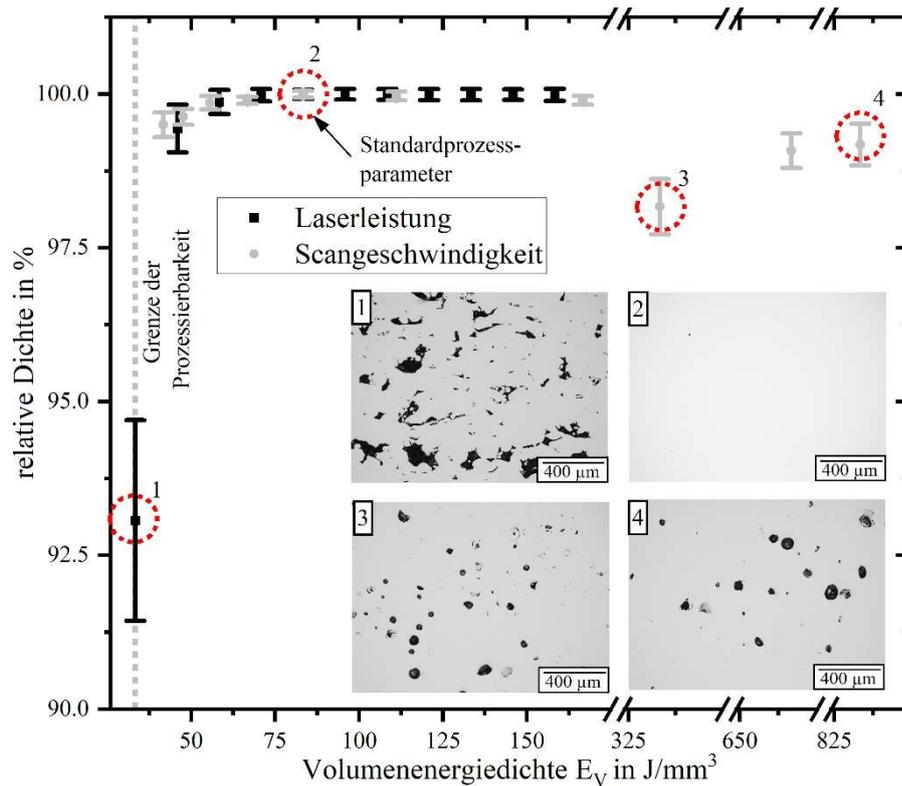
A 1: Darstellung der Softwareoberfläche der HSK-Software, die zur Auswertung der HSK-Videos genutzt wird.



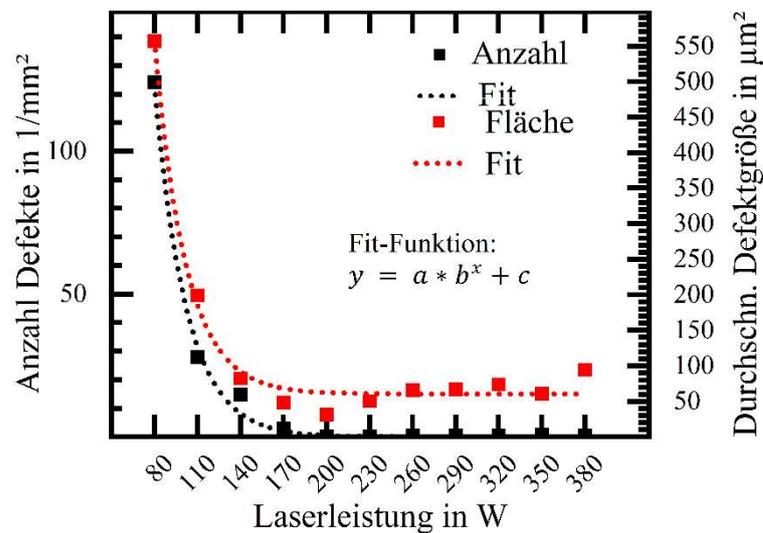
A 2: Vergleich des Einflusses zweier Prozessparametersätze zur Anregung der Probenoberfläche auf die Oberflächentopografie. Oben: Höhere Volumenenergie-dichte führt zu einer Veränderung der Oberflächeneigenschaften und der Speckle-Muster. Unten: Die Oberflächenstruktur vor sowie nach der LSP-Belichtung ist nahezu identisch.



A 3: Theoretische Größen der Defekte in den Probekörpern sowie durch Schliffe bestimmte Querschnittsflächen in der x/z-Ebene.

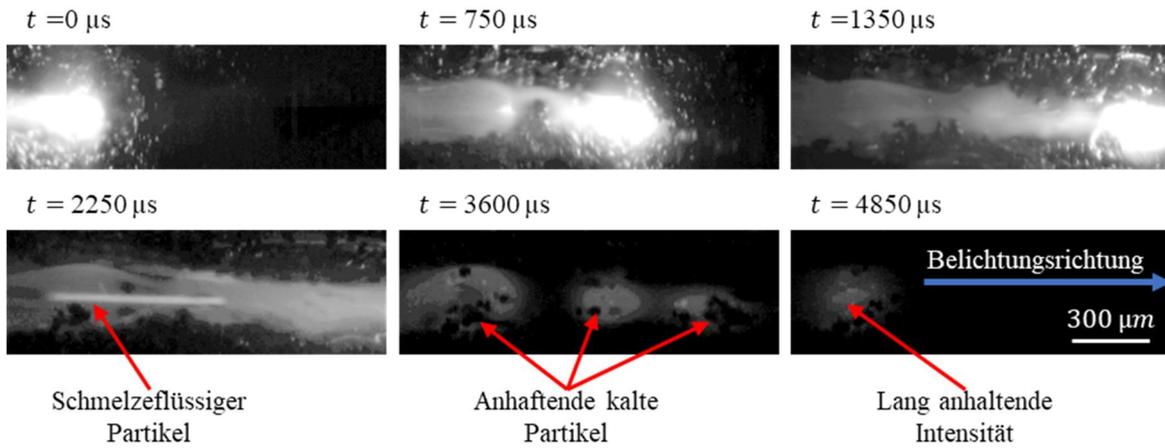


A 4: Auswirkungen variiertes Prozessparameter (Scangeschwindigkeit und Laserleistung) auf die resultierende relative Dichte von Probekörpern aus dem Material DEW Printdur 4404, gefertigt auf einer SLM 280HL. Zusätzlich dargestellt sind Schliffbilder ausgewählter Probekörper, deren Prozessparametersätze durch Nummerierung und Ziffern ersichtlich gemacht sind.

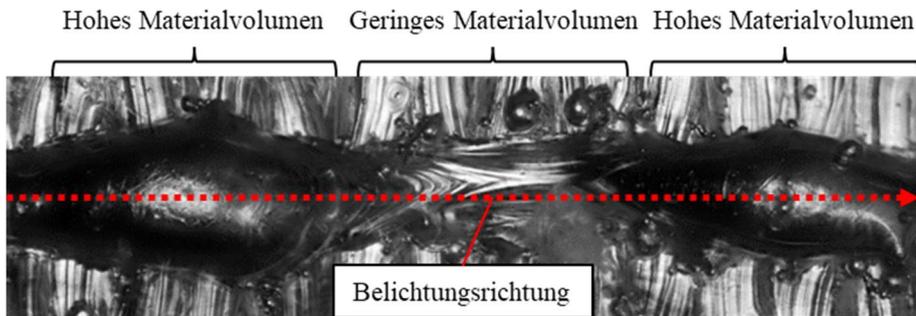


A 5: Anzahl von Defekten je mm^2 und durchschnittliche Defektgrößen im Material DEW Printdur 4404 bzw. 316L durch Variationen der Laserleistungen bei der Verarbeitung auf einer SLM 280HL Anlage.

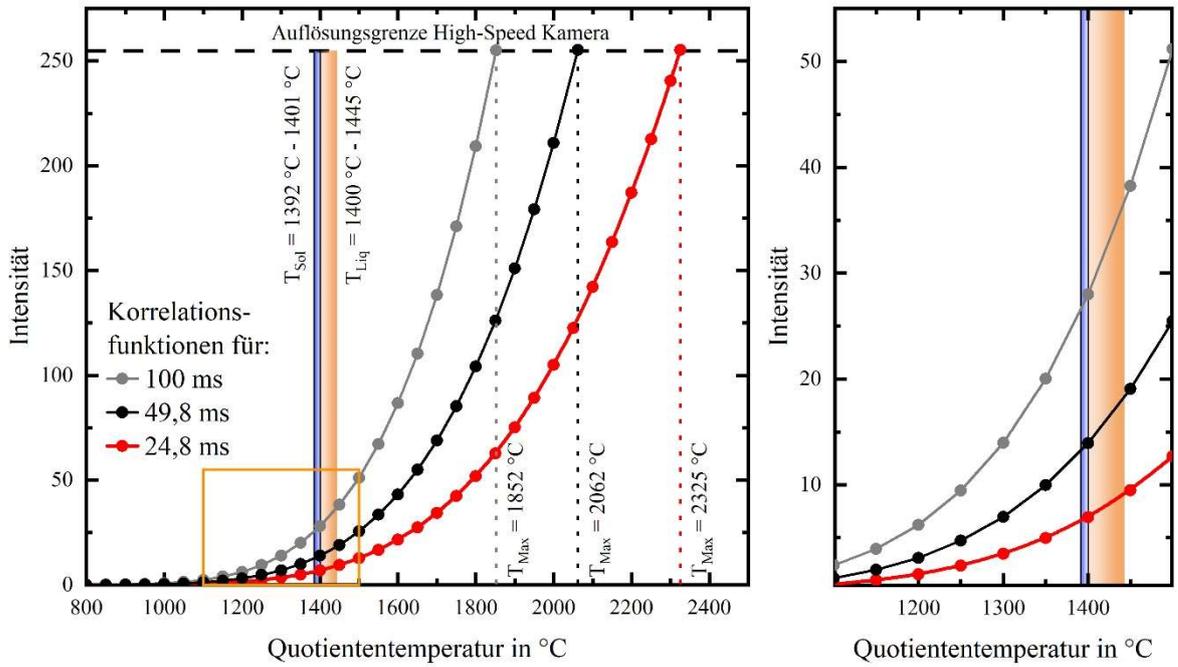
10 Anhang



A 6: Auswertung einzelner Videosequenzen zur Sichtung der Effekte, die in Unterabschnitt 5.4.2 vorgestellt werden.



A 7: Reproduzierte Schweißbahn, gefertigt mit einer $P_L = 350 \text{ W}$, anhand der das vermutete Phänomen des Ballings bestätigt werden kann.



A 8: Strahlungswerte, berechnet mittels Korrelationsfunktion (5-14), für unterschiedliche Belichtungszeiten unter Angabe der jeweils maximal detektierbaren Temperatur (T_{Max}) durch das angewandte Verfahren.

10 Anhang

Tabellen

T 1: Ausgewählte technische Daten der in dieser Dissertation genutzten PBF-LB/M Systeme EOSINT M270 und SLM 280 HL.

Eigenschaft	EOS M270 [137]	SLM 280 HL [214]
Bauvolumen	250 mm x 250 mm x 215 mm	280 mm x 280 mm x 360 mm
Laser	Yb-Faserlaser	2 x Yb-Faserlaser
Wellenlänge λ	1 060 – 1 100 μm	1 040 μm
Präzisionsoptik	F-Thetalinse	Vario-Scan
Fokuspunktdurchmesser Laser d_F	100 μm – 500 μm	80 μm – 120 μm
Laserleistung P_L	bis zu 200 W	2 x bis zu 700 W
Scangeschwindigkeit v_S	bis zu 7 m/s	bis zu 15 m/s
Schutzgas	Strickstoff	Stickstoff / Argon

T 2: Ausgewählte Parameter zum Hervorrufen von prozesstypischen Defekten im PBF-LB/M sowie deren Variationen, grau hinterlegt sind Werte der Parameter, die im Standardparametersatz genutzt werden.

Manipulation der P_L		Manipulation der v_S		Manipulation des h	
Bezeichnung	Wert in W	Bezeichnung	Wert in mm/s	Bezeichnung	Wert in mm
P_{St}	195	v_{St}	1 000	h_{26}	0,26
P_{165}	165	v_{866}	866,67	h_{19}	0,19
P_{135}	135	v_{764}	764,71	h_{14}	0,14
P_{120}	120	v_{684}	684,21	h_{12}	0,12
P_{105}	105	v_{619}	619,05	h_{St}	0,1
P_{90}	90	v_{565}	565,21	h_{09}	0,09
P_{75}	75	v_{520}	520,00	h_{08}	0,08
		v_{481}	481,48	h_{07}	0,07
		v_{448}	448,27	h_{06}	0,06
		v_{419}	419,35		

T 3: Eigenschaften von Defekten, die im Material EOS GP1 durch Variationen der Laserleistung entstehen. Analysiert in der x/z Ebene.

	Laserleistung in W				
	75	105	135	165	195
Relative Dichte in %	90,57	97,55	99,82	99,89	99,98
Anzahl Defekte je mm²	286	134	26	9	4
Median Defektfläche μm²	320 ± 1 093	178 ± 407	67 ± 101	47 ± 52	24 ± 21
Maximale Defektfläche μm²	27 260	5 940	790	326	125

Fertigungsanlage: EOS M270; Material: EOS GP1 (1.4542 bzw. 17-4PH); Prozessgas: Stickstoff; $v_s = 1\,000\text{ mm/s}$; $d_s = 0,02\text{ mm}$; $h = 0,1\text{ mm}$

T 4: Werte der Korrelationsfunktion C(39) die sich durch LSP-Messungen sowie Berechnungen mit Formel 5-8 in den Auswertebereichen 1, 2 und 3 ergeben. Dargestellt ist zusätzlich die Abweichung der Messwerte sowie der Berechneten.

		DH080			DH160		
		C(39) LSP-Messung	C(39) Formel 5-8	Abweichung in %	C(39) LSP-Messung	C(39) Formel 5-8	Abweichung in %
Bereich	1	0,777	0,767	-1,29	0,791	2,926	269,99
	2	0,677	0,677	0	0,750	0,850	13,33
	3	0,722	0,767* / 0,722**	6,23* / 2,49**	0,843	2,926	247,09

*: Ergebnisse unter der Annahme, dass alle Defekte ausgeprägt sind; **: Korrektur der Ergebnisse nach Auswertung der mCT-Daten in denen ersichtlich ist, dass ein Defekt in Bereich 3 von DH080 nicht ausgeprägt ist.

T 5: Ermittelte Flächen von Defekten in x/z-Richtung, hervorgerufen durch Boole'sche Operationen mit Quadern, dessen Grundfläche quadratisch (Kantenlänge a) und deren Höhe dem Doppelten der Kantenlänge a entspricht.

	DH080	DH100	DH120	DH140	DH160
a in μm	80	100	120	140	160
b in μm	160	200	240	280	320
A = a * b in mm²	0,0128	0,02	0,0288	0,0392	0,0512
A_M in mm²	0,00733 ± 0,0013	0,01993 ± 0,0037	0,03083 ± 0,00176	0,03912 ± 0,00307	0,05576 ± 0,00665
Abweichung in %	-38,04	-0,35	7,05	-0,2	8,9
a_M = $\sqrt{\frac{A_M}{2}}$ in μm	60,54	99,82	124,16	139,72	166,97

10 Anhang

T 6: Berechnete Flächen von Defekten in x/y-Richtung, hervorgerufen durch Boole'sche Operationen mit *Quadern*, dessen Grundfläche quadratisch (Kantenlänge a) und deren Höhe dem Doppelten der Kantenlänge a entspricht.

	DH080	DH100	DH120	DH140	DH160
a in μm	80	100	120	140	160
$A = a * a$ in mm^2	0,0064	0,001	0,0144	0,0196	0,0256
$A_M = a_M^2$ in mm^2	$0,00366 \pm$ $0,0007$	$0,00996 \pm$ $0,0019$	$0,01541 \pm$ $0,00088$	$0,01952 \pm$ $0,00154$	$0,02788 \pm$ $0,00333$
Abweichung in %	-38,04	-0,35	7,05	-0,2	8,9

T 7: Eigenschaften von Defekten, die im Material DEW Printdur 4404 durch Variationen der Laserleistung entstehen. Analysiert in der x/z Ebene.

	Laserleistung in W									
	80	110	140	170	200	230	260	290	320	350
Relative Dichte in %	93,07	99,44	99,88	99,98	99,99	99,99	99,99	99,99	99,98	99,98
Anzahl Defekte je mm^2	124,24	28	14,95	33	0,4	0,4	0,54	0,45	0,55	0,86
Median Defekt- fläche μm^2	577 ± 1744	199 ± 985	83 ± 202	48 ± 66	31 ± 29	50 ± 44	56 ± 39	67 ± 51	74 ± 66	62 ± 76
Maxi- male Defekt- fläche μm^2	18 887	9 917	1 968	245	86	129	118	156	247	253

Fertigungsanlage: SLM 280HL; Material; DEW Printdur 4404 (316L); Prozessgas: Stickstoff; $v_S = 800 \text{ mm/s}$; $d_S = 0,03 \text{ mm}$; $h = 0,1 \text{ mm}$

T 8: Auswertung der Schmelzbadbreiten für Einzelspurversuche, bei denen die Laserleistung variiert wurde.

Parame- tersatz	Laserlei- stung in W	Auswertung mit Software		Händische Messung		Abwei- chung in %
		b_S in μm	δ_S in μm	b_{real} in μm	δ_{real} in μm	
Nr. 1	140	99,88	12,26	98,59	9,54	1,31
Nr. 2	200	115,73	3,16	116,99	6,46	- 1,07
Nr. 3	260	130,56	3,42	132,33	7,24	- 1,34
Nr. 4	320	136,90	10,12	139,25	12,87	- 1,68

$v_S = 800 \text{ mm/s}$; $d_S = 0,03 \text{ mm}$; $h = 0,1 \text{ mm}$; Prozessgas: Stickstoff, Maschine: SLM 280 HL

11 PUBLIKATIONSVERZEICHNIS

- [P1] A. Elspaß, D. Dang, J. Wegner, U. Cikalova, B. Bendjus, G. Witt, S. Kleszczynski, Introduction and accuracy improvement of laser speckle photometry for in-situ monitoring material densities in laser powder bed fusion of metals, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 108, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.077>
- [P2] A. Elspaß, J. Wegner, H. Schoenrath, N. Horstjann, S. Kleszczynski, High-Precision measurement of melt pool properties during laser-based powder bed fusion of metals by high-speed imaging, in: *2023 International Solid Freeform Fabrication Symposium* (2023). <https://doi.org/10.26153/tsw/51016>
- [P3] F. Stern, J. Garbowski, A. Elspaß, D. Kotzem, S. Kleszczynski, G. Witt, F. Walther, Influence assessment of artificial defects on the fatigue behavior of additively manufactured stainless steel 316LVM, in *Procidia Structural Integrity*, Volume 37 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.071>
- [P4] D. Kotzem, S. Kleszczynski, F. Stern, A. Elspaß, J. Tenkamp, G. Witt, F. Walter, Impact of single structural voids on fatigue properties of AISI 316L manufactured by laser powder bed fusion, in *International Journal of Fatigue* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106207>
- [P5] N. Schnell, J. Wegner, A. Elspaß, S. Kleszczynski, Effective absorptivity of diamond-reinforced metal matrix composites for powder bed fusion using a laser beam, in *Additive Manufacturing Letters*, Volume 6 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100138>
- [P6] D. Dang, A. Elspaß, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, G. Witt, Investigation of the Roughness Influence on the Absorption Behavior of additively manufactured Metals by the Laser Speckle Photometry, in: *44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (2021). <https://doi.org/10.1109/ISSE51996.2021.9467607>
- [P7] D. Dang, A. Elspaß, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, G. Witt, Material Characterization of Additively Manufactured Metals by Laser Speckle Photometry, in: *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, (2020). <https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120869>
- [P8] D. Dang, A. Elspaß, U. Cikalova, S. Kleszczynski, B. Bendjus, and G. Witt, "First investigations of Laser Speckle Photometry for in-situ Density Measurement during Laser Powder Bed Fusion of Metals," *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC)* in Berlin, 2020
- [P9] S. Kleszczynski, A. Elspaß, Influence of isolated structural defects on the static mechanical properties of PBF-LB/M components, in: *Procidia CRIP* Volume 94 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.036>

11 Publikationsverzeichnis

[P10] S. Schoar, A. Elspaß, H.-J. Dohmen, S. Kleszczynski, F.-K. Benra, Design and fabrication of optimised aerostatic dry gas seals using advances numerical models and next generation production technology, in: Politehnika i dizajn (2021). <https://hrcak.srce.hr/273773>

[P11] S. Schoar, A. Elspaß, H.-J. Dohmen, S. Kleszczynski, F.-K. Benra, Validation of a numerical model to support the design of additively manufactured aerostatic dry gas seals carried out on a test bench through use of seals with defined permeabilities, in 14th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics, (2021). <https://doi.org/10.29008/ETC2021-541>

[P12] H. Schoentrauh, J. Wegner, M. Frey, E. Soares Barreto, A. Elspaß, N. Schnell, B. Erdmann, J. Neises, N. Ellendt, R. Busch, S. Kleszczynski, Analytical Modeling of Cooling Rates in PBF-LB/M of Bulk Metallic Glasses, in: 2023 International Solid Freeform Fabrication Symposium, (2023). <https://doi.org/10.26153/tsw/50980>