



Dissertation

Mergim Krasniqi

Prozess- und geometrieorientierte Optimierung der Maßhaltigkeit von AlSi10Mg-Bauteilen beim pulverbett- basierten Laserstrahlschmelzen

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-49-7

DOI 10.7795/110.20250714

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-17

Braunschweig, Juli 2025

Mergim Krasniqi

**Prozess- und geometrieorientierte Optimierung
der Maßhaltigkeit von AlSi10Mg-Bauteilen beim
pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen**

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-49-7

DOI 10.7795/110.20250714

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Krasniqi, M., 2025. *Prozess- und geometrieorientierte Optimierung der Maßhaltigkeit von AlSi10Mg-Bauteilen beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht Diss-17. ISBN 978-3-944659-49-7. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250714>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Prozess- und geometrieorientierte Optimierung der Maßhaltigkeit von AISi10Mg-Bauteilen beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Braunschweig
zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Mergim Krasniqi
geboren in: Hildesheim, Deutschland

eingereicht am: 08.01.2025
mündliche Prüfung am: 23.06.2025

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Gutachter: PD Dr.-Ing. habil. Frank Löffler

2025

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Mein besonderer Dank gilt PD Dr.-Ing. habil. Frank Löffler, Leiter des Fachbereiches Wissenschaftlicher Gerätebau der PTB, der mich über die gesamte Promotionszeit hinweg mit großem Engagement fachlich und persönlich begleitet hat. Für die intensive Betreuung, die zahlreichen Diskussionen und seine konstruktive Unterstützung bin ich ihm außerordentlich dankbar.

Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch, meinem Doktorvater an der TU Braunschweig, für seine wissenschaftliche Begleitung, seine stets klaren Rückmeldungen und die Möglichkeit, diese Arbeit in seinem Fachgebiet durchzuführen. Seine ruhige, zielgerichtete Art der Betreuung haben entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Dr.-Ing. Harald Bosse, Abteilungsleiter der Fertigungsmesstechnik der PTB, danke ich für seine langjährige Unterstützung, seine strategischen Anregungen und das Vertrauen, das er mir über die gesamte Promotionszeit entgegengebracht hat – insbesondere auch für seine Förderung meiner wissenschaftlichen Entwicklung.

Für die praktische Umsetzung der additiv gefertigten Prüfkörper danke ich Lukas Kükemück und Maximilian Peglow, die als Techniker für additive Fertigung an der PTB einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Versuchsreihen geleistet haben.

Für den stets konstruktiven fachlichen Austausch zu messtechnischen Fragestellungen danke ich Dr. René Laquai.

Stellvertretend für den gesamten Fachbereich 5.5 der PTB danke ich außerdem Jürgen Rother für die organisatorische Unterstützung und Uwe Langner für die Durchführung der Koordinatenmessungen.

Abschließend gilt mein tief empfundener Dank meiner Familie, die mir über all die Jahre den nötigen Rückhalt gegeben hat – in jeder Phase dieser Arbeit. Für ihre Geduld, ihre Ermutigung und ihren Glauben an mich bin ich unendlich dankbar.

Diese Arbeit ist meinen Eltern gewidmet.

Mergim Krasniqi

Braunschweig, im Juli 2025

Wahrlich, mit der Erschwernis kommt die Erleichterung.

(Sure 94, Vers 6)

Kurzfassung

Die additive Fertigung (AF) hat sich als Schlüsseltechnologie zur Herstellung komplexer Bauteilgeometrien etabliert. Besonders das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (PBF/LB-M) bietet großes Potenzial für Anwendungen in Forschung und Industrie. Trotz erheblicher Fortschritte besteht weiterhin Forschungsbedarf im Bereich der Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit additiv gefertigter Bauteile, insbesondere bei der Verarbeitung von Legierungen wie AlSi10Mg. Bisher fehlt eine integrative Betrachtung der Einflüsse von Prozessparametern, Bauplattformpositionen und Scanstrategien sowie deren Wechselwirkungen.

Diese Arbeit verfolgt einen innovativen Ansatz, indem sie diese Wechselwirkungen erstmals in einem umfassenden Kontext untersucht und die Reproduzierbarkeit als integralen Bestandteil einbezieht. Aufbauend auf systematischen Grundlagenuntersuchungen und der Anwendung von Methoden wie statistischer Versuchsplanung (DoE, engl. Design of experiments) und Varianzanalyse (ANOVA, engl. Analysis of variance) werden signifikante Einflussgrößen auf die Materialeigenschaften und die Maßhaltigkeiten herausgearbeitet. Bereits die gezielte Anpassung vom Strahlversatz und der X-Y-Achsenkalibrierung der Fertigungsanlage zeigt, wie systematische Abweichungen effektiv reduziert werden können. Die Maßhaltigkeitsuntersuchungen wurden dabei an einem speziell entwickelten Prüfkörper durchgeführt, der repräsentative Geometrien für die Untersuchung relevanter Einflussgrößen enthält.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Prozessparameter Laserleistung und Scangeschwindigkeit die signifikantesten Faktoren für die Maßhaltigkeit sind, während Scanstrategien wie die Kreuzbelichtung zusätzliche Steigerungen der Oberflächenqualität ermöglichen. Die Position der Bauteile auf der Bauplattform zeigt hingegen nur bei bestimmten Geometrien einen signifikanten Einfluss, insbesondere in Abhängigkeit von der Richtung des Schutzgasstroms.

Diese Arbeit liefert somit fundierte Erkenntnisse zur Optimierung additiver Fertigungsprozesse und unterstützt die industrielle Praxis bei der nachhaltigen Verbesserung der Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit additiv gefertigter Bauteile. Die gezielte Abstimmung der Prozessparameter, die Anpassung von Strahlversatz und Achsenkalibrierung sowie die Wahl geeigneter Scanstrategien und Bauplattformpositionierungen ermöglichen eine signifikante Reduktion von Maßabweichungen und eine Steigerung der Reproduzierbarkeit und Oberflächenqualität. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen wesentlich dazu bei, die additive Fertigung als präzises, reproduzierbares und anpassungsfähiges Verfahren weiterzuentwickeln und die Qualität sowie Maßhaltigkeit der Bauteile auf ein neues Niveau zu heben.

Abstract

Additive manufacturing (AM) has established itself as a key technology for the production of complex component geometries. Powder bed-based laser melting (PBF/LB-M) in particular offers great potential for applications in research and industry. Despite considerable progress, there is still a need for research into the dimensional accuracy and reproducibility of additively manufactured components, particularly in the processing of alloys such as AlSi10Mg. To date, there has been no integrative consideration of the influences of process parameters, build platform positions and scanning strategies and their interactions.

This work takes a novel approach by investigating these interactions for the first time in a comprehensive context and also analysing reproducibility. Based on systematic fundamental investigations and the application of methods such as statistical design of experiments (DoE) and analysis of variance (ANOVA), significant influencing variables on the material properties and dimensional accuracy are analysed. The targeted adjustment of the beam offset and the X-Y axis scaling of the PBF/LB-M machine already shows how systematic deviations can be effectively reduced. The dimensional accuracy tests were carried out on a specially developed test specimen with representative geometries to analyse relevant influencing variables.

The results make it clear that the process parameters laser power and scanning speed are the most significant factors for dimensional accuracy, while scanning strategies such as cross-exposure enable additional increases in surface quality. The position on the build platform, on the other hand, only plays a significant role for certain geometries, especially depending on the direction of the shielding gas flow.

This work thus provides well-founded findings for the optimisation of additive manufacturing processes and supports industrial practice in the sustainable improvement of the usability and reliability of additively manufactured components. The targeted tuning of process parameters, the adjustment of beam offset and axis scaling as well as the selection of suitable scanning strategies and build platform positioning enable a significant reduction in dimensional deviations and an increase in reproducibility and surface quality. The knowledge gained contributes significantly to the further development of additive manufacturing as a precise, reproducible and adaptable process and to raising the quality and dimensional accuracy of components to a new level.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung..... VII

AbbildungsverzeichnisXV

Tabellenverzeichnis..... XVIII

Abkürzungen und Formelzeichen XIX

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Problemstellung..... 1

1.3 Aufbau der Arbeit..... 2

2 Stand der Technik und Forschung3

2.1 Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (PBF/LB-M) 3

2.2 Prozesskette und Verfahrensprinzip beim PBF/LB-M..... 3

2.3 Materialeigenschaften und Mikrostruktur von AlSi10Mg 7

2.3.1 Mechanische Eigenschaften von AlSi10Mg 7

2.3.2 Mikrostruktur von AlSi10Mg 8

2.4 Einflussfaktoren auf Maßhaltigkeit, Oberflächenrauheit und Materialeigenschaften10

2.4.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität 11

2.4.2 Prozessparameteroptimierung 14

2.4.3 Messtechniken und Messunsicherheit in der additiven Fertigung..... 15

2.4.4 Einfluss der Bauplattformposition auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität..... 18

2.4.5 Thermische Einflüsse 18

2.4.6 Nachbearbeitungstechniken 19

2.5 Fehlerquellen, Prozessstörungen, Störgrößen und Defekte beim Laserstrahlschmelzen 20

2.5.1 Porosität und Inhomogenitäten 20

2.5.2 Strahlversatz und X-Y-Achsenkalierung 21

2.6 Wärmebehandlung von additiv gefertigten Bauteilen 22

2.6.1 Spannungsarmglühen und Einfluss der Wärmebehandlung..... 22

2.6.2 Bauplattformheizung..... 22

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.7 | Statistische Methoden für die Prozessparameteroptimierung..... | 23 |
| 2.7.1 | Statistische Versuchsplanung (DoE, Design of Experiments)..... | 23 |
| 2.7.2 | Varianzanalyse (ANOVA, Analysis of Variance) | 23 |
| 2.8 | Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit von PBF/LB-M-Ergebnissen..... | 23 |
| 2.8.1 | Reproduzierbarkeit | 23 |
| 2.8.2 | Übertragbarkeit..... | 25 |
| 2.9 | Fazit und Zusammenfassung des Standes der Technik und Forschung..... | 25 |
| 3 | Handlungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise..... | 27 |
| 3.1 | Forschungslücke..... | 27 |
| 3.2 | Zielsetzung | 27 |
| 3.3 | Grundlagenuntersuchungen..... | 28 |
| 3.4 | Maßhaltigkeitsuntersuchungen | 29 |
| 3.4.1 | Einfluss von Prozessparametern, Bauplattformpositionen und Reproduzierbarkeit..... | 29 |
| 3.4.2 | Einfluss von Scanstrategien..... | 29 |
| 4 | Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter und Materialeigenschaften mithilfe statistischer Methoden..... | 30 |
| 4.1 | Untersuchungsaufbau und Methodik..... | 33 |
| 4.1.1 | PBF/LB-M-Anlage und Werkstoff AlSi10Mg | 33 |
| 4.1.2 | Anforderungsdefinition | 34 |
| 4.1.3 | Fertigung und Wärmebehandlung..... | 35 |
| 4.1.4 | Probenpräparation und Materialcharakterisierung..... | 35 |
| 4.1.5 | Experimentelle Planung und statistische Analyse (DoE und ANOVA) | 37 |
| 4.2 | Ergebnisse und Analyse | 39 |
| 4.2.1 | Dichte | 39 |
| 4.2.2 | Rauheit..... | 41 |
| 4.2.3 | Härte..... | 44 |
| 4.2.4 | Zugprüfung: Zugfestigkeit und Bruchdehnung | 47 |
| 4.3 | ANOVA-Ergebnisse | 51 |
| 4.4 | Optimierung der Prozessparameter / Zielgrößenoptimierung..... | 52 |
| 4.5 | Diskussion | 55 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5.1 | Dichte | 55 |
| 4.5.2 | Rauheit | 55 |
| 4.5.3 | Härte | 56 |
| 4.5.4 | Zugfestigkeit und Bruchdehnung | 57 |
| 4.6 | Herausforderungen bei der Übertragbarkeit und vergleichende Studie zu den Materialeigenschaften von AlSi10Mg | 58 |
| 4.7 | Schlussfolgerung / Zwischenresultat..... | 62 |
| 5 | Einfluss der Prozessparameter und Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit und Untersuchung der Reproduzierbarkeit..... | 63 |
| 5.1 | Prüfkörperentwicklung und Messplan | 63 |
| 5.1.1 | Hintergrund..... | 63 |
| 5.1.2 | Beschreibung des Prüfkörpers..... | 64 |
| 5.1.3 | Versuchsplan | 66 |
| 5.1.4 | Verwendete Messsysteme | 68 |
| 5.2 | Voruntersuchungen..... | 69 |
| 5.2.1 | Anpassung des Strahlversatzes und der X-Y-Achsenkalibrierung..... | 69 |
| 5.2.2 | Vergleich von CT- und KMG-Messungen | 71 |
| 5.3 | Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit | 77 |
| 5.4 | Untersuchung des Einflusses der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit.... | 80 |
| 5.5 | Reproduzierbarkeit | 84 |
| 5.6 | Diskussion | 87 |
| 5.6.1 | Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit | 87 |
| 5.6.2 | Untersuchung des Einflusses der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit. | 89 |
| 5.6.3 | Untersuchung der Reproduzierbarkeit | 91 |
| 5.7 | Zielgrößenoptimierung..... | 96 |
| 5.7.1 | Optimierung der Prozessparameter und Zielgrößen zur Steigerung der Maßhaltigkeit und Materialdichte | 96 |
| 5.7.2 | Ergebnisse der Zielgrößenoptimierung | 97 |
| 5.8 | Schlussfolgerung und Erkenntnisgewinn | 99 |
| 6 | Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit..... | 102 |
| 6.1 | Methoden und Verfahren | 102 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.1.1 | Prüfkörper und Messplan | 102 |
| 6.1.2 | Scanstrategien..... | 103 |
| 6.2 | Ergebnisse..... | 105 |
| 6.2.1 | Einfluss von Scanrotation und Laserumschmelzen auf die Maßhaltigkeit..... | 105 |
| 6.2.2 | Einfluss der Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit..... | 107 |
| 6.2.3 | Einfluss von Scanstrategien und Laserumschmelzen auf die Oberflächeneigenschaften | 108 |
| 6.3 | Zielgrößenoptimierung | 109 |
| 6.4 | Schlussfolgerungen/Erkenntnisgewinn | 110 |
| 7 | Schlussbetrachtung..... | 113 |
| 7.1 | Schlussfolgerung | 113 |
| 7.2 | Reflexion und Bewertung der Erkenntnisse | 114 |
| 7.3 | Praktische Bedeutung..... | 115 |
| 7.4 | Ausblick | 115 |
| | Literaturverzeichnis..... | 117 |
| | Anhang A..... | 141 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 1: Prozesskette der additiven Fertigung..... | 4 |
| Abb. 2: Schräge Oberflächenstrukturen aus AlSi10Mg mit ($\delta \leq 45^\circ$) und ohne ($\delta > 45^\circ$) Stützstrukturen..... | 5 |
| Abb. 3: Verfahrensprinzip des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens (PBF/LB-M) nach VDI 3405 [40]..... | 6 |
| Abb. 4: REM-Aufnahmen der Mikrostruktur von AlSi10Mg bei verschiedenen Vergrößerungen (a) und (b)..... | 9 |
| Abb. 5: Anzahl der Forschungsaktivitäten zur Optimierung der Prozessparameter von AlSi10Mg nach Jahren [61]..... | 14 |
| Abb. 6: Schematische Darstellung eines CT-Scans | 16 |
| Abb. 7: Schematische Darstellung des Einflusses des Strahlversatzes auf die Kontur- genauigkeit und den dimensionellen Fehler beim PBF/LB-M-Prozess | 21 |
| Abb. 8: Methodische Vorgehensweise in dieser Arbeit..... | 28 |
| Abb. 9: Experimenteller Arbeitsablauf der Grundlagenuntersuchungen | 32 |
| Abb. 10: Aufbau und Hauptkomponenten einer PBF/LB-M-Anlage | 33 |
| Abb. 11: Morphologie des AlSi10Mg-Pulvers..... | 34 |
| Abb. 12: Grundkörper der Zugproben mit verschiedenen Bauorientierungen (a) und fertig bearbeitete Zugprobe gemäß DIN 50125 - Form B (b)..... | 37 |
| Abb. 13: Konturdiagramme der Auswertung der Dichtemessungen | 40 |
| Abb. 14: Konturdiagramm der Auswertung von Rauheitsmessungen $R_{a, \text{senkrecht}}$ | 42 |
| Abb. 15: Statistische Auswertung der Rauheitsmessungen in Form eines überlagerten Konturplots | 43 |
| Abb. 16: Konturdiagramm der Härtemessungen im NWB-Zustand | 45 |
| Abb. 17: Auswertung der Härtemessungen für den WB- und NWB-Zustand als überlagertes Konturdiagramm | 46 |
| Abb. 18: Konturdiagramm der Zugfestigkeitsmessungen im NWB-Zustand | 48 |
| Abb. 19: Statistische Auswertung der experimentellen Zugfestigkeits- und Bruchdehnungs- messungen als überlagerte Konturplots..... | 49 |
| Abb. 20: REM-Bruchbilder von Proben im NWB- (a, b, c) und WB-Zustand (d, e, f)..... | 50 |
| Abb. 21: Minitab-Zielgrößenoptimierung | 53 |
| Abb. 22: Optische Schliiffbilder von AlSi10Mg im NWB- (a) und WB-Zustand (b) | 57 |

| | |
|--|----|
| Abb. 23: Bruchdehnung vs. Zugfestigkeit von AlSi10Mg für verschiedene Studien in der wissenschaftlichen Literatur: Die dargestellten Daten umfassen verschiedene Prozessparameter und Wärmebehandlungsbedingungen, wie as-built [18,53,56,57,59,60,66,67,89,95,137,227–230], Bauplattformheizung (BPH) [42,53,56,58,63,78–80,99,231] und Spannungsarmglühen (SAG) [56,57,62,63,66,95,137]. | 60 |
| Abb. 24: Maßhaltigkeitsprüfkörper für die additive Fertigung..... | 64 |
| Abb. 25: Schema des Maßhaltigkeitsprüfkörpers mit verschiedenen Geometrien | 65 |
| Abb. 26: Anordnung der Prüfkörper auf der Bauplattform zur Maßhaltigkeitsuntersuchung.. | 68 |
| Abb. 27: Einfluss der Anpassung von Strahlversatz und XY-Skalierung auf die Maßhaltigkeit bei Längenprüfkörpern | 70 |
| Abb. 28: Einfluss der Anpassung von Strahlversatz und XY-Skalierung auf die Maßhaltigkeit bei Stiften und Löchern | 71 |
| Abb. 29: Differenzen zwischen CT- und KMG-Messungen für verschiedene Geometrie-elemente beim AF-Prüfkörper | 72 |
| Abb. 30: PTB-Lochplattennormal für Vergleichsmessungen..... | 72 |
| Abb. 31: Differenzen zwischen CT- und KMG-Messungen für unidirektionale und bidirektionale Abstände beim kalibrierten PTB-Lochplattennormal | 73 |
| Abb. 32: Einfluss der Prozessparameter P1 – P8 auf die Maßhaltigkeit von Stiften (DPp) und Löchern (DPn) | 77 |
| Abb. 33: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für die Prozessparameter P1-P8 gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen) | 78 |
| Abb. 34: Einfluss des Neigungswinkels und der Prozessparameter auf die Oberflächenrauheit (R_a) | 80 |
| Abb. 35: Maximale Abweichungen und Standardabweichungen der Maßhaltigkeit der Geometrielemente in Abhängigkeit von den Bauplattformpositionen..... | 81 |
| Abb. 36: Summe der absoluten Maßabweichungen in Abhängigkeit von den Bauplattformpositionen (jeweils sieben Messdaten je Prüfelement und Position im Bauraum)..... | 82 |
| Abb. 37: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für unterschiedliche Bauplattformpositionen gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen für Längenmaße) | 83 |
| Abb. 38: Einfluss des Neigungswinkels und der Bauplattformpositionen auf die Oberflächenrauheit (R_a) | 84 |
| Abb. 39: Maximale Abweichungen und Standardabweichungen der Maßhaltigkeit der Geometrielemente in der Reproduzierbarkeitsstudie | 85 |
| Abb. 40: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für die Reproduzierbarkeitsstudie gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen) | 86 |
| Abb. 41: Einfluss des Neigungswinkels auf die Oberflächenrauheit (R_a) bei verschiedenen Wiederholungsmessungen..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 42: Standardabweichungen für die Studien zur Reproduzierbarkeit und Bauplattformpositionen | 95 |
| Abb. 43: Vergleich der Maßabweichungen für verschiedene Geometrien für Parameter P4 und Zielgrößenoptimierung der Maßhaltigkeit | 98 |
| Abb. 44: Untersuchte Scanstrategien für die Maßhaltigkeitsuntersuchungen | 105 |
| Abb. 45: Einfluss von Scanrotation und Laserumschmelzen auf die Maßhaltigkeit: (a) Stifte (DPP) und Löcher (DPn) bei Streifenbelichtung; (b) Kreisringe (CA) bei Inselbelichtung | 106 |
| Abb. 46: Verfügbares Prozessfenster von 140° aufgrund „Blocked Feed Direction“ | 106 |
| Abb. 47: Einfluss der Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit anhand Abstandsmessungen LA_X (a) und Stiften DPP und Löchern DPn (b) | 107 |
| Abb. 48: Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Rauheiten R_a / R_z bei unterschiedlichen Neigungswinkeln | 108 |
| Abb. 49: Prüfkörper mit verschiedenen Belichtungsstrategien: Laserumschmelzen, Streifenbelichtung (Einzelbelichtung) und Inselbelichtung (Einzelbelichtung) | 109 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tab. 1: Einflussfaktoren beim PBF/LB-M..... | 11 |
| Tab. 2: Übersicht der Forschung zu Scanstrategien | 13 |
| Tab. 3: Übersicht häufiger Fehlerquellen und Prozessstörungen beim PBF/LB-M, deren Auswirkungen auf die Bauteilqualität sowie Maßnahmen zur Reduktion | 20 |
| Tab. 4: Zusammenfassung der Forschung zur Prozessparameteroptimierung | 30 |
| Tab. 5: Chemische Zusammensetzung des verwendeten AISi10Mg-Pulvers gemäß EDX-Analyse..... | 33 |
| Tab. 6: Beschreibung der Wärmebehandlungszustände | 35 |
| Tab. 7: Prüfmethoden zur Materialcharakterisierung additiv gefertigter Proben | 36 |
| Tab. 8: Prozessparameter und Stufen des DoE | 38 |
| Tab. 9: Versuchskampagne und Wärmebehandlungszustände der Testproben..... | 39 |
| Tab. 10: ANOVA-Ergebnisse für Dichte | 41 |
| Tab. 11: ANOVA-Ergebnisse für $R_{a, \text{senkrecht}}$ | 44 |
| Tab. 12: ANOVA-Ergebnisse für die Härte im NWB-Zustand..... | 47 |
| Tab. 13: ANOVA-Ergebnisse für die Zugfestigkeit im NWB-Zustand..... | 50 |
| Tab. 14: Zusammenfassung der kor. R^2 -Werte und der signifikanten Effekte ($p = 0,05$) | 52 |
| Tab. 15: Optimierung der Prozessparameter und Materialeigenschaften mittels Zielgrößenoptimierung..... | 54 |
| Tab. 16: Beschreibung der Geometrie- und Maßhaltigkeitsmerkmale des Prüfkörpers..... | 66 |
| Tab. 17: Versuchsplan für die Maßhaltigkeitsuntersuchungen: Variation von Prozessparametern und Bauplattformpositionen und Bewertung der Reproduzierbarkeit..... | 67 |
| Tab. 18: Varianzanalyse zur Bewertung der Prozessparameter und ihrer Wechselwirkungen auf die Maßhaltigkeit..... | 79 |
| Tab. 19: Vergleich von Arbeiten zur Reproduzierbarkeit der Maßhaltigkeitsuntersuchungen für unterschiedliche Geometrielemente..... | 93 |
| Tab. 20: Vergleich von Arbeiten zur Reproduzierbarkeit der Oberflächenrauheitswerte bei 0° Neigungswinkel..... | 94 |
| Tab. 21: Zielgrößenoptimierung für Maßhaltigkeit und Dichte unter verschiedenen Prozessparametern | 97 |
| Tab. 22: Versuchsplan für Maßhaltigkeitsuntersuchungen: Variation von Scanstrategien, Fertigungsmethoden und Schichtrotationen..... | 103 |
| Tab. 23: Zielgrößenoptimierung durch Anpassen der Belichtungsstrategie | 110 |

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

| | |
|----------|--|
| AF | Additive Fertigung |
| AM | Additive Manufacturing |
| ANOVA | Analysis of Variance |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| BPH | Bauplattformheizung |
| CAD | Computer Aided Design |
| CT | Computertomographie |
| DAkKS | Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DoE | Design of Experiments (dt. Statistische Versuchsplanung) |
| EDX | Energiedispersive Röntgenspektroskopie |
| ISO | International Organization for Standardization |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KMG | Koordinatenmessgerät |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| NWB | Nicht wärmebehandelt |
| PBF/LB-M | Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen von Metall |
| PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt |
| QI | Qualitätsinfrastruktur |
| REM | Rasterelektronenmikroskopie |
| RSM | Response Surface Methodology |
| SLM | Selektives Laserstrahlschmelzen |
| SAG | Spannungsarmglühen |
| SDD | Röntgenquelle-Detektor-Abstand |
| SOD | Röntgenquelle-Objekt-Abstand |
| STL | Standard Triangulation Language |
| WB | Wärmebehandelt |

Lateinische Buchstaben

Kleine Buchstaben

| | | |
|-------|--|------|
| d_f | Strahldurchmesser | mm |
| d_s | Schichtdicke | mm |
| h_s | Spurabstand | mm |
| k | Erweiterungsfaktor der erw. Messunsicherheit | - |
| u | Unsicherheitsbeitrag zur erw. Messunsicherheit | mm |
| v_s | Scangeschwindigkeit | mm/s |

Große Buchstaben

| | | |
|--------------------|--|-------------------|
| CA | Kreisringe der AF-Prüfkörper | - |
| DP _n | Löcher der AF-Prüfkörper | - |
| DP _p | Stifte der AF-Prüfkörper | - |
| DK _p | Halbkugeln der AF-Prüfkörper | - |
| DK _n | Kalotten der AF-Prüfkörper | - |
| DF | Freiheitsgrad (Degrees of Freedom) | - |
| E _{L,MPE} | Maximal zulässige Längenmessabweichung (KMG) | mm |
| F | Kraft | N |
| F-Wert | Teststatistik der Varianzanalyse | - |
| HV | Vickershärte | HV |
| Kor MS | Korrigiertes mittleres Quadrat | - |
| Kor SS | Korrigierte Summe der Quadrate | - |
| L | Länge | mm |
| LA_X(Y) | Längenprüfkörper in X(Y)-Richtung | - |
| MPE _E | Maximal zulässige Längenmessabweichung (CT) | mm |
| P _L | Laserleistung | W |
| p-Wert | Signifikanzniveau | - |
| R _a | Arithmetischer Mittenrauwert | µm |
| R _m | Zugfestigkeit | N/mm ² |
| R _{p0,2} | Dehngrenze | N/mm ² |
| R ² | Bestimmtheitsmaß | % |
| R _z | Gemittelte Rautiefe | µm |
| S _a | mittlere arithmetische Höhe | µm |
| SA | Oberflächenstruktur | - |
| S _z | Maximale Höhe der Oberflächenrauheit | µm |
| U | Erweiterte Messunsicherheit | mm |
| V | Volumen | mm ³ |
| Ø | Durchmesser | mm |

Griechische Buchstaben

| | | |
|---|------------------------|-------------------|
| β | Regressionskoeffizient | - |
| δ | Downskin-Winkel | ° |
| ε | Bruchdehnung | % |
| ρ | Dichte | g/cm ³ |
| σ | Standardabweichung | mm |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die additive Fertigung (AF) hat sich in den letzten Jahren zu einer der bedeutendsten technologischen Entwicklungen in der Industrie avanciert und treibt die Transformation traditioneller Produktionsprozesse voran [1–3]. Besonders das Verfahren des pulverbettbasierten Laserschmelzens von Metallen (PBF/LB-M) bietet zahlreiche Vorteile, wie die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Geometrien und die Reduzierung von Materialabfällen [1–5]. Diese Technologie ermöglicht eine endkonturgenaue Fertigung, was den Nachbearbeitungsaufwand minimiert. Jedoch stellt die Maßhaltigkeit additiv gefertigter Bauteile weiterhin eine große Herausforderung dar [6,7]. Für Bauteile aus Aluminiumlegierungen wie AlSi10Mg, die aufgrund ihrer leichten und belastbaren Eigenschaften häufig im Leichtbau verwendet werden, ist die Maßhaltigkeit ein entscheidendes Qualitätsmerkmal [6,8,9]. Eine präzise Fertigung ist notwendig, um die Funktionalität und Passgenauigkeit der Bauteile sicherzustellen. Aktuelle Studien verdeutlichen, dass Prozessparameter beim Fertigungsprozess, die Position auf der Bauplattform sowie die Scanstrategie einen erheblichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit und die Reproduzierbarkeit der gefertigten Bauteile haben [10–12]. Diese Faktoren sind jedoch noch nicht vollständig erforscht und ihre Wechselwirkungen erfordern eine genauere Untersuchung. Die Motivation dieser Arbeit besteht darin, dieses Verständnis zu erweitern und spezifische Einsichten zu gewinnen, wie die Maßhaltigkeit im PBF/LB-M-Verfahren erhöht werden kann, um reproduzierbare Bauteile herzustellen. Die Neuheit dieser Arbeit besteht in der integrativen Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Einflussgrößen und in der Entwicklung spezifischer Optimierungsansätze, die die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit im PBF/LB-M-Verfahren weiter steigern können.

1.2 Problemstellung

Die additiven Fertigungsprozesse sind aufgrund der Vielzahl an beeinflussenden Faktoren komplex und variabel. Neben Eigenschaften des Pulvers und der eingesetzten Technik spielen Prozessparameter wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Pulverschichtdicke und die Anordnung der Bauteile auf der Bauplattform eine entscheidende Rolle. Auch die Scanstrategie, also die Art und Weise, wie der Laser über die Pulverschicht geführt wird, hat direkten Einfluss auf die thermischen Spannungen und die Materialverteilung, die wiederum die Maßhaltigkeit der Bauteile mitbestimmen. Diese Prozessparameter sind oft nicht unabhängig voneinander, sondern wirken im Zusammenspiel, was die Optimierung erschwert. Die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit lautet daher: Wie beeinflussen verschiedene Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit von additiv gefertigten AlSi10Mg-Bauteilen, und wie können diese Erkenntnisse genutzt werden, um eine konstante Bauteilqualität zu gewährleisten? Ein tieferes Verständnis dieser Wechselwirkungen ist entscheidend, um die Verlässlichkeit und Präzision der AF zu erhöhen und somit die Reproduzierbarkeit und Maßhaltigkeit der Bauteile zu sichern. Die Antworten auf diese Fragen sind von zentraler Bedeutung, um die bestehenden Herausforderungen zu adressieren und neue Standards in der AF für moderne industrielle Anforderungen zu setzen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist so gestaltet, dass er eine systematische Annäherung an die Untersuchung der Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit von AISi10Mg-Bauteilen im PBF/LB-M-Verfahren ermöglicht. Die Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel:

Kapitel 2: Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel präsentiert eine umfassende Analyse des aktuellen Standes der Technik und Forschung zur additiven Fertigung von AISi10Mg-Bauteilen. Es werden relevante wissenschaftliche Arbeiten und technische Entwicklungen betrachtet, um die Grundlagen für die Optimierung und den Einsatz der Technologie aufzuzeigen. Der Fokus liegt auf den Materialeigenschaften und der Maßhaltigkeit.

Kapitel 3: Handlungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise

Hier werden die aus der Analyse des Standes der Technik resultierenden Forschungslücken und der Handlungsbedarf beschrieben. Die Zielsetzung der Arbeit sowie die wissenschaftlichen Fragestellungen werden klar formuliert. Zudem wird die methodische Vorgehensweise skizziert, um die Untersuchungen zielgerichtet durchzuführen.

Kapitel 4: Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter und Materialeigenschaften mithilfe statistischer Methoden

Dieses Kapitel umfasst eine detaillierte Untersuchung der Prozessparameter und deren Einfluss auf die Materialeigenschaften von AISi10Mg. Es werden statistische Methoden wie DoE und ANOVA eingesetzt, um die Wechselwirkungen der Parameter zu beschreiben und die Materialeigenschaften zu optimieren.

Kapitel 5: Einfluss der Prozessparameter und Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit und Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen wird in diesem Kapitel eine differenzierte Analyse der Faktoren durchgeführt, die die Maßhaltigkeit von AISi10Mg-Bauteilen beeinflussen. Der Einfluss der Prozessparameter und Bauplattformposition sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden untersucht. Ein Vergleich zwischen CT- und KMG-Messungen liefert wertvolle Erkenntnisse zur Präzision der Messtechniken.

Kapitel 6: Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit

In diesem Kapitel werden verschiedene Scanstrategien und deren Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit der gefertigten Prüfkörper untersucht. Zu den untersuchten Strategien gehören Streifenbelichtung, Inselbelichtung und Kreuzbelichtung. Ergänzend werden Laserumschmelztechniken betrachtet, um deren Einfluss auf die Oberflächenqualität zu bewerten.

Kapitel 7: Schlussbetrachtung

Das letzte Kapitel fasst die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammen, diskutiert deren Praxisrelevanz und bietet Perspektiven für zukünftige Forschungen. Es werden die wesentlichen Erkenntnisse und deren Bedeutung für die Optimierung der Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit in der additiven Fertigung dargestellt.

2 Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel präsentiert eine umfassende Analyse des aktuellen Standes der Technik und Forschung zur additiven Fertigung von AlSi10Mg-Bauteilen. Dabei werden wissenschaftliche Arbeiten, Anwendungen und technische Entwicklungen betrachtet, die das Fundament für die weitere Optimierung und den Einsatz der Technologie bilden. Im Fokus stehen die Materialeigenschaften und Maßhaltigkeiten von AlSi10Mg-Prüfkörpern sowie die Stabilität des Fertigungsprozesses. Ziel ist es, eine Übersicht über die bisherigen Fortschritte zu geben und gleichzeitig offene Forschungsfragen und Herausforderungen zu beleuchten.

2.1 Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (PBF/LB-M)

Die additive Fertigung (AF), allgemein bekannt als 3D-Druck, hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und gilt heute als eine Schlüsseltechnologie der Industrie 4.0 [1,13,14]. Diese Fertigungsmethode erlaubt eine bisher unerreichte Flexibilität bei der Produktion hochkomplexer Geometrien und maßgeschneiderter Bauteile. In dieser Arbeit werden die Grundprinzipien der additiven Fertigung erläutert, mit besonderem Schwerpunkt auf dem pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen (PBF/LB-M – pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl).

Das PBF/LB-M-Verfahren hat sich als eines der fortschrittlichsten und vielseitigsten additiven Fertigungsverfahren etabliert [15], insbesondere für die Herstellung komplexer Metallbauteile mit hoher Präzision und Festigkeit [16]. Dieses Verfahren wird zunehmend in der industriellen Fertigung eingesetzt, da es durch seine Fähigkeit, dreidimensionale Bauteile schichtweise aufzubauen, sowohl Designfreiheit als auch sehr gute mechanische Eigenschaften verbindet [1,17]. Nachfolgend wird das PBF/LB-M-Verfahren umfassend beschrieben, wobei die einzelnen Phasen der Prozesskette – Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess – sowie die Funktionsweise des Verfahrens und die damit verbundenen Herausforderungen im Mittelpunkt stehen.

2.2 Prozesskette und Verfahrensprinzip beim PBF/LB-M

Das PBF/LB-M basiert auf dem Prinzip des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen aus feinem Metallpulver, das durch einen hochenergetischen Laserstrahl selektiv aufgeschmolzen wird [18,19]. Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, komplexe Geometrien direkt aus einem digitalen Modell zu erzeugen, ohne dass Formwerkzeuge oder konventionelle Bearbeitungsprozesse erforderlich sind [19,20]. Dies führt zu einer flexiblen und ressourceneffizienten Produktion, die in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau sowie in der Medizintechnik zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Pre-Prozess: Datenvorbereitung und Pulverbereitstellung

Der erste Schritt in der Prozesskette ist die Datenvorbereitung, bei der das Bauteil in einem CAD-System entworfen und in ein für das PBF/LB-M geeignetes Format (z.B. STL, Standard Triangulation Language) konvertiert wird (s. Abb. 1) [1]. Diese Datei wird in eine Vielzahl von

Schichten zerlegt (Slicen), wobei jede Schicht festlegt, welche Bereiche in der jeweiligen Schicht geschmolzen werden [21–23].

Ein ebenso wichtiger Aspekt des Pre-Prozesses ist die Pulverbereitstellung. Das AlSi10Mg-Pulver muss eine gleichmäßige Korngrößenverteilung, hohe Reinheit und hohe Fließfähigkeit aufweisen, um eine homogene Schichtbildung zu ermöglichen. Ungenauigkeiten oder Verunreinigungen in der Pulverqualität können zu Materialfehlern wie Porositäten oder unzureichender Bindung zwischen den Schichten führen [24–27].

Die Datenvorbereitung umfasst auch die Positionierung der Bauteile auf der Bauplattform und die Definition der Prozessparameter, wie beispielsweise die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und der Laserstrahldurchmesser. Die Abstimmung der Prozessparameter ist wichtig, um die Bauteilqualität und die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts sicherzustellen [24].

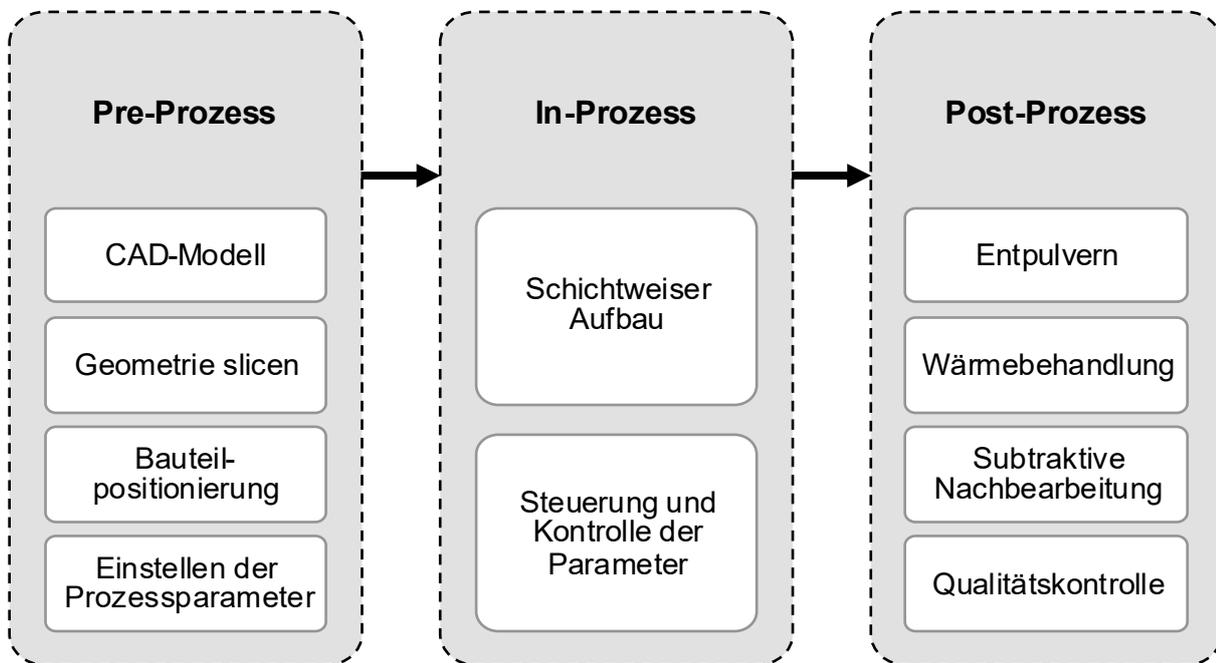


Abb. 1: Prozesskette der additiven Fertigung

Zusätzlich zur Definition der Prozessparameter werden bei Bedarf auch Unterstützungsstrukturen in der Datenvorbereitung generiert. Die Auslegung der Stützstrukturen ist essentiell, um Verzüge während des Schmelzprozesses zu minimieren und die Stabilität komplexer Geometrien zu sichern [28,29]. Stützstrukturen dienen dazu, Bauteile mit Überhängen und komplexe Geometrien während des Bauprozesses zu stabilisieren und zu verhindern, dass sich geschmolzenes Material während des Prozesses löst. Sie sind unverzichtbar, wenn der sogenannte Downskin-Winkel δ 45° unterschreitet (s. Abb. 2) [30–33].



Abb. 2: Schräge Oberflächenstrukturen aus AlSi10Mg mit ($\delta \leq 45^\circ$) und ohne ($\delta > 45^\circ$) Stützstrukturen

In-Prozess: Der Bauprozess im PBF/LB-M

Im In-Prozess findet der eigentliche Schichtaufbau des Bauteils statt. Der Prozess beginnt mit dem gleichmäßigen Auftrag einer definierten Schicht Metallpulver auf die Bauplattform, wobei die Schichtdicke typischerweise zwischen 20 μm und 100 μm beträgt [20,34–36]. Das Metallpulver wird aus einem Pulvorratsbehälter in den Beschichter gefördert, wobei die überschüssige Menge im Überlaufbehälter gesammelt wird (s. Abb. 3). Die aufgetragene Schicht bildet das sogenannte Pulverbett, auf dem die Bauteilschichten aufgebaut werden. Nach dem Auftragen des Pulvers erfolgt das selektive Aufschmelzen der vorgegebenen Schichtkontur, wodurch die Metallpartikel schmelzen und sich miteinander sowie mit der vorherigen Schicht verbinden [37–40]. Beim Auftreffen auf das Pulverbett wird der Laserstrahl von den Partikeln absorbiert, was zu einer lokalen Erwärmung und einer rapiden Erhöhung der Temperatur führt [38]. Sobald die Kontur vollständig belichtet ist, wird die Bauplattform in negativer z-Richtung um eine Schichtdicke abgesenkt, um Platz für die nächste Pulverschicht zu schaffen. Zeitgleich verfährt der Pulvorratsbehälter in positiver z-Richtung, sodass der Beschichter eine neue Schicht auftragen kann [40]. Der Prozess erfolgt schrittweise durch wiederholtes Schichtauftragen, Belichten und Absenken, bis das Bauteil vollständig hergestellt ist.

Die Funktionsweise des PBF/LB-M beruht auf der Abstimmung der Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und weiterer Prozessparameter. Die Regelung dieser Parameter ist maßgebend für die Bildung eines stabilen Schmelzbades, das für die Verbindung zwischen den Schichten sorgt. Eine ungünstige Wahl der Parameter kann zu Defekten wie Rissen oder Poren führen, die die Qualität des Bauteils mindern [24,25,38,41].

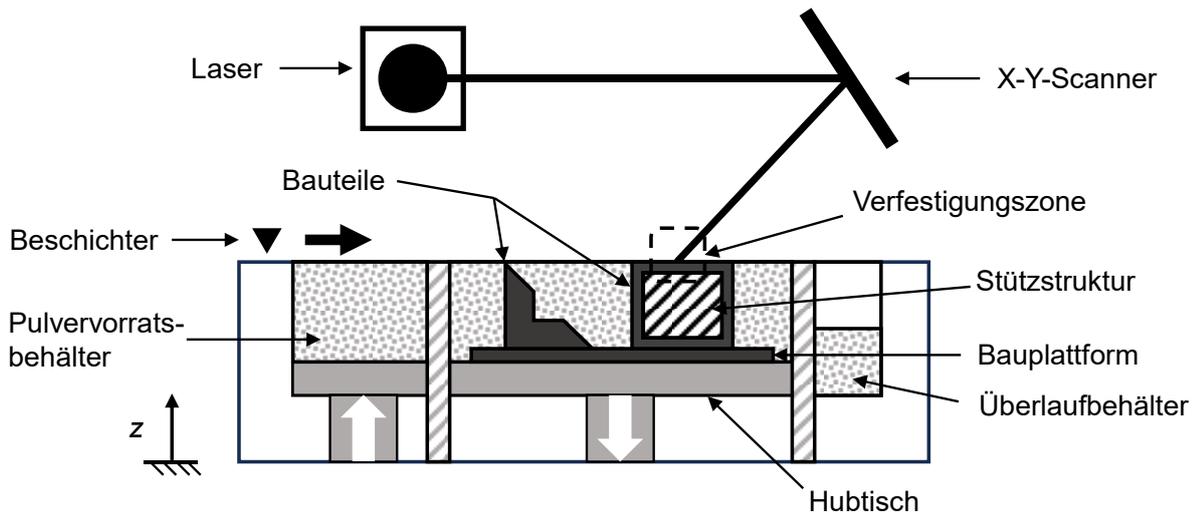


Abb. 3: Verfahrensprinzip des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens (PBF/LB-M) nach VDI 3405 [40]

Post-Prozess: Nachbearbeitung und Qualitätskontrolle

Nach dem Abschluss des Bauprozesses werden die gefertigten Bauteile im Post-Prozess einer Reihe von Nachbearbeitungsschritten unterzogen, um die gewünschten Oberflächen- und Materialeigenschaften zu erreichen. Zu den wichtigsten Schritten gehört die Entfernung der Stützstrukturen, die während des Bauprozesses zur Stabilisierung verwendet wurden. Darüber hinaus werden die Bauteile entpulvert, um verbleibendes Pulver zu entfernen, das nicht in den Schmelzprozess einbezogen wurde [24,42,43].

Eine weitere zentrale Maßnahme im Post-Prozess ist die Wärmebehandlung der Bauteile, um Eigenspannungen abzubauen, die während der Phasen des schnellen Aufschmelzens und Abkühlens entstanden sind. Dieser Schritt erhöht die mechanischen Eigenschaften des Bauteils, insbesondere in Bezug auf Duktilität und Festigkeit, und trägt zur Steigerung der Maßhaltigkeit bei [44–46].

Die abschließende Qualitätskontrolle stellt sicher, dass die Bauteile den geforderten Spezifikationen entsprechen. Zu den Prüfverfahren zählen sowohl zerstörungsfreie Prüfverfahren (z.B. Computertomografie, Ultraschalluntersuchung) [47,48] als auch zerstörende Prüfungen, um Materialeigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit und Mikrostruktur zu analysieren [49,50].

Durch eine fundierte Abstimmung der Pre-, In- und Post-Prozess-Schritte wird eine AF von AlSi10Mg-Bauteilen ermöglicht, die den hohen Ansprüchen verschiedener Anwendungsgebiete gerecht wird [51].

2.3 Materialeigenschaften und Mikrostruktur von AlSi10Mg

Das Verständnis der Materialeigenschaften und Mikrostruktur von AlSi10Mg ist ausschlaggebend für die Anwendung des PBF/LB-M-Verfahrens. AlSi10Mg ist eine Aluminium-Silizium-Legierung mit einer Kombination aus hoher Festigkeit, hoher Korrosionsbeständigkeit und hoher Wärmeleitfähigkeit. Diese Eigenschaften machen AlSi10Mg besonders geeignet für Leichtbauanwendungen und technische Bauteile, bei denen eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht erforderlich ist [24,52,53]. Ziel dieses Kapitels ist es, die mechanischen Eigenschaften sowie die Mikrostruktur von AlSi10Mg ausführlich zu beschreiben.

Die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften des verwendeten Pulvers beeinflussen maßgeblich die Qualität und Leistungsfähigkeit der Bauteile. Eine hohe Reinheit des Materials ist dabei wesentlich, da Verunreinigungen Defekte, wie Poren oder Inhomogenitäten verursachen und somit die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen können. Die Partikelgröße und -form des Pulvers haben ebenfalls Einfluss auf die Schmelzeigenschaften und die Oberflächenqualität der Bauteile. Feinere Pulverpartikel fördern eine glattere Oberfläche, während gröbere Partikel eine effizientere Wärmeableitung ermöglichen. Sphärische Pulverpartikel weisen in der Regel eine höhere Fließfähigkeit und Packungsdichte auf, was zu einer gleichmäßigeren Schichtbildung führt [25,54,55].

2.3.1 Mechanische Eigenschaften von AlSi10Mg

Die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg spielen eine bedeutende Rolle bei der Bewertung und Anwendungsfähigkeit von AF-Bauteilen. Die Kenntnis dieser Eigenschaften ist von großer Bedeutung, um die Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und Zuverlässigkeit der hergestellten Komponenten zu verstehen und sicherzustellen [36]. Ein Großteil der Forschungsarbeiten im Bereich des PBF/LB-M-Verfahrens fokussiert sich dabei auf grundlegende Untersuchungen von Materialeigenschaften an einfachen Geometrien, wie beispielsweise Würfeln. Im Folgenden werden die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg erläutert.

Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist eine zentrale mechanische Eigenschaft, die die maximale Zugbelastung angibt, die ein Material aufnehmen kann, bevor es strukturell versagt. Die Zugfestigkeit von AlSi10Mg variiert typischerweise zwischen 250 MPa und 450 MPa, abhängig von Prozessparametern, Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung. Diese Eigenschaft ist entscheidend, um die strukturelle Integrität und Eignung für mechanisch beanspruchte Bauteile sicherzustellen [56–58].

Bruchdehnung

Die Bruchdehnung beschreibt die Fähigkeit eines Materials, sich plastisch zu verformen, bevor es bricht. Es ist ein Maß für die Duktilität eines Materials unter Zugbelastung. Die Bruchdehnung von AlSi10Mg liegt ohne Wärmebehandlung bei etwa 5 % bis 10 % [18,59–61], kann jedoch durch Wärmebehandlungen auf 15 % bis 25 % gesteigert werden [57,61–63]. Eine höhere Dehnbarkeit erhöht die Rissbeständigkeit und verringert das Risiko eines plötzlichen Versagens, was insbesondere bei dynamischen Lasten von Vorteil ist [64,65].

Härte

Die Härte ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber Eindringen oder Abrieb. Die Härte von AlSi10Mg ist ebenfalls abhängig von den Prozessparametern und der Wärmebehandlung. Typische Härtewerte bewegen sich nach Wärmebehandlung zwischen 80 HV und 100 HV [57,58,66], während sie ohne Wärmebehandlung im Bereich von 110 HV bis 140 HV liegen [67–69]. Eine hohe Härte kann auf eine homogene Materialstruktur hindeuten. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass eine erhöhte Härte häufig mit einer gesteigerten Sprödigkeit einhergeht, da härtere Materialien anfälliger für Rissbildung und eine reduzierte Zähigkeit sein können [70–72].

Dichte

Die Dichte von AlSi10Mg beträgt in der Regel 2,6 g/cm³ bis 2,7 g/cm³. Dies macht AlSi10Mg zu einem attraktiven Material für Leichtbauanwendungen, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie. Durch den PBF/LB-M-Prozess lassen sich komplexe Geometrien mit reduzierter Materialmenge und Gewicht realisieren. Entscheidend ist dabei eine homogene Dichteverteilung im gesamten Bauteil, um gleichbleibende mechanische Eigenschaften sicherzustellen [73–75].

2.3.2 Mikrostruktur von AlSi10Mg

Die Mikrostruktur von AlSi10Mg hat erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Qualität der AF-Bauteile. AlSi10Mg besteht hauptsächlich aus einer Aluminiummatrix (s. Abb. 4), deren Struktur ebenfalls durch den PBF/LB-M-Prozess beeinflusst wird. Die Abstimmung der Prozessparameter und eine nachträgliche Wärmebehandlung ermöglichen die Optimierung der Mikrostruktur, was wesentlich für die mechanische Leistungsfähigkeit ist [52,69,76,77].

Die Größe und Verteilung der Silizium- und Magnesiumphasen in der aluminiumreichen Materialmatrix beeinflussen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg. In AlSi10Mg-Pulver liegen diese Elemente nicht elementar vor, sondern chemisch gebunden, z. B. als eutektische Aluminium-Silizium-Phasen oder intermetallische Phasen wie Mg₂Si. Aufgrund ihrer hohen Reaktivität wären elementare Formen nicht stabil. Eine gleichmäßige Verteilung dieser Phasen trägt zur Steigerung der Festigkeit und Härte bei, während kleinere und homogen verteilte Strukturen die Duktilität und Dehnbarkeit erhöhen. Eine homogene Mikrostruktur ist daher von signifikanter Bedeutung, um gleichmäßige mechanische Eigenschaften der Bauteile sicherzustellen [78–85]. Die Hersteller von PBF/LB-M-Maschinen bieten in der Regel eine Auswahl an zertifizierten Pulvern an, die für spezifische Anwendungen optimiert sind und eine erhöhte Kontrolle über die Oberflächenrauheit ermöglichen.

Im PBF/LB-M-Verfahren wird der Erstarrungsprozess durch verschiedene Parameter beeinflusst, darunter Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und Pulverbetttemperatur. Die Erstarrung beginnt an der Oberfläche des Pulverbetts und schreitet nach innen fort. Aufgrund der hohen Abkühlungsrate erstarrt das geschmolzene Material sehr schnell, was eine primäre, zelluläre α -Al-Matrixstruktur entstehen lässt [24,25,81,82,86–89]. Die REM-Aufnahmen in Abb. 4(a) und Abb. 4(b) zeigen diese zelluläre Mikrostruktur (Abb. 4(a)) mit den

α -Al-Körnern (Abb. 4(b), dunkle Phase). Entlang der Korngrenzen scheiden sich eutektische Aluminium-Silizium-Phasen und intermetallische Verbindungen aus (Abb. 4(b), helle Phase), die während der Erstarrung entstehen [69,76,77,81,85,90–94].

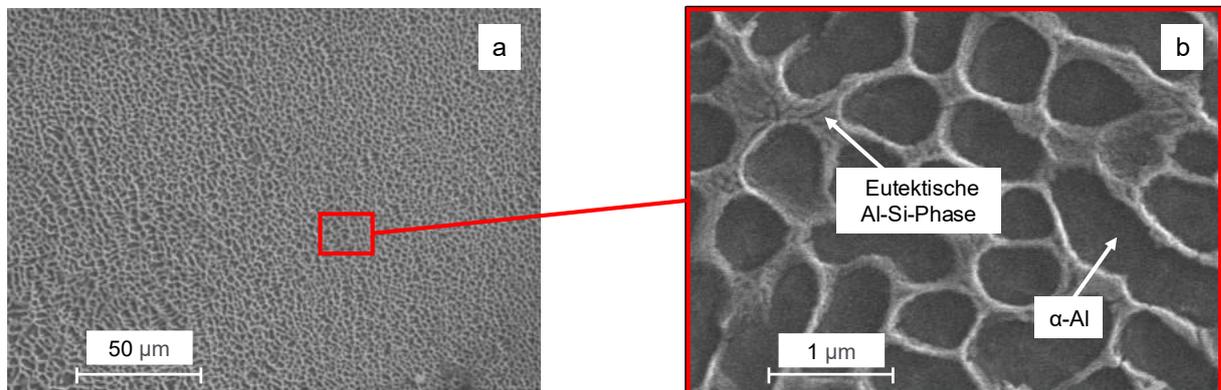


Abb. 4: REM-Aufnahmen der Mikrostruktur von AlSi10Mg bei verschiedenen Vergrößerungen (a) und (b)

Die Zellgröße, welche von der Abkühlrate während der Erstarrung bestimmt wird, spielt eine zentrale Rolle für die mechanischen Eigenschaften. Höhere Abkühlraten führen zu kleineren, dichter gepackten Zellen, was zu einem feinen, gleichmäßigen Gefüge mit höherer Härte und Festigkeit führt. Im Gegensatz dazu entstehen bei niedrigeren Abkühlraten größere Zellen, die ein heterogenes Mikrogefüge mit ungleichmäßigerer Verteilung von Legierungselementen und Ausscheidungen bilden, wodurch geringere Härtewerte und Zugfestigkeiten auftreten können [76,77,79,80,88,90,95–97].

Prozessparameter

Die Mikrostruktur von AlSi10Mg wird stark von den Prozessparametern wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Prozesstemperatur beeinflusst. Die Festlegung dieser Parameter ist ausschlaggebend, um die Erstarrungsgeschwindigkeit und die Mikrostruktur zu steuern, was die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts beeinflusst [24,94,98–100].

Wärmebehandlung

Zusätzlich zum PBF/LB-M-Prozess kann auch eine Wärmebehandlung eingesetzt werden, um die Mikrostruktur von AlSi10Mg zu beeinflussen. Durch zielgerichtete Wärmebehandlungen wie Spannungsarmglühen können mechanische Eigenschaften wie Zähigkeit und Festigkeit erheblich gesteigert werden. Diese Verfahren ermöglichen eine feinkörnigere Mikrostruktur und verringern Eigenspannungen, die während des PBF/LB-M-Prozesses entstehen. Die Wahl einer geeigneten Wärmebehandlung ist abhängig von den gewünschten Materialeigenschaften und den spezifischen Anforderungen der Anwendung [57,66,76,77,95].

2.4 Einflussfaktoren auf Maßhaltigkeit, Oberflächenrauheit und Materialeigenschaften

Die Qualität und Funktionalität von AF-Bauteilen aus AlSi10Mg hängt stark von der Maßhaltigkeit, der Oberflächenrauheit und den Materialeigenschaften ab. Diese Parameter stehen in einem wechselseitigen Verhältnis und werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst [2,101]. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Einflussgrößen auf diese Eigenschaften erläutert und deren Auswirkungen auf die Bauteilqualität aufgezeigt (s. Tab. 1).

Maßhaltigkeit

Die Maßhaltigkeit beschreibt die Genauigkeit der Übereinstimmung zwischen den tatsächlich gefertigten Bauteilabmessungen und den Sollwerten des digitalen 3D-Modells. Eine hohe Maßhaltigkeit ist besonders bei Bauteilen wichtig, bei denen enge Toleranzen zwingend eingehalten werden müssen. Abweichungen von Sollwerten können die Funktionalität und Einsatzfähigkeit der Bauteile beeinträchtigen. Für den erfolgreichen Einsatz des PBF/LB-M-Verfahrens ist daher die Maßgenauigkeit entscheidend, da sie die Funktionalität und Montageauglichkeit beeinflusst und eine gezielte Anpassung der maßgebenden Parameter ist daher unerlässlich [29,102].

Während sich ein Großteil der bisherigen Forschung zu PBF/LB-M auf die Untersuchung von Materialeigenschaften und Mikrostrukturen konzentriert [18,24,62,66], besteht weiterhin Forschungsbedarf bezüglich der Faktoren, die die geometrische Genauigkeit der Bauteile beeinflussen. Frühere Studien haben die Maßgenauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit von AlSi10Mg-Bauteilen unter verschiedenen Prozessparametern, Baurichtungen, Wanddicken und Gitterstrukturen untersucht [10,103–105]. Diese Arbeiten haben gezeigt, dass sowohl die Aufbaurichtung als auch die Position auf der Bauplattform signifikante Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit haben. Bauteile, die quer zum Schutzgasstrom gefertigt werden, weisen größere Abweichungen von den Sollmaßen auf als solche, die parallel zum Gasstrom angeordnet sind [10,105]. Zusätzlich wurde festgestellt, dass Prozessparameter wie Laserleistung und Scangeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Maßgenauigkeit haben [6,9,106].

Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit beeinflusst die Funktionalität, Ästhetik und das Verhalten eines Bauteils im Betrieb. Sie wird wesentlich durch die Schichtbildungsprozesse und die Scanstrategien während des PBF/LB-M-Prozesses bestimmt. Die Abstimmung der Prozessparameter sowie die Wahl geeigneter Pulver und Nachbearbeitungstechniken sind grundlegend, um eine Oberflächenstruktur zu erzielen, die den Anforderungen der jeweiligen Anwendung entspricht [33,107–111].

AF-Bauteile weisen oft höhere Oberflächenrauheitswerte auf. Diese stehen tendenziell im Zusammenhang mit größeren Abweichungen von den Nennmaßen, da Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche zu einer Vergrößerung oder Verkleinerung der Bauteilabmessungen führen können. Um Maßabweichungen zu minimieren und eine hohe Präzision sicherzustellen, ist ein umfassendes Verständnis des Zusammenspiels zwischen Oberflächenrauheit, Teilegeometrie, Materialeigenschaften und Prozessparametern notwendig [112–114].

Tab. 1: Einflussfaktoren beim PBF/LB-M

| Kategorie | Parameter | Einfluss auf den Prozess |
|-----------------------|-----------------------------|---|
| Laser | Laserleistung | Steuert die Energiezufuhr und beeinflusst die Größe des Schmelzbads |
| | Laserstrahldurchmesser | Beeinflusst die Präzision von Kanten, Konturen, Details |
| Material | Pulverdichte | Beeinflusst die Schichtverdichtung und die Porosität |
| | Schichtdicke | Bestimmt die Auflösung und die Bauzeit |
| | Partikelgröße | Beeinflusst die Fließfähigkeit des Pulvers und die Packungsdichte |
| Scan | Scangeschwindigkeit | Beeinflusst die Oberflächenqualität und die Bauzeit |
| | Spurabstand | Beeinflusst die Überlappung zwischen den Scanbahnen und steuert die Porosität |
| | Scanstrategie | Beeinflusst die Bahnführung des Laserstrahls und die Wärmeverteilung |
| Temperatur / Umgebung | Temperatur des Pulverbettes | Beeinflusst die Materialeigenschaften und reduziert thermische Gradienten |
| | Bauraumatmosphäre | Kontrolliert die Oxidation und Kontamination während des Bauprozesses |

2.4.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität

Die Auswahl der Prozessparameter beeinflusst nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch die Maßhaltigkeit der Bauteile [8,24,115,116]. Im Folgenden werden die wesentlichen Parameter und ihre Auswirkungen auf den Fertigungsprozess erläutert:

1. **Laserleistung:** Die Laserleistung bestimmt die Energiezufuhr und damit die Schmelzrate des Pulvers. Eine höhere Leistung steigert die Produktivität, kann aber zu Defekten wie Überhitzung und Verzügen führen. Zu niedrige Laserleistung hingegen kann unvollständiges Schmelzen verursachen [117].
2. **Schichtdicke:** Die Schichtdicke bestimmt die Auflösung der Schichtstruktur und beeinflusst die Oberflächenqualität. Eine geringere Schichtdicke führt zu einer feineren Oberflächenstruktur, verlängert jedoch die Bauzeit. Bei größeren Schichtdicken verkürzt sich die Bauzeit, jedoch auf Kosten der Oberflächenpräzision [24,33,117,118].
3. **Scangeschwindigkeit:** Die Scangeschwindigkeit gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich der Laserstrahl über das Pulverbett bewegt. Ist die Scangeschwindigkeit zu hoch, wird der Schmelzweg instabil und wird unterbrochen, da die stabile Schmelzgeschwindigkeit überschritten wird. Eine niedrige Scangeschwindigkeit führt zu längeren Bearbeitungszeiten, was die Produktivität verringert und die Produktionskosten erhöht, und erhöht den

Wärmeeintrag in das Material, was zu thermischen Spannungen und Verformungen im Bauteil führen kann [52,119].

4. **Gasumgebung:** Eine kontrollierte Gasatmosphäre im Bauraum, meist aus Argon oder Stickstoff, verhindert die Oxidation während des Schmelzprozesses und steigert die Materialqualität [120].
5. **Scanstrategie:** Die Scanstrategie, also das Muster, in dem der Laser das Pulverbett abfährt, beeinflusst maßgeblich die Schmelzeigenschaften, die Oberflächenrauheit und die Maßhaltigkeit. Die Auswahl einer geeigneten Scanstrategie ist unerlässlich, um den Bauteilen eine gleichmäßige Dichte und Oberflächenstruktur zu verleihen. Die Wahl der Scanstrategie hängt von der Bauteilgeometrie und den gewünschten Materialeigenschaften ab [33,121].
 - **Streifenbelichtung:** Der Laser fährt das Pulverbett in parallelen Streifen ab, was eine homogene Schmelzbadausbildung fördert und thermische Spannungen reduziert [122].
 - **Inselbelichtung:** Der Laser arbeitet in einzelnen Inselbereichen, was lokal erhöhte Temperaturen erzeugt und zu Maßabweichungen, insbesondere in den Übergangsbereichen zwischen den Inseln, führt [122,123].
 - **Laserumschmelzen/Kreuzbelichtung:** Beim Laserumschmelzen (z.B. Kreuzbelichtung) wird die Oberflächengüte gesteigert, indem die Pulverschichten zweimal belichtet werden. Dabei werden die obersten Schichten neu geschmolzen und homogenisiert, was effektiv zur Reduzierung der Oberflächenrauheit beiträgt [124,125].

Untersuchung der Scanstrategien und ihrer Auswirkungen

Tab. 2 bietet einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu verschiedenen Scanstrategien und deren Auswirkungen auf die Maßgenauigkeit von AF-Bauteilen. Bisher existieren nur wenige detaillierte Studien, die die spezifischen Auswirkungen unterschiedlicher Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität untersucht haben.

Im praktischen Teil dieser Arbeit (Kap. 6) werden daher verschiedene Scanstrategien, Scanrotationen und Laserumschmelztechniken experimentell untersucht, um deren Einfluss auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität systematisch zu analysieren und die in der Literatur identifizierten Ergebnisse zusammenzufassen und weitere Forschungslücken zu adressieren.

Tab. 2: Übersicht der Forschung zu Scanstrategien

| Referenzen | A | B | C | D | E | F |
|--------------|---|---|---|---|---|---|
| [126] | x | x | | | | |
| [127] | x | x | | | | |
| [128] | x | x | | | | x |
| [129] | x | x | | | x | |
| [12] | x | | x | | | |
| [130] | x | | x | x | | |
| [122] | x | | x | | | |
| [131] | x | x | x | | x | |
| [6] | x | | | x | | x |
| [124] | x | | x | | x | |
| Diese Arbeit | x | x | x | x | x | x |

Legende:

- A: Untersuchungen zur Maßgenauigkeit/Oberflächenqualität
- B: Variierende Rotation in der darauffolgenden Schicht n+1
- C: Mehrere Scanstrategien
- D: Multigeometrischer Prüfkörper
- E: Laserumschmelzen
- F: Prozessparameterstudie

Die bisherigen Arbeiten konzentrierten sich meist auf die Analyse einzelner Parameter wie die Scanstrategien [12,122,130], Scanrotation [126,127] oder Scanparameter [128], ohne jedoch die Wechselwirkungen zwischen mehreren Faktoren zu untersuchen. Zudem wurden häufig Untersuchungen an einfachen Geometrien wie Würfeln oder Zylindern durchgeführt, die jedoch nicht immer die Komplexität realer Bauteile widerspiegeln. Diese Arbeit zielt darauf ab, diese Lücken zu schließen, indem sie eine umfassende Analyse verschiedener Kombinationen von Scanmustern, Scanrotationen und Laserumschmelzstrategien durchführt. So wird ein tieferes Verständnis der Parameter gewonnen, die die Maßgenauigkeit beeinflussen.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Scanrotationen signifikante Auswirkungen auf die Oberflächenmorphologie und die Mikrostruktur haben können. Scanrotationen von 45° und 67° zwischen den Schichten fördern eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und reduzieren thermische Spannungen, was zu einer höheren Oberflächenqualität und feineren Mikrostrukturen führt. Im Gegensatz dazu neigen Rotationen von 0° und 90° zu größeren Maßabweichungen. Dies liegt daran, dass bei diesen Rotationswinkeln die Laserbahnen wiederholt in denselben Richtungen verlaufen, was zu einer ungleichmäßigen Wärmeakkumulation führt [126]. Ebenso hat sich herausgestellt, dass die Wahl der Scanstrategie maßgeblich die Qualität und Präzision von AF-Bauteilen bestimmt. Strategien wie die Streifenbelichtung oder die Inselbelichtung beeinflussen unterschiedlich stark die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität [12]. Die Inselbelichtungsstrategie kann aufgrund von Wärmestau an den

Inselgrenzen zu größeren Maßabweichungen führen [122]. Im Gegensatz dazu hat sich das Laserumschmelzen (z.B. Kreuzbelichtung) als effektive Methode zur Verringerung der Oberflächenrauheit erwiesen [124,129,132].

2.4.2 Prozessparameteroptimierung

Die Optimierung der Prozessparameter stellt eine zentrale Herausforderung in der Forschung und industriellen Anwendung dar. Materialeigenschaften, Prozessparameter (z.B. Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke) und Nachbehandlungstechniken wie Wärmebehandlung tragen erheblich zur Qualität und Leistungsfähigkeit von AF-Bauteilen bei.

Die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung und Nutzbarkeit von AF-Komponenten [36]. Im Vergleich zu anderen Materialien ist die Forschung zu AlSi10Mg sehr umfangreich [24]. Ponnusamy et al. [133] erstellten eine detaillierte Übersicht zu den Forschungsaktivitäten im Bereich AlSi10Mg, die aufzeigt, dass der Fokus der Untersuchungen überwiegend auf der Bauteilorientierung und Wärmebehandlung liegt, während die eigentliche Optimierung der Prozessparameter bisher weniger stark untersucht wurde.

Abb. 5 veranschaulicht die Zunahme der Forschung zur Optimierung der Prozessparameter der Legierung AlSi10Mg in den letzten Jahren. Die Abbildung zeigt einen Aufwärtstrend bei der Anzahl der Studien, was die zunehmende Bedeutung der Optimierung von PBF/LB-M-Parametern zur Steigerung der Materialeigenschaften und der Fertigungseffizienz widerspiegelt. Ab 2015, als das PBF/LB-M an Bedeutung gewann, nahm die Forschung rasch zu.

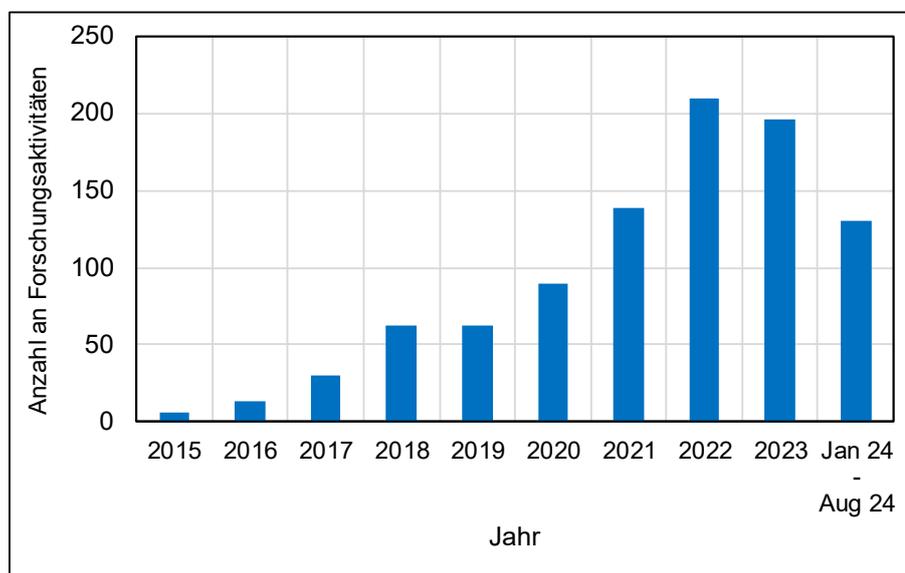


Abb. 5: Anzahl der Forschungsaktivitäten zur Optimierung der Prozessparameter von AlSi10Mg nach Jahren [61]

In den letzten Jahren wurden zunehmend Studien durchgeführt, die die Auswirkungen spezifischer Prozessparameter auf zentrale Materialeigenschaften wie Dichte, Oberflächenrauheit, Zugfestigkeit, Härte und Bruchdehnung untersuchen. Trotz wesentlicher Fortschritte ist die Balance zwischen diesen Eigenschaften weiterhin eine Herausforderung, da zwischen den

Prozessparametern oft komplexe Wechselwirkungen bestehen. So haben Studien gezeigt, dass die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit die Porosität und Oberflächenqualität maßgeblich beeinflussen. Eine höhere Laserleistung kann Porosität reduzieren, jedoch zu geringerer Oberflächenrauheit führen [134,135]. Die Scangeschwindigkeit beeinflusst sowohl die Dichte als auch die Mikrostruktur, wobei höhere Geschwindigkeiten tendenziell die Porosität erhöhen, während langsamere Geschwindigkeiten zu einem übermäßigen Wärmeeintrag und einer Beeinflussung des Korngefüges führen können [52].

Zusätzlich wurden in neueren Studien Optimierungsansätze wie DoE [38,52,68,100,115,136–143] und maschinelles Lernen [140,144] eingesetzt (s. Kap. 4). Der Einsatz von DoE-Ansätzen ermöglicht eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern. Viele Studien konzentrieren sich jedoch oft auf die Optimierung einer einzelnen Eigenschaft, z. B. Dichte, Oberflächenrauheit oder Zugfestigkeit, und vernachlässigen die Analyse anderer wichtiger Eigenschaften, wie auch im Review von Ponnusamy et al. erläutert [133].

2.4.3 Messtechniken und Messunsicherheit in der additiven Fertigung

In der AF spielt die exakte Vermessung der Bauteile eine zentrale Rolle, um sicherzustellen, dass die gefertigten Bauteile den hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität entsprechen. Unterschiedliche Messtechniken kommen hierbei zum Einsatz, die jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Gleichzeitig ist die Berücksichtigung der Messunsicherheit unerlässlich, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der ermittelten Messwerte bewerten zu können.

2.4.3.1 Messprinzipien

Computertomografie (CT)

Die Computertomografie (CT) ist eine Schlüsseltechnologie in der Fertigungsmesstechnik, insbesondere bei der Prüfung von AF-Bauteilen. Sie ermöglicht die dreidimensionale Erfassung sowohl der äußeren als auch der inneren Strukturen eines Bauteils, was sie ideal für die Überprüfung komplexer Geometrien macht, die mit herkömmlichen Messmethoden schwer zugänglich sind.

Die Funktionsweise der CT basiert auf der Messung der Abschwächung von Röntgenstrahlen, die durch das Bauteil gesendet werden. Während des Scans wird das Bauteil um seine Achse gedreht, sodass aus verschiedenen Winkeln zweidimensionale Projektionsbilder aufgenommen werden. Der Detektor erfasst die Abschwächung der Strahlung nach dem Durchdringen des Bauteils, die von der Materialdichte und der Bauteildicke abhängt. Diese Vielzahl von Projektionen wird anschließend mithilfe von Algorithmen, wie der gefilterten Rückprojektion, zu einem dreidimensionalen Volumenbild rekonstruiert [145–150].

Ein CT-System besteht aus einer Röntgenquelle, einem Detektor und einer Rotationsvorrichtung für das Bauteil (s. Abb. 6). Die Rekonstruktionsgenauigkeit hängt von mehreren Faktoren ab, wie der Anzahl der aufgenommenen Projektionen, den Messparametern sowie der Empfindlichkeit des Detektors. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die geometrische Vergrößerung, die von der Position des Bauteils relativ zur Röntgenquelle und zum Detektor abhängt [145–150].

Die CT ist besonders in der AF von Bedeutung, da es eine vollständige, zerstörungsfreie Überprüfung der Bauteile ermöglicht. Sie kann innere Defekte wie Poren oder Lunker erkennen und ist daher ein unverzichtbares Werkzeug in sicherheitskritischen Anwendungen. Die Technologie gewährleistet die Maßhaltigkeit und strukturelle Integrität von Bauteilen, die oft sehr komplexe Geometrien aufweisen, welche mit traditionellen Messverfahren nicht erfasst werden können [145–151].

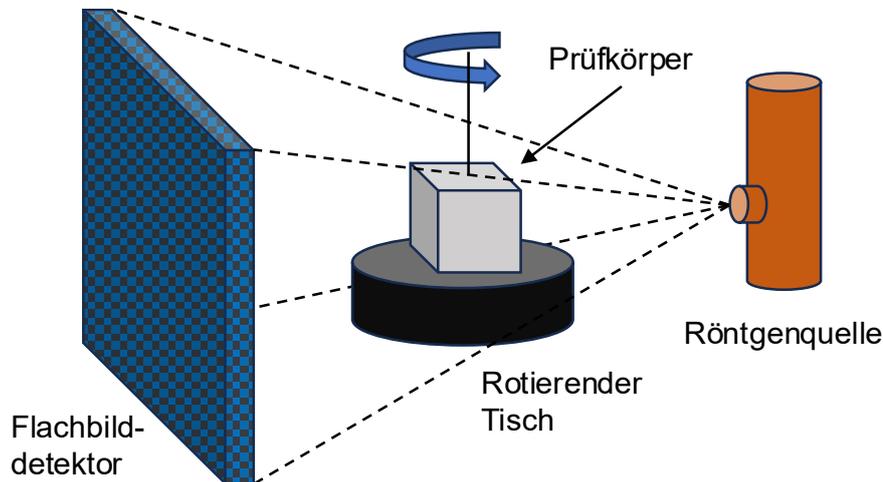


Abb. 6: Schematische Darstellung eines CT-Scans

Koordinatenmessgerät (KMG)

Das Koordinatenmessgerät (KMG) ist eine zentrale Technologie in der industriellen Messtechnik und dient häufig als Referenzverfahren. Es misst die Geometrie eines Bauteils durch taktile Abtastung, bei der eine Tastkugel Koordinatenpunkte erfasst. KMG zeichnen sich durch hohe Genauigkeit und normgerechte Kalibrierung aus, was sie für Qualitätskontrollen besonders geeignet macht [152].

Eine besondere Herausforderung bei KMG-Messungen von rauen oder AF-Oberflächen ist der mechanische Filtereffekt. Die Größe der Tastkugel beeinflusst die Fähigkeit, feine Vertiefungen oder scharfe Kanten zu erfassen. Größere Tastkugeln können nicht in kleine Vertiefungen eindringen, was zu ungenauen Messergebnissen führen kann. Dies beeinflusst die Messung von Elementen wie Bohrungen, deren Durchmesser je nach Tastkugelgröße unterschiedlich erfasst wird [153,154].

2.4.3.2 Vergleich von CT- und KMG-Messungen

In den letzten Jahren hat die Röntgen-CT als Messtechnik in der industriellen Metrologie an Bedeutung gewonnen. Trotz der Fortschritte bleibt die Bestimmung der Messunsicherheit von CT-Messungen eine Herausforderung. Die Richtlinie VDI 2630 2.1 [155] empfiehlt die Durchführung von Referenzmessungen, um die Messunsicherheit von CT-Messungen zu bewerten. In den meisten Fällen werden KMG-Messungen als Referenz herangezogen, wodurch ihre Messunsicherheit in die Gesamtabweichung der CT-Messung einfließt. Für Bauteile, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Drehen oder Fräsen hergestellt werden, sind diese Anforderungen in der Regel einfacher zu erfüllen. Die Oberflächen dieser Bauteile sind glatt

genug, um präzise taktile Messungen zu ermöglichen. Im Fall von AF-Bauteilen, insbesondere bei Verfahren wie dem PBF/LB-M, stellt die oft raue Oberfläche jedoch eine Herausforderung dar. Rauere Oberflächen erschweren die taktile Vermessung, was die Eignung des KMG als Referenzsystem in solchen Fällen infrage stellt. Da AF-Bauteile häufig über innere Geometrien oder schwer zugängliche Bereiche verfügen, bietet die CT gegenüber dem KMG erhebliche Vorteile, indem sie auch komplexe innere Strukturen messen kann, die taktil nicht zugänglich sind [148,153,156,157].

Einfluss der Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit von AF-Bauteilen stellt eine besondere Herausforderung für taktile Messungen dar. Die bei additiven Verfahren entstehenden rauen Oberflächen erschweren es der Tastkugel eines KMG exakte Messungen durchzuführen. Insbesondere kleine Vertiefungen oder scharfe Kanten werden durch die Tastkugel nicht erfasst, was zu einer verzerrten Darstellung der realen Bauteilgeometrie führt. Diese Abweichungen, die als mechanischer Filtereffekt bezeichnet werden, können erhebliche Auswirkungen auf die Messgenauigkeit haben. Im Gegensatz dazu ermöglicht die CT-Messung eine genauere Erfassung dieser Oberflächenmerkmale, da die Durchleuchtung der Bauteile eine vollständigere und feinkörnige Erfassung der Geometrie ermöglicht [148,153,154,156,158]

2.4.3.3 Messunsicherheit

In der modernen Produktion ist die Durchführung verlässlicher Messungen von signifikanter Bedeutung. Messungen stellen sicher, dass gefertigte Produkte den festgelegten Spezifikationen entsprechen und somit ihre Funktionsfähigkeit gewährleistet ist. Dabei spielt die Messunsicherheit eine elementare Rolle: Sie gibt an, in welchem Bereich die gemessenen Werte vom Nominalwert der Messgröße abweichen können. Die Messunsicherheit ist somit ein unverzichtbares Kriterium für die Bewertung von Messergebnissen. Die Kenntnis der Messunsicherheit ist insbesondere bei der Auswahl von Messgeräten, der Festlegung geometrischer Produktspezifikationen und der Überwachung von Fertigungsprozessen unerlässlich. Eine unzureichende Berücksichtigung der Messunsicherheit kann zu schwerwiegenden Konsequenzen führen, wie der Ablehnung fehlerfreier Bauteile oder der Freigabe fehlerhafter Produkte. Nur durch eine fundierte Messunsicherheitsbetrachtung kann das Risiko von Fehlentscheidungen minimiert und die Zuverlässigkeit der Messergebnisse gesichert werden [148,151,156,157,159].

Ausgangspunkt der Berechnung der Messunsicherheit ist die Abhängigkeit des Messergebnisses von verschiedenen Einflussgrößen. Die Gesamtmessunsicherheit setzt sich aus den einzelnen Unsicherheitsbeiträgen dieser Einflussgrößen zusammen, die entweder experimentell ermittelt oder aus vorhandenen Informationen, wie beispielsweise Kalibrierzertifikaten, abgeleitet werden können. Die Standardmessunsicherheit wird mit einem Erweiterungsfaktor k multipliziert, um eine erweiterte Messunsicherheit zu berechnen, die für ein bestimmtes Vertrauensniveau gilt. Ein häufig verwendeter Erweiterungsfaktor ist $k = 2$, der ein Konfidenzniveau von 95 % sicherstellt. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Wert der Messgröße mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb des durch das Messergebnis und die erweiterte Messunsicherheit definierten Bereichs liegt. Für komplexere Messaufgaben, wie sie in der

Koordinatenmesstechnik häufig auftreten, können experimentelle Methoden zur Anwendung kommen. Hierbei wird ein kalibriertes Referenzwerkstück gemessen und die Abweichungen der Messergebnisse von den Kalibrierwerten analysiert, um die Messunsicherheit zu bestimmen. Diese Methode ist besonders praxisnah und ermöglicht es, die Unsicherheitsbeiträge des gesamten Messsystems realistisch zu erfassen [151,156,159].

Die erweiterte Messunsicherheit U wird gemäß folgender Formel berechnet:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei steht:

- k für den Erweiterungsfaktor (in der Regel $k = 2$ für eine Konfidenz von 95 %),
- u_{cal} für die Kalibrierunsicherheit des verwendeten Normals bzw. Prüfkörpers,
- u_p für die Unsicherheiten der Messverfahren, einschließlich der Genauigkeit der Messgeräte und der Reproduzierbarkeit der Messungen,
- u_w für die durch die Rauheit und Geometrie des Prüfkörpers bedingten Unsicherheiten,
- u_b für die Unsicherheit des systematische Fehlers durch Skalierungsabweichungen, geometrische Verzerrungen oder andere reproduzierbare Einflüsse

Diese experimentelle Herangehensweise bietet die Möglichkeit, die Einflussfaktoren des gesamten Messprozesses umfassend einzubeziehen und eine verlässliche Aussage über die Präzision des Messsystems zu treffen.

2.4.4 Einfluss der Bauplattformposition auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität

Die Position eines Bauteils auf der Bauplattform, und damit die Nähe oder Entfernung zum Schutzgaseinlass, beeinflusst signifikant sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Oberflächenqualität [10,11,105,113,160–162]. Die Hauptfunktion des Schutzgases besteht darin, Emissionen aus dem Schmelzbad zu entfernen, um die Oxidation des Metallpulvers und des Schmelzbad bei hohen Temperaturen zu verhindern [163].

Studien haben gezeigt, dass Bauteile, die weiter vom Schutzgaseinlass entfernt aufgebaut werden, tendenziell eine höhere Maßhaltigkeit aufweisen. Dies wird auf die Kühlwirkung des Schutzgasstroms zurückgeführt, der das Schmelzbad umströmt und das Erstarrungsverhalten beeinflusst. Im Gegensatz dazu zeigen Bauteile in Nähe des Gasstromeinlasses aufgrund ungleichmäßiger Wärmeverteilung größere Maßabweichungen. Gleichzeitig weisen Bauteile, die näher zur Mitte der Bauplattform positioniert sind, weniger thermische Spannungen und gleichmäßigere Oberflächen auf als jene am Rand [10,11,105,113,160–162,164].

2.4.5 Thermische Einflüsse

1. **Thermische Spannungen:** Beim PBF/LB-M-Verfahren kommt es zu erheblichen Temperaturgradienten im Bauteil während des Schmelzprozesses. Diese Temperaturunterschiede führen zu thermischen Spannungen im Material, die zu Verformungen und

Verzügen führen können. Eine Regulierung der Prozesstemperatur und der Laserenergie ist daher erforderlich, um die thermischen Spannungen zu minimieren [165,166].

2. **Schmelzverteilung und Bauteilplatzierung:** Eine gleichmäßige Schmelzverteilung ist signifikant für die Maßhaltigkeit und Homogenität des Bauteils. Ungleichmäßigkeiten in der Schmelzverteilung können zu lokalen Inhomogenitäten führen, was die Maßhaltigkeit negativ beeinflusst. Eine geeignete Platzierung des Bauteils im Bauraum sowie die Abstimmung der Prozessparameter und der Schichtorientierung tragen dazu bei, diese Defekte zu minimieren. Die Schichtorientierung ist die Richtung, in der die einzelnen Schichten während des Schmelzprozesses nacheinander aufgebaut werden. Sie beeinflusst direkt die Wärmeableitung, Spannungsverteilung und damit die Maßhaltigkeit sowie die mechanischen Eigenschaften des Bauteils [52,167].
3. **Bauteilgeometrie:** Die Geometrie des Bauteils beeinflusst die Wärmeableitung und die Verformungsneigung. Komplexe Geometrien und scharfe Kanten können zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung und zu Verformungen führen [168].

Bei Bedarf können Kompensationsstrategien eingesetzt werden, um Abweichungen in der Maßhaltigkeit zu korrigieren. Dazu gehören beispielsweise die Anpassung des ursprünglichen 3D-Modells, die Optimierung der Prozessparameter, die Verwendung einer Bauplattformheizung oder die Wärmebehandlung nach der Fertigung. Die Auswahl der Kompensationsstrategie hängt von der Art der Abweichung und den spezifischen Anforderungen der Bauteile ab [169,170].

2.4.6 Nachbearbeitungstechniken

Um die Oberflächen auf die gewünschten Anforderungen zu optimieren, können verschiedene Nachbearbeitungstechniken angewendet werden [171]. Dazu gehören:

1. **Mechanische Bearbeitung:** Im Gegensatz zu Schleifen oder Polieren zielt die mechanische Bearbeitung, wie Fräsen oder Drehen, darauf ab, Toleranzen und komplexe Geometrien nachzuarbeiten. Sie ermöglicht maßgenaue Anpassungen an kritischen Bauteilbereichen und gewährleistet höhere Genauigkeit für funktionale Anforderungen [108,172].
2. **Schleifen und Sandstrahlen:** Diese Bearbeitungsmethoden steigern die Oberflächenqualität, indem sie Unregelmäßigkeiten entfernen und eine glattere Oberfläche erzielen. Sie können manuell oder automatisiert durchgeführt werden [110,173].
3. **Polieren:** Polieren verleiht der Oberfläche eine besonders glatte und glänzende Textur und ist ideal für Bauteile, die hohe ästhetische Anforderungen erfüllen müssen, oder in Anwendungen, bei denen eine hohe Oberflächenqualität erforderlich ist [111,171].
4. **Elektrochemische Verfahren:** Verfahren wie das Hirtisieren ermöglichen eine Glättung der Oberfläche durch elektrochemisches Abtragen von Material. Besonders bei schwer zugänglichen Bereichen oder komplexen Geometrien trägt diese Technologie zur Steigerung der Oberflächenqualität bei [174–176].

2.5 Fehlerquellen, Prozessstörungen, Störgrößen und Defekte beim Laserstrahlschmelzen

Trotz erheblicher Fortschritte in der PBF/LB-M-Technologie können im Fertigungsprozess Fehler und Defekte auftreten, die die Qualität und mechanischen Eigenschaften der Bauteile beeinträchtigen (s. Tab. 3). In diesem Kapitel werden die häufigsten Fehlerquellen, Prozessstörungen und Defekte beschrieben.

Tab. 3: Übersicht häufiger Fehlerquellen und Prozessstörungen beim PBF/LB-M, deren Auswirkungen auf die Bauteilqualität sowie Maßnahmen zur Reduktion

| Fehlerquelle / Prozessstörung | Beschreibung | Auswirkungen / Defekte | Maßnahmen zur Reduktion |
|-------------------------------|---|--|--|
| Porosität und Inhomogenitäten | Entstehung von Porosität durch eingeschlossene Gase aufgrund unzureichender Schmelzbedingungen oder Pulverqualität. | Verringerte mechanische Festigkeit, Dichtigkeit und thermische Eigenschaften des Bauteils. | Einstellung der Prozessparameter (z. B. Laserleistung), Einsatz von hochwertigem Pulver, homogene Materialzusammensetzung. |
| Verzüge und Verformungen | Verzug durch innere Spannungen, die bei ungleichmäßiger Abkühlung im Schmelz- und Erstarrungsprozess entstehen. | Verformungen und Maßabweichungen, die zu ungenauen Geometrien führen. | Einstellen von Bauplattformheizung, Anpassen von Prozessparametern und Bauteilgeometrie. |
| Beam Offset (Strahlversatz) | Nicht angepasster Strahlversatz führt zu Abweichungen bei Außen- und Innenkonturen. | Überdimensionierte erhabene Strukturen, unterdimensionierte vertiefte Strukturen. | Iterative Anpassung des Strahlversatzes zur Gewährleistung der Maßgenauigkeit. |
| X-Y-Skalierung | Maßabweichungen durch ungenaue Skalierung der linearen X- und Y-Achsen | Geometrische Verzerrungen und systematische Abweichungen in den Bauteilabmessungen. | Iterative Anpassung der Skalierungsfaktoren, um Maßhaltigkeit im gesamten Baubereich zu steigern. |

2.5.1 Porosität und Inhomogenitäten

Porosität und Inhomogenitäten zählen zu den häufigsten Defekten beim PBF/LB-M. Porosität entsteht, wenn während des Aufschmelzens und Abkühlens Gaseinschlüsse nicht entweichen können. Dies kann durch unzureichende Schmelzbedingungen, wie ungünstige Prozessparameter oder eine mangelhafte Pulverqualität, verursacht werden. Die Ursachen für Porosität können vielfältig sein. Eine unzureichende Schmelzbedingung, wie zu hohe oder zu niedrige Laserleistung, kann dazu führen, dass das Material nicht ausreichend schmilzt und Pulver im erstarrenden Bereich eingeschlossen wird. Verunreinigungen im Pulver führen ebenfalls zu Inhomogenitäten, die die mechanische Festigkeit, Dichtigkeit und thermischen Eigenschaften der Bauteile negativ beeinflussen. Die Abstimmung der Prozessparameter sowie eine homogene Materialzusammensetzung sind daher wichtig, um diese Defekte zu minimieren.

Zudem könnten KI-gestützte (Künstliche Intelligenz) Modelle, die auf Datenanalysen und Simulationen basieren, die Identifikation von passenden Parameterkombinationen in Zukunft effizienter gestalten [38,177–180].

2.5.2 Strahlversatz und X-Y-Achsenkalierung

Die Anpassung vom Strahlversatz (engl. Beam offset) und der X-Y-Achsenkalierung ist von zentraler Bedeutung für die Maßhaltigkeit im additiven Fertigungsprozess. Diese Parameter beeinflussen direkt die geometrische Genauigkeit. Eine unzureichende Kalibrierung dieser Faktoren kann zu systematischen Abweichungen führen, die sich in ungenauen Bauteilabmessungen und geometrischen Verzerrungen äußern [181–183].

Der Strahlversatz dient dazu, die Bahnführung des Laserstrahls anzupassen, um die Fertigung exakter Außen- und Innenkonturen zu ermöglichen. Ohne diese Kompensation neigen erhabene Merkmale dazu überdimensioniert und vertiefte Strukturen unterdimensioniert gefertigt zu werden. Eine Anpassung des Strahlversatzes stellt sicher, dass die Konturen der Bauteile möglichst genau den Konstruktionsvorgaben entsprechen (s. Abb. 7) [181,182]. Die X-Y-Achsenkalierung adressiert die Proportionalität und Maßhaltigkeit des gesamten Bauraums. Besonders bei Bauteilen mit größerer Ausdehnung oder bei unterschiedlichen Abständen auf der Bauplattform treten oft Maßabweichungen auf. Dies liegt an einer ungenauen Skalierung der Achsen, die sich über größere Distanzen stärker bemerkbar macht. Durch eine iterative Anpassung der linearen X- und Y-Skalierungsfaktoren lässt sich die geometrische Verzerrung reduzieren, wodurch eine einheitliche Präzision im gesamten Bauraum erzielt wird [181–183]. Die praktische Anpassung vom Strahlversatz und der X-Y-Skalierung wird in Kap. 5.2.1 adressiert.

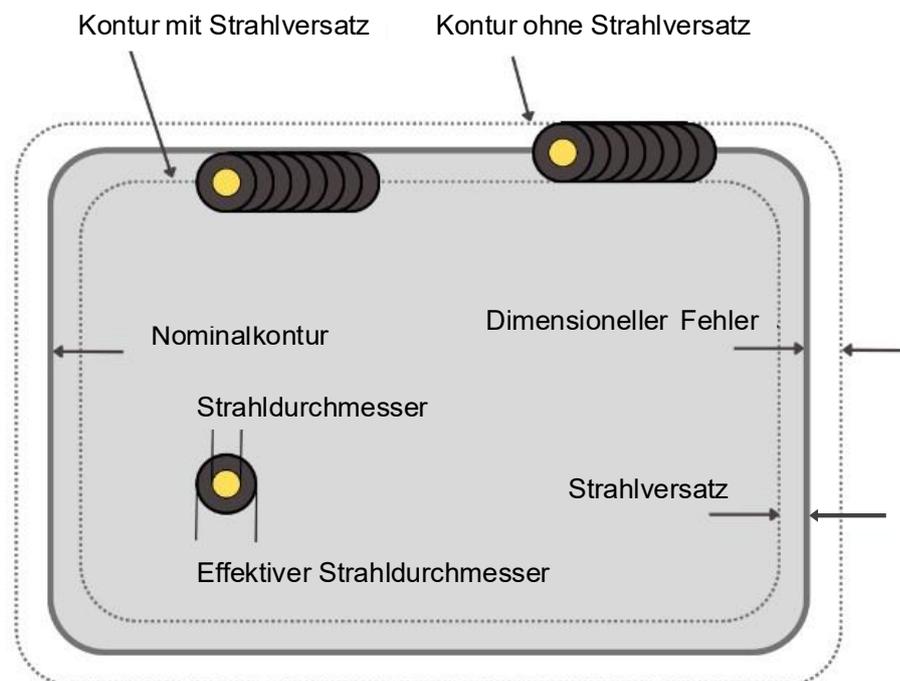


Abb. 7: Schematische Darstellung des Einflusses des Strahlversatzes auf die Konturgenauigkeit und den dimensionellen Fehler beim PBF/LB-M-Prozess

2.6 Wärmebehandlung von additiv gefertigten Bauteilen

Die Wärmebehandlung ist ein essenzieller Schritt zur Optimierung der Materialeigenschaften und Qualität von AF-Bauteilen. Durch Wärmebehandlungen können mechanische Eigenschaften und die Maßhaltigkeit signifikant gesteigert werden.

2.6.1 Spannungsarmglühen und Einfluss der Wärmebehandlung

Der Zweck der Wärmebehandlung liegt in der Anpassung und Optimierung der Mikrostruktur sowie der Reduzierung von Defekten, die während des PBF/LB-M-Prozesses entstehen. Die schnelle Abkühlung bei der AF führt zu einer feinkörnigen Mikrostruktur. Durch kontrolliertes Erwärmen und Abkühlen lassen sich Defekte minimieren und die Homogenität der Mikrostruktur erhöhen, was die mechanischen Eigenschaften des Bauteils steigert [24,67,110,171,184].

Ein wesentlicher Vorteil der Wärmebehandlung ist zudem die Reduzierung von Eigenspannungen, die während des PBF/LB-M-Prozesses entstehen. Diese Spannungen führen häufig zu Verzügen und Rissen, welche die Maßhaltigkeit und strukturelle Integrität der Bauteile beeinträchtigen. Durch eine Wärmebehandlung wird das Material thermisch entspannt, wodurch die Neigung zu Verformungen verringert wird. Zusätzlich ermöglicht die Eigenspannungsreduktion eine einfachere mechanische Nachbearbeitung der Bauteile. Die Wärmebehandlung erhöht auch die Zähigkeit und Duktilität des Materials, was insbesondere für Bauteile, die hohen Belastungen ausgesetzt sind, von großer Bedeutung ist [53,57,64,66,76,91,166,171,184–189].

Das Spannungsarmglühen ist dabei eine bedeutende Wärmebehandlungsmethode und eine Methode zur Reduzierung von Eigenspannungen in AF-Bauteilen. Das Bauteil wird auf eine Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes erhitzt und für eine festgelegte Zeit gehalten, wodurch Spannungen abgebaut werden. Durch die Reduzierung von Eigenspannungen wird die Anfälligkeit für Verzüge und Verformungen minimiert [53,56,63,67,76,166,184].

2.6.2 Bauplattformheizung

Die Bauplattformheizung (BPH) ist eine spezielle Form der Prozesssteuerung, die direkt während des PBF/LB-M-Prozesses angewendet wird. Bei der Bauplattformheizung wird die Bauplattform, auf der das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut wird, auf eine erhöhte Temperatur erwärmt. Einer der Hauptzwecke der Bauplattformheizung ist die Reduzierung von Eigenspannungen in den Bauteilen durch Reduzierung des Temperaturgradienten zwischen dem bereits abgekühlten Material und dem neu hinzugefügten Pulver, das aufgeschmolzen wird. Durch die Erwärmung der Bauplattform werden die thermischen Spannungen während des Abkühlens reduziert, was zu einer homogeneren Mikrostruktur führt [53,56,63,67,80,184].

2.7 Statistische Methoden für die Prozessparameteroptimierung

Statistische Methoden sind bedeutend für die Optimierung der Prozessparameter und die Gewährleistung hoher Reproduzierbarkeit. Dieses Kapitel beleuchtet verschiedene statistische Ansätze zur Analyse und Optimierung des PBF/LB-M-Prozesses.

2.7.1 Statistische Versuchsplanung (DoE, Design of Experiments)

Die statistische Versuchsplanung (DoE) bietet eine strukturierte Methode, um kritische Prozessparameter systematisch zu untersuchen und deren Einfluss auf die Materialeigenschaften und Maßhaltigkeit zu analysieren. Der Prozess beginnt mit der Auswahl der relevanten Parameter, gefolgt von der Definition von Parametergrenzen und der Erstellung von Versuchsplänen, die eine gezielte Variation der Parameter ermöglichen [190,191].

DoE wird hauptsächlich verwendet, um experimentelle Kombinationen der Prozessparameter effizient zu organisieren. Die Analyse der Versuchsergebnisse erlaubt die Identifikation signifikanter Einflussfaktoren und die Ermittlung optimaler Prozessparameter. Zudem bietet DoE die Möglichkeit, Zielgrößenoptimierungen durchzuführen und auf Grundlage der Ergebnisse Bauteileigenschaften für beliebige Parameterkombinationen zu simulieren [38,61,104,190–193].

2.7.2 Varianzanalyse (ANOVA, Analysis of Variance)

Die Varianzanalyse (ANOVA) hingegen dient der statistischen Bewertung der Effekte von Prozessparametern auf die Bauteileigenschaften und Maßhaltigkeit. Während DoE die Experimente organisiert, konzentriert sich ANOVA auf die detaillierte Analyse der resultierenden Daten. Sie teilt die Variabilität der Ergebnisse auf die einzelnen Einflussfaktoren auf und bewertet deren statistische Signifikanz. ANOVA ermöglicht nicht nur die Identifikation von Hauptfaktoren, sondern auch die Analyse von Wechselwirkungen zwischen den Parametern. Im Kontext des PBF/LB-M-Prozesses zeigt die ANOVA, welche Parameter – wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit oder Spurabstand – einen signifikanten Einfluss haben und in welchem Maße sie die Ergebnisse beeinflussen. Dies bietet eine Grundlage für gezielte Prozessoptimierungen. Durch den strukturierten Ansatz von ANOVA können trotz begrenzter Versuchszahlen aussagekräftige Erkenntnisse über die Signifikanz der Faktoren gewonnen werden [38,136,139–141,143,192,194].

2.8 Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit von PBF/LB-M-Ergebnissen

Die Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen im Zusammenhang mit dem PBF/LB-M-Verfahren sind von elementarer Bedeutung für die industrielle Anwendung. In diesem Kapitel werden die Herausforderungen und Ansätze untersucht, um sicherzustellen, dass die erzielten Ergebnisse unter variierenden Bedingungen reproduzierbar und übertragbar sind.

2.8.1 Reproduzierbarkeit

Nach der Definition der ASTM E 177 [195,196] bezeichnet die Reproduzierbarkeit die Präzision von Testergebnissen, die unter identischen Bedingungen erzielt werden. Dies umfasst die Verwendung derselben Methode, identischer Prüflinge, desselben Bedieners und derselben

Ausrüstung innerhalb kurzer Zeitintervalle. Die Reproduzierbarkeit wird durch die Standardabweichung der Messergebnisse dargestellt.

Reproduzierbarkeit beschreibt somit die Fähigkeit, identische oder vergleichbare Ergebnisse in mehreren Versuchs- oder Produktionszyklen zu erzielen. Im PBF/LB-M-Prozess ist dies ausschlaggebend für die Qualitätssicherung, insbesondere in Bezug auf Eigenschaften wie Festigkeit, Härte, Dichte und Maßhaltigkeit der Bauteile [195,197–201]. Untersuchungen zeigen, dass in mehreren Zyklen wiederverwendetes Pulver ähnliche Ergebnisse wie frisches Pulver erzielt, wobei zwischen 90 % und 98 % des nicht aufgeschmolzenen Pulvers wiederverwendet werden kann [197,202–204]. Allerdings kann die Position der Bauplattform zu Abweichungen führen, was verdeutlicht, wie sensibel der PBF/LB-M-Prozess auf geometrische und thermische Einflüsse reagiert [10,105,162]. Auch die Wahl einer geeigneten Wärmebehandlung ist wichtig, da unterschiedliche Verfahren zu erheblichen Abweichungen in den mechanischen Eigenschaften führen können [53,57,66,76].

Unter identischen Druckparametern und kontrollierten Bedingungen kann eine hohe Reproduzierbarkeit erreicht werden. Allerdings können kleine Variationen in den Umgebungsbedingungen oder dem Material zu signifikanten Unterschieden in den Endprodukten führen [164,165,205]. Die Kalibrierung und Wartung der Maschinen spielen dabei eine bedeutende Rolle. Dieses kann die Reproduzierbarkeit erheblich steigern und Abweichungen zwischen den Druckdurchgängen minimieren. Zusätzlich ist die Optimierung der Prozessparameter wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand notwendig, um konsistente Ergebnisse zu erzielen und die Variabilität zu reduzieren [206].

Es besteht ein Mangel an Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit in der additiven Fertigung. Weller et al. [207] betonen in einer umfassenden wirtschaftlichen Überprüfung, dass die begrenzte Reproduzierbarkeit von Ergebnissen das größte Hindernis für Investitionen in AF-Systeme darstellt.

Obwohl Maschinen und Materialien ähnlich sein können, hängt die resultierende Geometrie somit stark vom ursprünglichen Bauteildesign, der Bauweise, den Maschinenparametern, dem Ausgangsmaterial und den Nachbearbeitungsschritten ab. Diese Faktoren beeinflussen die Fähigkeit, Bauteile wiederholt innerhalb der gewünschten Anforderungen zu produzieren. Insbesondere die Teilegenauigkeit und Druckbarkeit sind empfindlich gegenüber diesen Parametern sowie den Hardware- und Softwareeinschränkungen [164,208,209].

Prozesskontrolle und Variabilität

Die Prozesskontrolle ist wesentlich, um gleichbleibende Qualität sowohl innerhalb eines Drucks als auch zwischen verschiedenen Druckvorgängen sicherzustellen. Ahmed et al. zeigen in einer Reproduzierbarkeitsstudie, dass der PBF/LB-M-Prozess zufällige Variationen aufweist, die auf systematische Fehler zurückzuführen sind [165]. Nachbearbeitungsschritte nach dem Druck können ebenfalls zusätzliche Variabilität einführen. Um die Funktionalität eines AF-Bauteils für die Endanwendung sicherzustellen, ist ein tiefgehendes Verständnis des gesamten Fertigungsprozesses unerlässlich [164,165].

2.8.2 Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen beschreibt die Fähigkeit, in einer spezifischen Produktionsumgebung erzielte Resultate auf andere Maschinen, Materialien oder Fertigungsbedingungen zu übertragen. Im PBF/LB-M-Prozess gestaltet sich dies oft als Herausforderung, da zahlreiche Faktoren wie Maschinenspezifikationen, Pulverqualitäten oder atmosphärische Bedingungen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben [61,200,201,210].

Um die Übertragbarkeit sicherzustellen, ist eine gründliche Dokumentation der experimentellen Bedingungen sowie eine Abstimmung der Prozessparameter auf die jeweilige Anlage unerlässlich. Unterschiede in der Maschinenkonfiguration, etwa bei der Laserquelle, dem Strahldurchmesser oder der Bauraumatmosphäre, können die Materialeigenschaften beeinflussen und müssen bei der Übertragung von Prozessen berücksichtigt werden. Allgemein wird jedoch davon ausgegangen, dass eine vollständige Übertragbarkeit in der AF schwer zu erreichen ist. Zu viele Faktoren variieren von Anlage zu Anlage und machen eine direkte Übertragung der Ergebnisse oft unmöglich. Anpassungen und individuelle Optimierungen für jede spezifische Anwendung sind in der Praxis daher unumgänglich [200,201,210].

Die Reproduzierbarkeit (s. Kap. 5.5) und Übertragbarkeit (s. Kap. 4.6) von Ergebnissen sind bislang weitgehend unerforscht und werden im Hauptteil der Arbeit durch konkrete Beispiele, Vergleiche und Studien behandelt. Dabei wird untersucht, wie unterschiedliche Prozessparameter, Materialien und Maschinenkonfigurationen die Konsistenz der Bauteileigenschaften beeinflussen und inwiefern Maßnahmen ergriffen werden können, um die Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit sicherzustellen.

2.9 Fazit und Zusammenfassung des Standes der Technik und Forschung

Die AF mittels PBF/LB-M bietet enormes Potenzial für die Herstellung von Bauteilen aus AlSi10Mg, insbesondere durch die Fähigkeit, komplexe Geometrien mit hoher Maßhaltigkeit zu realisieren. Dabei steht die Maßhaltigkeit als zentrales Qualitätskriterium im Fokus dieser Arbeit, da bereits geringe Abweichungen in den Bauteilabmessungen zu Funktionsstörungen führen können. Die Anpassung der Prozessparameter wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurabstand und Gasströmung, spielt eine elementare Rolle, um thermische Spannungen, Verzüge und Maßabweichungen zu minimieren.

Die Abstimmung der Prozessparameter stellt eine der größten Herausforderungen dar, um eine konsistente Maßgenauigkeit zu gewährleisten. Eine hohe Laserleistung führt oft zu Überhitzung und damit verbundenen Verzügen, während eine gesteigerte Scangeschwindigkeit den Wärmeeintrag verringert. Eine kleinere Schichtdicke erhöht die Abbildungsgenauigkeit, allerdings verlängert sich dadurch die Bauzeit. Eine stabil geregelte Gasatmosphäre, meist aus Argon oder Stickstoff, unterstützt die Homogenität des Schmelzbades und trägt somit zur Sicherung der Maßhaltigkeit bei.

Ein weiterer relevanter Faktor ist die Positionierung der Bauteile auf der Bauplattform. Hier besteht weiterhin Handlungsbedarf, durch Platzierungsstrategien und optimierte Gasströmungen eine gleichmäßige Maßhaltigkeit über die gesamte Bauplattform hinweg sicherzustellen.

Die Wahl der Scanstrategie beeinflusst ebenfalls signifikant die Maßgenauigkeit. Strategien wie Streifen- und Kreuzbelichtung bieten eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und fördern dadurch die Maßhaltigkeit. Im Gegensatz dazu können Inselbelichtungen aufgrund von lokal erhöhter Wärmeentwicklung zu Maßabweichungen führen. Es ist notwendig, Scanmuster weiter zu optimieren und Überwachungsmechanismen während des Fertigungsprozesses zu implementieren, um thermische Defekte zu vermeiden.

Auch in der Nachbearbeitung bestehen Potenziale zur Steigerung der Maßhaltigkeit. Verfahren wie das Laserumschmelzen tragen zur Optimierung der Oberflächenqualität bei, doch weitere Entwicklungen im Bereich automatisierter Nachbearbeitungstechniken könnten dazu beitragen, sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Oberflächenrauheit für anspruchsvolle Geometrien weiter zu erhöhen.

3 Handlungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus dem Stand der Forschung wird deutlich, dass bereits wertvolle Grundlagen vorliegen, die zu einem tieferen Verständnis der Faktoren beitragen, welche die mechanischen Eigenschaften und Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen beeinflussen. Die bisherigen Forschungsergebnisse liefern wertvolle Informationen zur Optimierung der Prozessparameter und deren Einfluss auf die Bauteilqualität. Allerdings wird eine wesentliche Forschungslücke erkennbar: Bisher bleibt eine ganzheitliche Betrachtung der Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit unberücksichtigt.

3.1 Forschungslücke

Aktuell fehlt eine systematische Analyse, die den Einfluss von Prozessparametern, Bauplattformpositionen und Scanstrategien gemeinsam untersucht und deren Wechselwirkungen auf die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit von Bauteilen in einem umfassenden Kontext erfasst. Bisherige Studien behandeln diese Faktoren überwiegend isoliert voneinander, ohne ihre gegenseitigen Abhängigkeiten zu beleuchten. Einzelne Studien untersuchen beispielsweise den Einfluss der Bauplattformpositionen [10,105] oder der Scanstrategien [122,129] auf die Maßhaltigkeit, jedoch blieb bislang unberücksichtigt, wie diese in Kombination mit den Prozessparametern und der Reproduzierbarkeit [11,165] zusammenwirken.

Diese Forschungslücke ist besonders relevant, da diese zu den wichtigsten Parametern beim AF-Prozess gehören und die Kombination dieser Faktoren von zentraler Bedeutung ist. Eine integrative Untersuchung dieser Wechselwirkungen ermöglicht nicht nur ein erweitertes Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen, sondern kann auch zielgerichtete Optimierungsstrategien für die AF aufzeigen. Nur durch eine solche ganzheitliche Betrachtung lässt sich eine verlässliche und reproduzierbare Bauteilqualität in der additiven Fertigung sicherstellen.

3.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit von additiv gefertigten AlSi10Mg-Bauteilen systematisch zu untersuchen. Im Fokus steht eine integrative Betrachtung der zentralen Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit. Um die gesetzten Ziele zu erreichen, gliedert sich das methodische Vorgehen in zwei zentrale Untersuchungsbereiche (s. Abb. 8):

1. **Grundlagenuntersuchungen (Kapitel 4):** Systematische und statistische Untersuchung der Materialeigenschaften von AlSi10Mg, einschließlich Dichte, Rauheit, Härte und Festigkeit, und deren Wechselwirkungen mit den Prozessparametern Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Schichtdicke. Diese Untersuchungen sind die Grundlage für die mehrstufige Optimierung der Maßgenauigkeit.
2. **Maßhaltigkeitsuntersuchungen (Kapitel 5 und Kapitel 6):** Untersuchung der Auswirkungen von Prozessparametern, Bauplattformpositionen und Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit. Zusätzlich wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse untersucht, um die

Stabilität und Zuverlässigkeit des Fertigungsprozesses zu bewerten. Ergänzend wird die Anpassung des Strahlversatzes und der X-Y-Achsenkalierung untersucht, um systematische Abweichungen zu reduzieren. Eine Messunsicherheitsbetrachtung ergänzt die Auswertung, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu stützen.

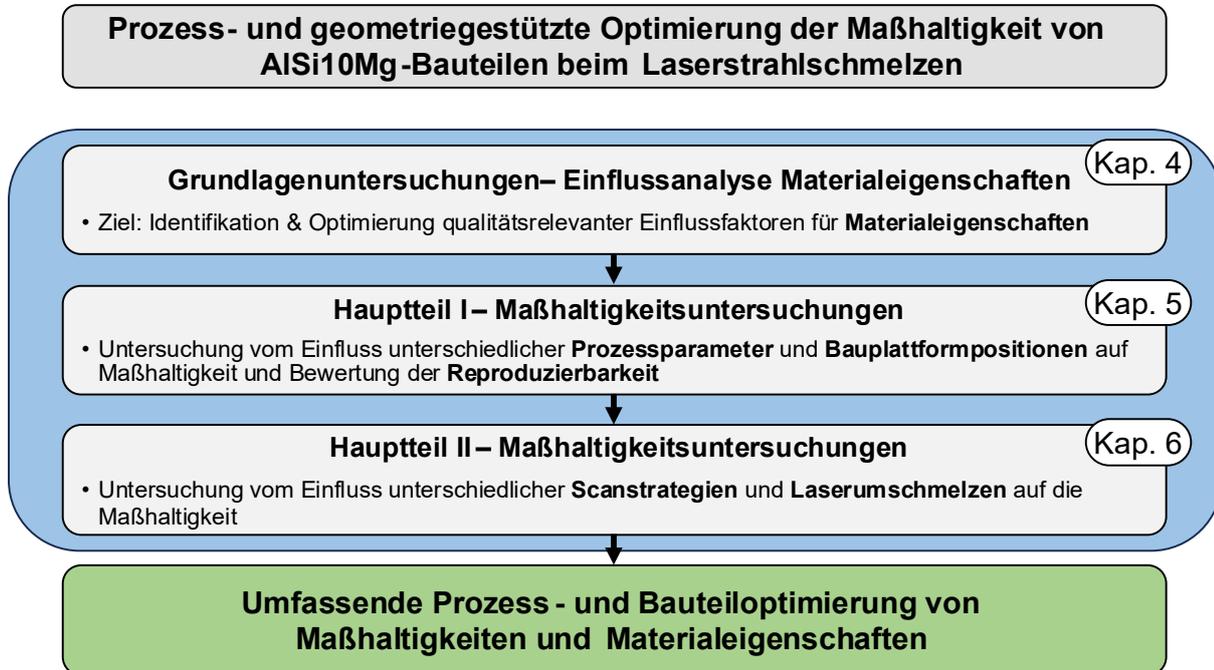


Abb. 8: Methodische Vorgehensweise in dieser Arbeit

3.3 Grundlagenuntersuchungen

Die Grundlagenuntersuchungen befassen sich mit der Untersuchung der Materialeigenschaften von AISi10Mg, einschließlich Dichte, Rauheit, Härte und Festigkeit. Diese Materialeigenschaften werden in Bezug auf ihre Wechselwirkungen mit den Prozessparametern des PBF/LB-M-Verfahrens untersucht. Ziel ist es, optimale Prozessparameter zu identifizieren, um eine hohe Bauteilqualität zu gewährleisten. Die Auswahl und Optimierung der Prozessparameter stellen eine komplexe Herausforderung dar, da sich diese Faktoren stark auf die mechanischen Eigenschaften, die Maßhaltigkeit sowie die Oberflächenqualität der Bauteile auswirken. Ein besonderes Augenmerk wird auf zentrale Prozessparameter wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand gelegt. Um diese Parameter zu untersuchen und ihre Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit zu verstehen, wird eine statistische Versuchsplanung (DoE) eingesetzt, gefolgt von einer Varianzanalyse (ANOVA), um die signifikantesten Einflussfaktoren herauszuarbeiten. Zusätzlich werden zwei Zustände der Bauteile untersucht: wärmebehandelt (WB) und nicht wärmebehandelt (NWB). Dies ermöglicht es, die Auswirkungen einer Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile zu analysieren.

3.4 Maßhaltigkeitsuntersuchungen

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Grundlagenuntersuchungen wird die Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen im Detail analysiert. Der Einfluss von Prozessparametern, Bauplattformpositionen sowie unterschiedlichen Scanstrategien wird in diesem Kontext experimentell untersucht, um ein umfassendes Verständnis der Faktoren zu entwickeln, die die Präzision und Reproduzierbarkeit der Bauteile beeinflussen.

3.4.1 Einfluss von Prozessparametern, Bauplattformpositionen und Reproduzierbarkeit

Die erste Phase der Maßhaltigkeitsuntersuchungen konzentriert sich auf die Analyse der Prozessparameter und deren Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit. Variablen wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand spielen dabei eine elementare Rolle, da sie direkt den Schmelz- und Erstarrungsprozess sowie die geometrische Präzision der Bauteile beeinflussen. Die durchgeführte Anpassung des Strahlversatzes und der X-Y-Achsenkalibrierung sind hierbei ebenfalls wichtige Maßnahmen, um geometrische Abweichungen zu minimieren.

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist die Position der Bauteile auf der Bauplattform. Es wird angenommen, dass Bauteile, die sich am Rand der Bauplattform befinden, größere Maßabweichungen aufweisen als solche, die zentral positioniert sind. Um dies zu überprüfen, werden Bauteile an unterschiedlichen Positionen auf der Bauplattform gefertigt und ihre Maßhaltigkeit verglichen.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist ein entscheidender Faktor für die industrielle Anwendbarkeit der AF. In dieser Arbeit wird untersucht, ob Bauteile, die unter identischen Bedingungen gefertigt werden, eine konsistente Maßhaltigkeit aufweisen. Eine Messunsicherheitsbetrachtung ergänzt die Untersuchungen, um die Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse zu bewerten und systematische Abweichungen zu identifizieren.

3.4.2 Einfluss von Scanstrategien

In der zweiten Phase der Maßhaltigkeitsuntersuchungen liegt der Fokus auf der Untersuchung unterschiedlicher Scanstrategien. Die Art und Weise, wie der Laser das Pulverbett scannt und die Schichten aufbaut, beeinflusst maßgeblich die thermischen Spannungen, die während des Erstarrungsprozesses entstehen, und somit auch die Maßhaltigkeit.

Es werden verschiedene Scanmuster wie Streifenbelichtung, Inselbelichtung und Kreuzbelichtung untersucht, die spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität aufweisen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, eine geeignete Scanstrategie für den untersuchten AF-Prüfkörper zu identifizieren, um eine homogene Maßhaltigkeit und eine hohe Oberflächenqualität sicherzustellen.

4 Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter und Materialeigenschaften mithilfe statistischer Methoden

Dieses Kapitel beschreibt eine umfassende Untersuchung zur Optimierung der Prozessparameter im PBF/LB-M-Verfahren unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf die Materialeigenschaften der Legierung AlSi10Mg. Diese Arbeit hebt sich durch den Einsatz einer breiten statistischen Methodik und eines erweiterten experimentellen Rahmens von bisherigen Studien ab. Während frühere Arbeiten häufig spezifische Materialeigenschaften oder einen begrenzten Parameterbereich optimierten, umfasst dieser Ansatz ein signifikant größeres Parameterfeld, um eine ausführliche Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Parametern und deren Einfluss auf die wesentlichsten Materialeigenschaften zu ermöglichen (s. Tab. 4).

Dieses Kapitel beruht auf der Veröffentlichung "Comprehensive study on statistical methods for optimization of process parameters and material properties of AlSi10Mg in laser powder bed fusion" von Krasniqi et al. [61].

Tab. 4: Zusammenfassung der Forschung zur Prozessparameteroptimierung

| Referenzen | | [52] | [136] | [137] | [100] | [138] | [115] | [139] | [140] | Diese Arbeit |
|---------------------------------|-------------------|-------------|-------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Parameterfeld | Laserleistung [W] | 150-350 | 400 | 370 | 170-200 | 370 | 200-370 | 200-400 | 240 | 200-400 |
| | Scangeschw. [m/s] | 0,1-10,0 | - | 1,16 - 1,57 | 0,2-1,6 | 0,8-2,0 | 1,0-1,5 | 1,0-2,0 | 0,4-1,2 | 0,4-1,6 |
| | Spurabstand [mm] | 0,09 - 0,17 | - | 0,16 - 0,18 | 0,1 | 0,06 - 0,24 | 0,15 - 0,25 | 0,1-0,15 | 0,04 - 0,2 | 0,06-0,22 |
| | Schichtdicke [mm] | 0,03 | - | 0,03 | - | 0,06 | 0,03 | 0,03 - 0,05 | 0,02 - 0,06 | 0,04 |
| Dichte | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Härte | | | | | | | | x | | x |
| Zugfestigkeit | | | x | x | | x | x | | x | x |
| Rauheit | | | | | x | | x | | | x |
| Wärmebehandlung | | | | | x | | | | x | x |
| Vollfaktorielle Parameterstudie | | | x | | | | | x | x | x |
| Validierung der Optimierungen | | | | | | | | | | x |
| Anzahl an Testproben | | 55 | 18 | 12 | 65 | 82 | 18 | 27 | 108 | 106 |

| Tab. 4 fortgesetzt | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|---------|--|--------------|
| Referenzen | | [141] | [142] | [143] | [68] | [22] | [38] | [192] | | Diese Arbeit |
| Parameterfeld | Laserleistung [W] | 150-190 | 320-400 | 40-120 | 340-370 | 300-400 | 100-200 | 175 | | 200-400 |
| | Scangeschw. [m/s] | 0,8-1,2 | 0,6-0,9 | 0,4-1,2 | 0,9-1,7 | 0,3-1,05 | 0,7-2,0 | 0,8-1,4 | | 0,4-1,6 |
| | Spurabstand [mm] | 0,06-0,1 | 0,07-1,16 | 0,05-0,09 | 0,11-0,19 | 0,18 | 0,2-0,8 | 0,2 | | 0,06-0,22 |
| | Schichtdicke [mm] | 0,03 | | 0,03 | | 0,03 | 0,05 | 0,02 | | 0,04 |
| Dichte | | x | x | | | | x | | | x |
| Härte | | x | | | x | | | | | x |
| Zugfestigkeit | | | | | | x | x | | | x |
| Rauheit | | | x | x | | | | x | | x |
| Wärmebehandlung | | | x | | | | | | | x |
| Vollfaktorielle Parameterstudie | | x | x | x | x | x | x | | | x |
| Validierung der Optimierungen | | x | x | x | x | | x | | | x |
| Anzahl an Testproben | | 25 | 27 | 25 | 27 | 63 | 27 | | | 106 |

Ein wichtiger Bestandteil der Methodik ist der Einsatz eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans (DoE) in Verbindung mit einer Varianzanalyse (ANOVA), um systematisch die Effekte von Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurabstand und Bauteilausrichtung über ein weites Parameterfeld zu erfassen (s. Kap. 4.1.5). Der erweiterte Parameterbereich deckt nicht nur die bereits in anderen Studien untersuchten Bereiche ab, sondern geht darüber hinaus, um bisher nicht erforschte Regionen des Prozessfensters zu untersuchen. Die experimentelle Vorgehensweise wird in Abb. 9 zusammengefasst.

Im ersten Schritt werden die Anforderungen an die Materialeigenschaften definiert, einschließlich mechanischer Zielgrößen wie Dichte, Härte, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Rauheit, wobei normative [40] und branchenspezifische Standards [211] die Grundlage bilden.

Zu Beginn erfolgt ein Vorversuch, um sicherzustellen, dass über verschiedene Positionen auf der Bauplattform hinweg vergleichbare Materialeigenschaften erzielt werden. Hierfür werden fünf Würfelproben hinsichtlich Rauheit, Dichte und Härte analysiert. Im Anschluss werden die Hauptversuche durchgeführt, die in die Zustände wärmebehandelt (WB) und nicht-wärmebehandelt (NWB) unterteilt sind. Für jeden Zustand werden 20 Würfel- und 28 Zugproben hergestellt, um die Effekte von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand auf die

Zielgrößen Rauheit, Dichte, Härte und Zugfestigkeit zu erfassen. Die gesammelten Daten werden anschließend mithilfe einer ANOVA ausgewertet, um signifikante Einflussgrößen zu identifizieren. Auf Basis dieser Analyse erfolgt eine Zielgrößenoptimierung zur Feinabstimmung der Prozessparameter.

Zum Abschluss erfolgt eine Bestätigungsmessung. Ziel dieser Messungen ist vor allem die Validierung konsistenter Optimierungsergebnisse. Die gesamte Versuchskampagne umfasst 106 Proben.

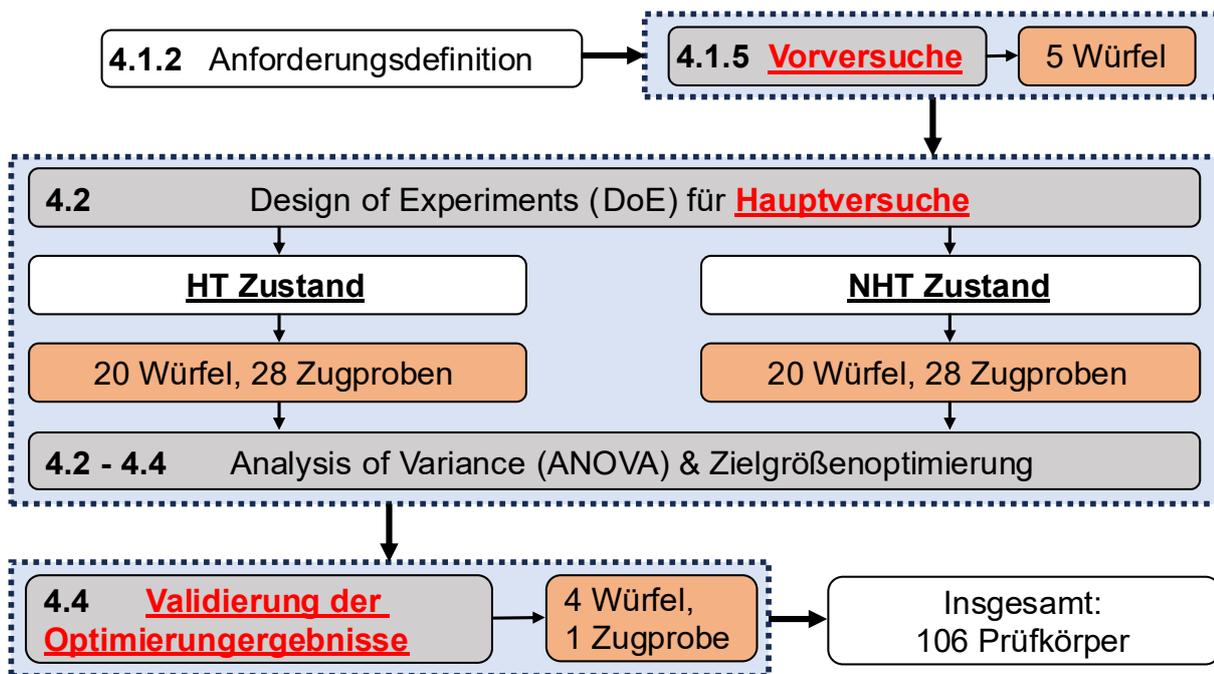


Abb. 9: Experimenteller Arbeitsablauf der Grundlagenuntersuchungen

Dieses Kapitel verfolgt drei Hauptziele:

1. Die Identifikation der wesentlichen Prozessparameter, die einen signifikanten Einfluss auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg haben unter Anwendung der ANOVA-Analyse
2. Die Optimierung der Materialeigenschaften von AlSi10Mg durch statistische Zielgrößenoptimierung und DoE
3. Die Bewertung der Übertragbarkeit der optimierten Parameter und Ergebnisse auf verschiedene Maschinen sowie die Konsistenz der Resultate unter variierenden Fertigungsbedingungen (s. Kap. 4.6)

4.1 Untersuchungsaufbau und Methodik

4.1.1 PBF/LB-M-Anlage und Werkstoff AlSi10Mg

Die Prüfkörper in dieser Arbeit wurden mit einer *DMG Mori Lasertec SLM 30 2nd Gen.*-Anlage hergestellt (s. Abb. 10), die mit einem Ytterbium-Faserlaser ausgestattet ist. Der Bauraum der Anlage beträgt 300 mm × 300 mm × 300 mm und der Laserstrahldurchmesser beträgt 80 µm. Die Strahlverteilung des Lasers folgt einer Gauß'schen Verteilung.

Während der Fertigung wird eine Schutzgasatmosphäre aus Argon verwendet, um den Sauerstoffgehalt unter 0,2 % zu halten. Vor Beginn des Bauprozesses wird das Pulver mithilfe einer integrierten Ultraschall-Siebeinheit aufbereitet. Das aufbereitete Pulver wird anschließend wiederverwendet.



- ① Steuerungsoberfläche
- ② Bauraumgrundplatte
- ③ Beschichter
- ④ Absaugschlauch
- ⑤ Schutzgasdüse
- ⑥ Absaugkanal
- ⑦ Prozesskammertür mit Laserschutzglas & Handschuhen
- ⑧ Ytterbium Faserlaser
- ⑨ Loadereinheit (Pulverförderung, Dosierung, Rücklauf)
- ⑩ Aufzugschacht

Abb. 10: Aufbau und Hauptkomponenten einer PBF/LB-M-Anlage

Als Ausgangsmaterial für die experimentellen Untersuchungen diente der Werkstoff AlSi10Mg in Pulverform vom Hersteller *Heraeus Additive Manufacturing* [212]. Die Analyse der Pulvereigenschaften erfolgte mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX). Die chemische Zusammensetzung des Pulvers ist in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung des verwendeten AlSi10Mg-Pulvers gemäß EDX-Analyse

| Legierungselement | Einheit | Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Al |
|-----------------------------------|---------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| Grenzwerte nach DIN EN 1706 [213] | Ma.-% | 9,0-11,0 | max. 0,55 | max. 0,45 | 0,2-0,45 | max. 0,05 | Rest |
| Pulver (gemessen) | Ma.-% | 10,9 | 0,13 | 0,05 | 0,26 | 0,01 | 87,67 |

Die chemische Analyse zeigt, dass die gemessenen Werte innerhalb der in DIN EN 1706 [213] festgelegten Grenzwerte liegen. Der Siliziumgehalt von 10,9 % befindet sich im oberen Bereich der Spezifikation, was für AlSi10Mg typisch ist.

Die Untersuchung der Partikelmorphologie mittels REM ergab, dass die Mehrheit der Pulverpartikel sphärisch oder nahezu sphärisch ist (s. Abb. 11). Ein kleiner Anteil von länglichen oder unregelmäßig geformten Partikeln wurde ebenfalls festgestellt. Die vorliegende Morphologie trägt zu einer gleichmäßigen Schichtbildung bei und minimiert potenzielle Defekte infolge ungleichmäßiger Pulververteilung. Die Partikelgrößen liegen überwiegend im Bereich von 20 µm bis 63 µm. Die absolute Dichte des AlSi10Mg-Pulvers beträgt 2,67 g/cm³ [212].

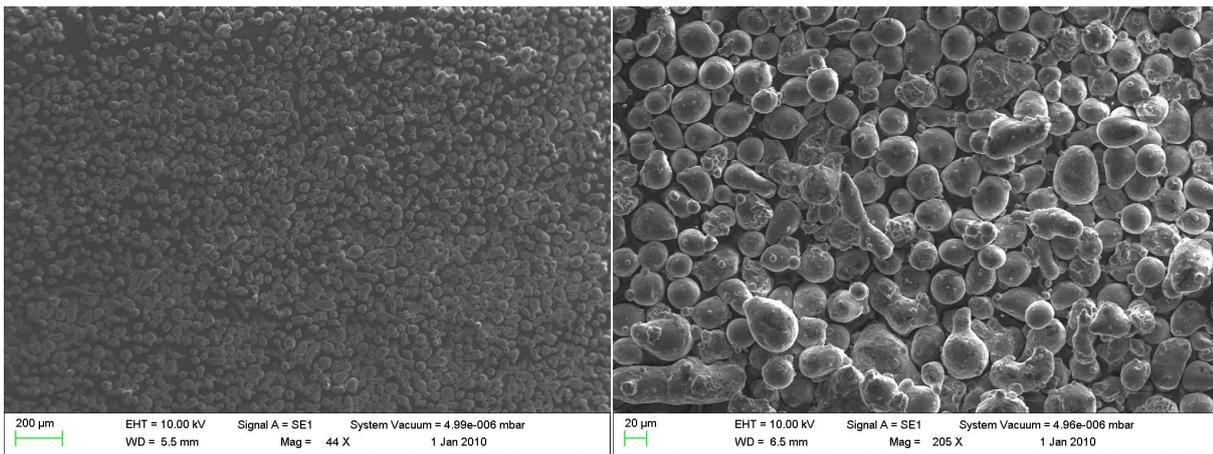


Abb. 11: Morphologie des AlSi10Mg-Pulvers

4.1.2 Anforderungsdefinition

Zu Beginn der Versuchsreihen wurde eine Liste von Anforderungen erstellt. Diese Anforderungen basieren auf der Richtlinie VDI 3405 Blatt 2 [40] und den zusätzlichen branchenüblichen Spezifikationen aus dem Ringvergleich nach VDI 3405 Blatt 2.1 [211]. Die Zielgrößen wurden so festgelegt, dass sie eine Bewertung der Prozessparameter in Bezug auf ihre Auswirkung auf die Materialeigenschaften ermöglichen. Alle Anforderungen und angegebenen Werte gelten für den as-built-Zustand der Proben (unbehandelt). Die wichtigsten quantitativen Anforderungen lauten:

- Bauteildichte: $\geq 99 \%$
- Oberflächenrauheit: $R_a < 15 \mu\text{m}$; $R_z < 70 \mu\text{m}$
- Härte: $\geq 120 \text{ HV}$
- Zugfestigkeit R_m : $\geq 350 \text{ MPa}$
- Bruchdehnung: $\geq 4 \%$

Diese Anforderungen dienen als Leitfaden für die Optimierung der Prozessparameter und die Bewertung der hergestellten Bauteile.

4.1.3 Fertigung und Wärmebehandlung

Die Versuchsreihen in dieser Arbeit basieren auf Testkörpern, die als Würfel und Zugproben hergestellt wurden, um verschiedene Materialeigenschaften umfassend zu charakterisieren. Die Würfelproben werden zur Messung der Rauheit, Dichte und Härte verwendet, während die Zugproben zur Ermittlung der Zugfestigkeit und Bruchdehnung dienen.

Die Untersuchung legt besonderen Fokus auf die Identifizierung und Analyse signifikanter Prozessparameter beim PBF/LB-M. Die Parameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurabstand und Bauorientierung wurden als kritische Faktoren identifiziert, die wesentliche Auswirkungen auf die Materialeigenschaften des Endprodukts haben. Die wechselseitigen Einflüsse dieser Parameter sind ausschlaggebend für die finale Qualität und Performance der hergestellten Bauteile [214,215].

In dieser Studie kommt eine bidirektionale Streifenbelichtungsstrategie zum Einsatz, wobei die Scanrichtung in jeder Schicht um 67° gedreht wird, um eine gleichmäßige Wärmeverteilung zu gewährleisten und Verzug im Material zu reduzieren. Die Schichtdicke wurde konstant auf 40 µm eingestellt.

Der Fertigungsprozess kann zudem eine Vorwärmung der Bauplattform auf bis zu 200 °C beinhalten, um den Temperaturgradienten zwischen dem neu hinzugefügten Pulver und dem bereits abgekühlten Material zu verringern. Diese Maßnahme ist signifikant zur Minimierung von Eigenspannungen im Bauteil während des Druckprozesses. Zusätzlich wird nach der Fertigung Spannungsarmglühen (SAG) als Wärmebehandlung angewendet, um Eigenspannungen zu reduzieren. Das Spannungsarmglühen erfolgt bei 300 °C für eine Dauer von 2 Stunden. Die Aufheizrate beträgt 10 °C pro Minute. Nach Erreichen der Zieltemperatur wird diese für 1,5 Stunden gehalten, bevor die Abkühlung der Proben an Luft mit einer Abkühlrate von etwa 4 °C pro Minute erfolgt.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zwischen zwei Probenzuständen unterschieden: nicht wärmebehandelte (NWB) und wärmebehandelte (WB) Proben, die sich durch die Anwendung der Bauplattformvorheizung und dem nachträglichen Spannungsarmglühen unterscheiden, wie in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Beschreibung der Wärmebehandlungszustände

| Nicht-wärmebehandelt (NWB) | Wärmebehandelt (WB) |
|--|--|
| Keine Bauplattformheizung | Bauplattformheizung auf 200 °C |
| Keine nachträgliche Wärmebehandlung nach der Fertigung | Spannungsarmglühen (2 h bei 300 °C) nach der Fertigung |

4.1.4 Probenpräparation und Materialcharakterisierung

In diesem Abschnitt wird die Vorbereitung und Charakterisierung der Proben beschrieben. Alle Prüfverfahren, die Qualifizierung der Proben sowie die Nachbearbeitungsschritte erfolgen gemäß den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2 [40].

Die Würfelproben wurden in den Maßen 10 mm x 10 mm x 15 mm (15 mm Höhe) gefertigt. Nach der Fertigung wurden die Würfelproben von der Bauplattform abgesägt und auf eine Höhe von 10 mm plangefräst. Die Zugproben hingegen wurden mit Stützstrukturen gedruckt und nach der Fertigung durch subtraktive Bearbeitung auf die gemäß DIN 50125 - Form B [216] spezifizierten Abmessungen gebracht (s. Abb. 12). Für die Würfelproben wurden die folgenden Materialeigenschaften bestimmt:

Dichtemessung

Die Dichtemessung erfolgt nach dem Archimedischen Prinzip mithilfe einer hydrostatischen Waage. Die Kalibrierung der Dichtemessung erfolgt durch Vergleich mit kalibrierten Gewichten, wobei Gewichtsmessungen der Proben in Luft sowie hydrostatische Gewichtsmessungen in Pentadecan durchgeführt werden.

Rauheitsmessung

Die Messung der Oberflächenrauheit erfolgt mit dem *MarSurf GD 120* Messgerät der Firma *Mahr*. Die Rauheitsmessung basiert auf dem Tastschnittverfahren, wobei die Oberfläche der Probe mit einer Tastnadel abgetastet wird. Die Oberfläche wird entlang von fünf einzelnen Messstrecken parallel und senkrecht zur Schichtorientierung gemessen. Jede Messstrecke liefert Daten zur Oberflächenrauheit, einschließlich des arithmetischen Mittenrauwertes R_a und der gemittelten Rautiefe R_z , aus denen schließlich Mittelwerte gebildet werden.

Härteprüfung

Für die Vickers-Härtemessung nach HV1 wurden die Würfelproben metallographisch vorbereitet und in einem wärmehärtenden Material eingebettet, wofür eine *SimpliMet 1000* Warmpressvorrichtung der Firma *Bühler* verwendet wurde. Anschließend wurden die Proben mit einem *LaboPol-5* von *Struers* geschliffen und poliert. Für die Messung der Härte wurde ein pyramidenförmiger Indenter mit einer Prüfbelastung von 9,807 N sowohl in die Mitte als auch in die vier Ecken der Probe eingedrückt und der mittlere Härtewert aus den fünf Messwerten ermittelt.

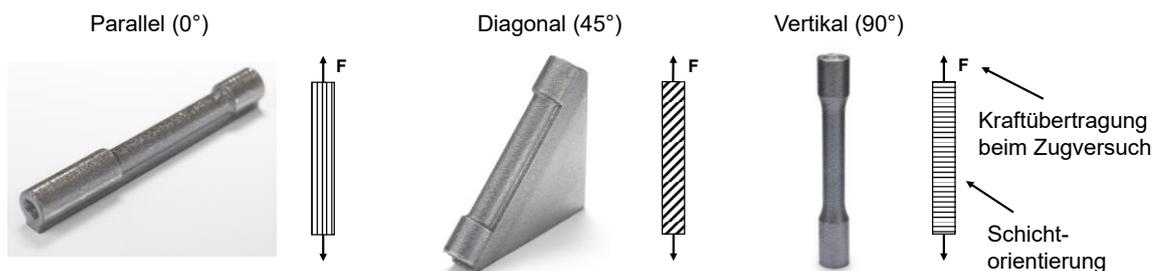
Die verwendeten Methoden zur Materialcharakterisierung und ihre zugehörigen Messgrößen sind in Tab. 7 zusammengefasst.

Tab. 7: Prüfmethoden zur Materialcharakterisierung additiv gefertigter Proben

| Materialeigenschaft | Messgröße | Methode |
|----------------------------|---|---|
| Dichte | Bauteildichte | Archimedische Dichtemessung |
| Rauheit | Arith. Mittenrauwert R_a , Gemittelte Rautiefe R_z | Tastschnittverfahren mit Gauß'schem Filter |
| Härte | Vickers-Härte HV 1 | Härtemessung gemäß DIN EN ISO 6507-1 [217] |
| Festigkeit (Zugversuch) | Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A_{80} | Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892-1 [218] |

Die Zugproben, die im ersten Schritt als Grundkörper additiv mit Stützstrukturen gefertigt werden, durchlaufen anschließend einen weiteren subtraktiven Nachbearbeitungsschritt, um den Anforderungen der Norm DIN 50125 - Form B [33] zu entsprechen. In diesem Schritt werden die Zugproben auf geforderte Abmessungen mit Gewindeköpfen bearbeitet. Die fertigen Zugproben mit unterschiedlichen Bauorientierungen werden anschließend teils zusätzlich Wärmebehandlungen unterzogen, um die anisotropen Materialeigenschaften von AlSi10Mg zu untersuchen. Die Bauorientierungen sind parallel (0°), diagonal (45°) und vertikal (90°) zur Bauplattform, wie in Abb. 12 dargestellt.

a) Additive Fertigung von Zugproben mit unterschiedlichen Aufbauorientierungen (Grundkörper)



b) Additiv gefertigte und subtraktiv nachbearbeitete Zugprobe



Zugprobe gemäß
DIN 50125 - Form B, $d_0 = 6$ mm

Abb. 12: Grundkörper der Zugproben mit verschiedenen Bauorientierungen (a) und fertig bearbeitete Zugprobe gemäß DIN 50125 - Form B (b)

Zugversuch

Die Zugversuche wurden gemäß der Norm DIN EN ISO 6892-1 [218] mit einer *ZwickRoell Z010 AllroundLine* Universalprüfmaschine durchgeführt, die eine maximale Kraft von 10 kN aufbringen kann. In den Versuchen wurden sowohl die Zugfestigkeit R_m als auch die Bruchdehnung A_{80} bestimmt, um eine Bewertung der mechanischen Eigenschaften der Proben in unterschiedlichen Bauorientierungen vorzunehmen.

4.1.5 Experimentelle Planung und statistische Analyse (DoE und ANOVA)

Zur Untersuchung der Effekte und Interaktionen der Prozessparameter auf die Materialeigenschaften wurde ein DoE genutzt. Diese Methode ermöglicht eine umfassende Darstellung von Maxima und Minima innerhalb des Parameterfeldes und bietet die Grundlage zur Erstellung von Konturdiagrammen und signifikanter Aussagen für die statistische Analyse [190]. Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software *Minitab 18.0*. Tab. 8 zeigt die definierten Prozessparameter und Stufen des DoE.

Tab. 8: Prozessparameter und Stufen des DoE

| Parameter | Einheit | Stufe | | | | |
|-----------------|---------|-----------|-----|------|------|----------|
| | | $-\alpha$ | -1 | 0 | 1 | α |
| Laserleistung | W | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Scangeschw. | mm/s | 400 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 |
| Spurabstand | mm | 0,06 | 0,1 | 0,14 | 0,18 | 0,22 |
| Bauorientierung | ° | -45 | 0 | 45 | 90 | 135 |

Experimentelle Kampagne

Die experimentelle Kampagne umfasst insgesamt 106 Proben und beginnt mit einem Vorversuch, um sicherzustellen, dass die Materialeigenschaften an unterschiedlichen Positionen auf der Bauplattform vergleichbar sind (s. Tab. 9). Dafür wurden fünf Würfelproben gemäß DIN EN ISO/ASTM 52921 an den vier Ecken und in der Mitte der Bauplattform gefertigt und auf ihre Materialeigenschaften untersucht [219]. Da die Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede aufwiesen, konnten die Proben für die Hauptstudie in zufälliger Anordnung auf der Bauplattform gedruckt werden. Studien aus der Literatur zeigen ebenfalls, dass die Position auf der Bauplattform keine signifikanten Auswirkungen auf die Rauheit, Zugfestigkeit und Dichte hat [11,113].

Die Hauptversuche bestehen aus 96 Testproben (40 Würfel- und 56 Zugproben), die in vier Druckaufträgen hergestellt werden. Um die Auswirkungen der Wärmebehandlung zu untersuchen, werden die Proben in den Zuständen „wärmebehandelt“ (WB) und „nicht-wärmebehandelt“ (NWB) produziert. Die experimentelle Anordnung des zentral zusammengesetzten Versuchsplans beinhaltet ein vollständig faktorielles Design (Würfelbereich), einen Sternbereich (Alpha) und einen zentralen Punkt (n_0). Im Würfelbereich werden die Parameterwerte -1 und 1 gemäß Tab. 8 angewendet, während die Alpha-Werte für den Sternbereich zur Definition der Punktabstände vom Zentrum berechnet wurden. Das Zentrum repräsentiert den Mittelwert der minimalen und maximalen Parameterwerte. In dieser Region werden Messungen mit denselben Parametern wiederholt, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit zu ermöglichen [190].

Das DoE-Design umfasste für die Zugproben insgesamt 28 Testkombinationen, wobei die Aufbau- und Bauorientierung als kritischer Faktor berücksichtigt wird (s. Anhang: Tab. A1). Für die Würfelproben wird das DoE-Design durch Wegfall der Bauorientierungen vereinfacht, sodass 20 Parameterkombinationen angewendet werden (s. Anhang: Tab. A2).

Tab. 9: Versuchskampagne und Wärmebehandlungszustände der Testproben

| Experimentelle Kampagne | WB-Zustand | NWB-Zustand | Anzahl an Testkörpern |
|--|------------|-----------------------|-----------------------|
| Vorversuche | | 5 Würfel | 5 |
| Hauptversuche: Würfel | 20 | 20 | 40 |
| Hauptversuche: Zugproben | 28 | 28 | 56 |
| Validierung der Optimierungsergebnisse | | 4 Würfel / 1 Zugprobe | 5 |
| | | | Gesamt: 106 |

Varianzanalyse (ANOVA)

Zur ergänzenden statistischen Auswertung der DoE-Ergebnisse wird eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Diese Methode analysiert die Variabilität innerhalb des Versuchsdesigns und ermittelt die statistische Signifikanz der einzelnen Prozessparameter und deren Interaktionen. Mithilfe der ANOVA werden die relevanten Einflussfaktoren für die gewünschten Materialeigenschaften identifiziert und bewertet.

Im Rahmen der Analyse werden für die einzelnen Prozessparameter schrittweise Regressionsmodelle erstellt, die die beobachteten Effekte abbilden. Die Güte des Modells wird anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) bewertet: Ein R^2 -Wert nahe 100 % zeigt eine starke Übereinstimmung zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Messwerten, während ein Wert nahe 0 % eine schwache Korrelation darstellt [43]. Parameter oder Modelle gelten als signifikant, wenn ihr p-Wert oder der p-Wert ihrer quadratischen oder Interaktionseffekte unter 0,05 liegt, was ein Konfidenzniveau von 95 % ($k = 2$) anzeigt. Das entwickelte Regressionsmodell, welches die drei Eingabeparameter und die Wechselwirkungen berücksichtigt, kann durch folgende Gleichung beschrieben werden

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_{ii}^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{Gl. 2}$$

Mit Y als untersuchte Reaktion, β_0 , β_i , β_{ii} und β_{ij} als Regressionskoeffizienten für die Achsenabschnitte, linearen und quadratischen Terme und X_i sowie X_j als unabhängige Variablen (Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand).

4.2 Ergebnisse und Analyse

4.2.1 Dichte

Die Dichte ist die kritischste Zielgröße, da die Gewährleistung einer minimalen Porosität zu den wichtigsten Anforderungen von AF-Komponenten gehört [40]. Die erweiterte Messunsicherheit U für die Dichtemessungen beträgt $7 \cdot 10^{-4}$ für ein Konfidenzintervall von 95 % ($k = 2$).

Die höchste experimentell erreichte Dichte in dieser Studie lag bei 99,86 % und wurde bei einem Spurabstand von 0,14 mm, einer Scangeschwindigkeit von 1000 mm/s und einer Laserleistung von 300 W erzielt. Weitere experimentelle Ergebnisse finden sich in Tab. A2.

Die 2D-Konturdiagramme, die auf der Grundlage dieser Dichtemessungen erstellt wurden, veranschaulichen die Beziehung zwischen den archimedischen Dichtemessungen und den Prozessparametern (s. Abb. 13).

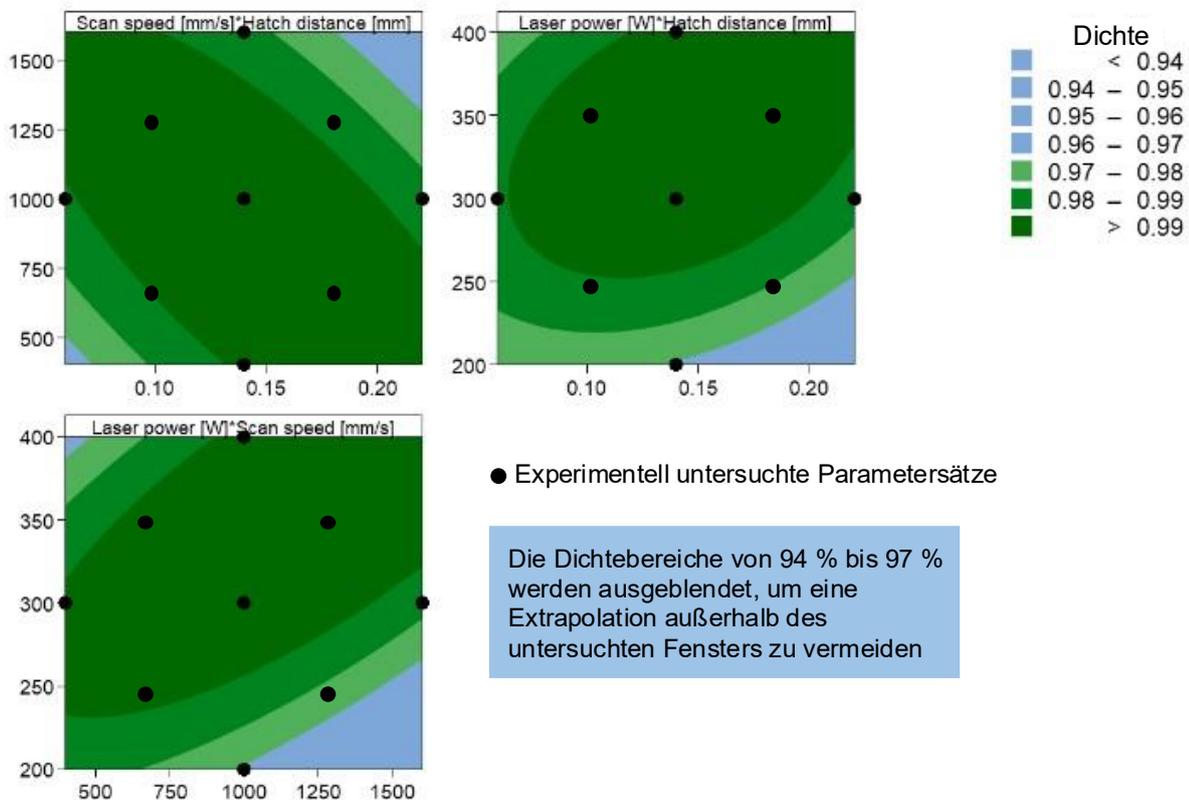


Abb. 13: Konturdiagramme der Auswertung der Dichtemessungen

Die Konturdiagramme zeigen, dass eine Erhöhung der Laserleistung tendenziell in Zusammenhang mit höheren Dichtewerten steht. Dies ist an den höchsten Dichtewerten bei den Probennummern 13 mit 400 W Laserleistung und bei den Probennummern 15-20 mit 300 W Laserleistung zu erkennen (s. Tab. A2). Die entsprechenden Schlifffbilder zeigen keine sichtbaren Poren (s. Abb. 4 und Abb. 22). Im Gegensatz dazu treten geringere Dichtewerte typischerweise bei hohen Scangeschwindigkeiten und niedrigen Laserleistungen auf (vgl. Abb. 13 und Tab. A2).

Es ist zu beachten, dass die statistische Versuchsplanung gewisse Grenzen aufweist, wie etwa die beschränkte Generalisierbarkeit der Ergebnisse über den untersuchten Parameterbereich hinaus. Um eine Extrapolation zu vermeiden und sicherzustellen, dass die gezogenen Schlussfolgerungen zuverlässig sind, wurden Vorhersagen außerhalb des untersuchten Parameterfeldes ausgeschlossen.

Die Regressionsanalyse für die Dichte führt zu folgender Gleichung:

$$\begin{aligned}
 \text{Dichte } \rho &= 0,8599 + 0,457 A - 0,00001 B + 0,000631 C && \text{Gl. 3} \\
 &- 1,887 A^2 - 0,0 B^2 - 0,00002 C^2 \\
 &- 0,000366 AB + 0,00137 AC + 0,0 BC
 \end{aligned}$$

mit: A = Spurabstand, B = Scangeschwindigkeit, C = Laserleistung

Tab. 10 zeigt die Ergebnisse der ANOVA-Studie für die Dichte, wobei DF für die Gesamt-Freiheitsgrade, Kor SS für die korrigierten Summen der Quadrate und Kor MS für die korrigierten Mittel der Quadrate steht.

Tab. 10: ANOVA-Ergebnisse für Dichte

| Faktor | DF | Kor SS | Kor MS | F-Wert | p-Wert | Beitrag in % |
|-------------------|----|----------|----------|--------|--------|--------------|
| Modell | 9 | 0,00178 | 0,000198 | 4,35 | 0,016 | Signifikant |
| A - Spurabstand | 1 | 0,000019 | 0,000019 | 0,41 | 0,537 | 0,9 % |
| B - Scangeschw. | 1 | 0,000068 | 0,000068 | 1,5 | 0,249 | 3,4 % |
| C - Laserleistung | 1 | 0,000586 | 0,000586 | 12,9 | 0,005 | 28,9 % |
| A ² | 1 | 0,000229 | 0,000229 | 5,04 | 0,049 | 11,3 % |
| B ² | 1 | 0,000194 | 0,000194 | 4,28 | 0,065 | 9,6 % |
| C ² | 1 | 0,00049 | 0,00049 | 10,78 | 0,008 | 24,1 % |
| AB | 1 | 0,000154 | 0,000154 | 3,39 | 0,095 | 7,6 % |
| AC | 1 | 0,00006 | 0,00006 | 1,32 | 0,278 | 3,0 % |
| BC | 1 | 0,000231 | 0,000231 | 5,08 | 0,048 | 11,4 % |
| Fehler | 10 | 0,000454 | 0,000045 | | | |
| Total | 19 | 0,002235 | | | | |

$R^2 = 79,66 \%$; Kor $R^2 = 61,36 \%$

Die ANOVA-Ergebnisse verdeutlichen, welche Faktoren die Dichte beeinflussen. Ein F-Wert von 4,35 und ein p-Wert von 0,016 bestätigen die statistische Signifikanz des Gesamtmodells. Die Beiträge der einzelnen Faktoren zeigen, dass die Laserleistung und ihr quadratischer Effekt den größten Einfluss auf die Dichte haben, mit Beiträgen von 28,9 % bzw. 24,1 %. Die Modellanpassung wird durch einen R^2 -Wert von 79,66 % und einen korrigierten R^2 -Wert von 61,36 % dargestellt, was auf eine robuste Modellanpassung und eine hohe Aussagekraft hinweist.

4.2.2 Rauheit

Abb. 14 zeigt die Auswertung der senkrecht zur Schichtorientierung gemessenen Mittenrauheitswerte ($R_{a, \text{senkrecht}}$) in einem 2D-Konturdiagramm. Die Diagramme verdeutlichen, dass die Scangeschwindigkeit und Laserleistung die Oberflächenrauheit signifikant beeinflussen. Niedrigere Scangeschwindigkeiten (400 mm/s - 1000 mm/s) führen tendenziell zu glatteren Oberflächen, während die höchsten Rauheitswerte bei hohen Scangeschwindigkeiten (1500 mm/s) und niedrigen Laserleistungen (200 W) auftreten.

Der niedrigste Rauheitswert $R_{a, \text{senkrecht}}$ lag bei $2,0 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, gemessen bei 350 W Laserleistung und 700 mm/s Scangeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu wurde der höchste Rauheitswert $R_{a, \text{senkrecht}}$ mit $8,6 \mu\text{m} \pm 0,9 \mu\text{m}$ bei 200 W Laserleistung und 1000 mm/s Scangeschwindigkeit gemessen. Weitere Messergebnisse finden sich im Anhang (s. Tab. A3).

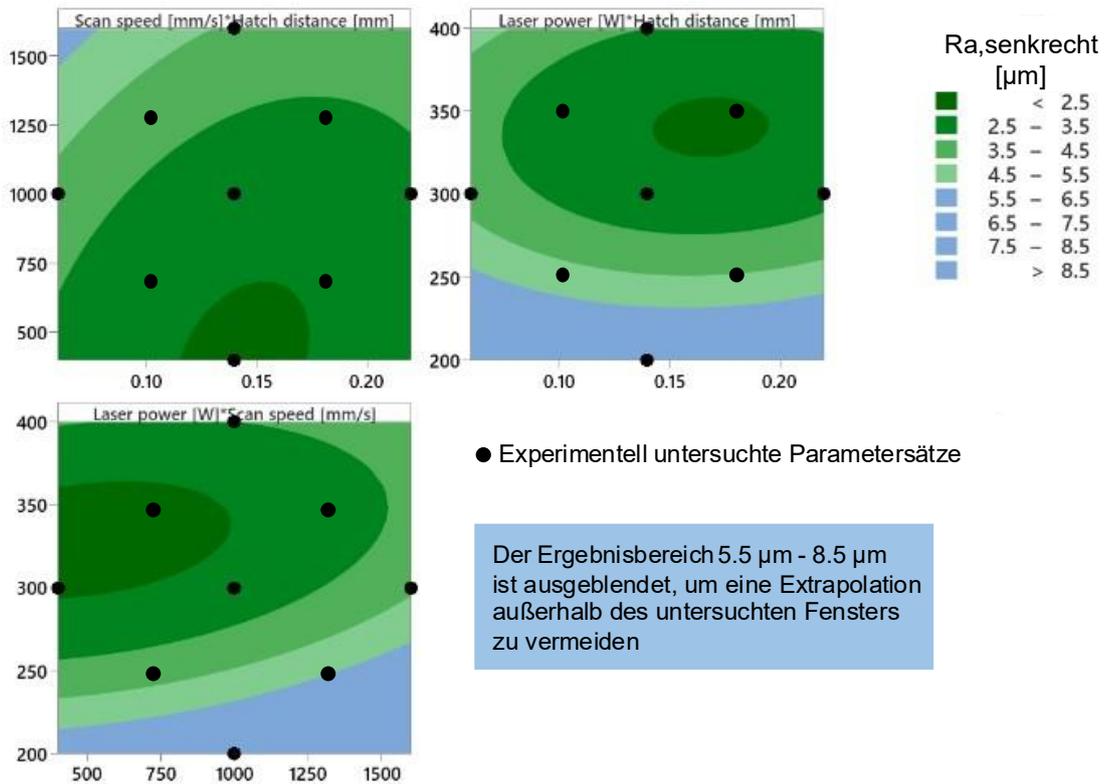


Abb. 14: Konturdiagramm der Auswertung von Rauheitsmessungen $R_{a, \text{senkrecht}}$

Abb. 15 zeigt die Auswertung aller untersuchten Rauheitskennwerte in einem überlagerten Konturdiagramm. Die untersuchten Parameter sind $R_{a, \text{parallel}}$, $R_{a, \text{senkrecht}}$, $R_{z, \text{parallel}}$ und $R_{z, \text{senkrecht}}$ (parallel/senkrecht zur Schichtorientierung).

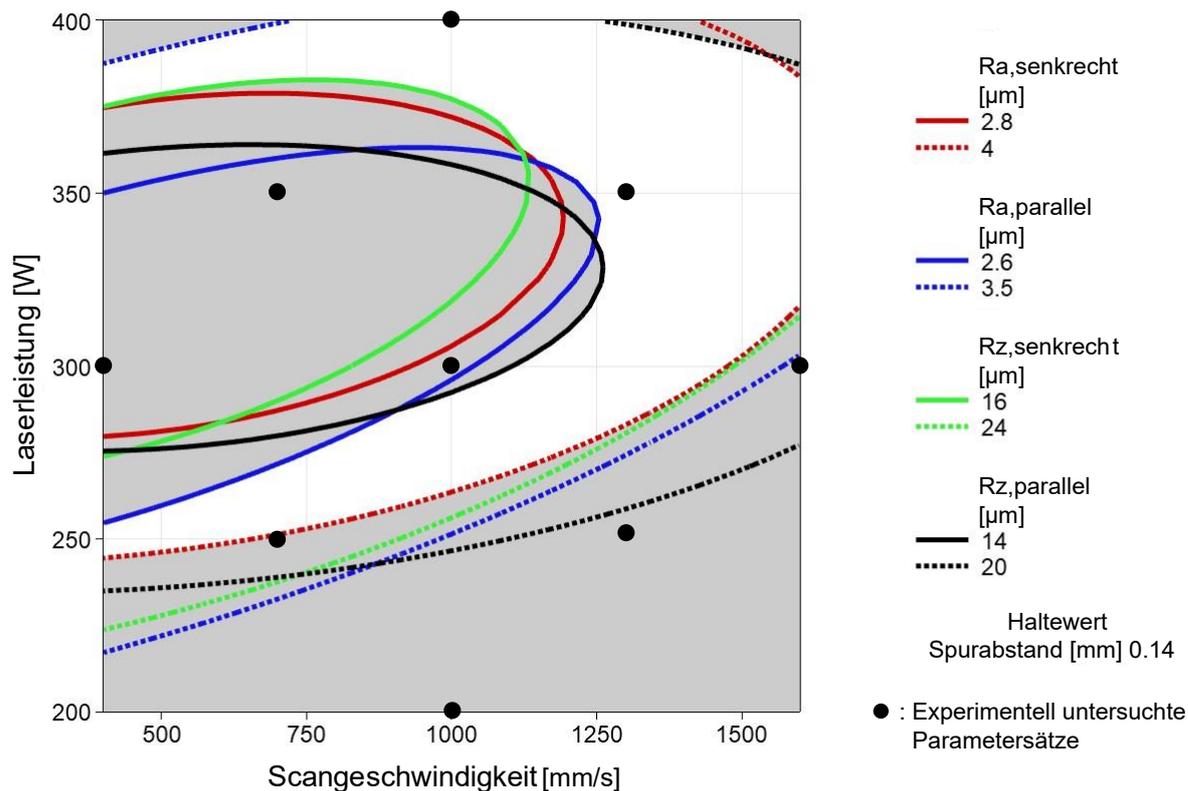


Abb. 15: Statistische Auswertung der Rauheitsmessungen in Form eines überlagerten Konturplots

Es ist ein konsistentes Muster zur Erzielung sowohl hoher als auch niedriger Rauheitswerte in Abhängigkeit von den Zielgrößen erkennbar. Niedrige Rauheitswerte werden mit einer Laserleistung von 250 W bis 350 W und Scangeschwindigkeiten von 400 mm/s bis 1000 mm/s erreicht. Höhere Rauheitswerte werden hingegen typischerweise bei niedrigeren Laserleistungen von 200 W bis 225 W beobachtet. Dies verdeutlicht die wesentliche Rolle der Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei der Bestimmung der Oberflächenrauheit.

Tab. 11 zeigt die ANOVA-Ergebnisse für $R_{a, \text{senkrecht}}$. Ähnlich wie bei der Dichte wird die Oberflächenrauheit in erheblichem Maße von der Laserleistung beeinflusst (49,1 %). Ein p-Wert von 0,007 beweist die Signifikanz des Modells. Zusätzlich zeigt sich ein signifikanter quadratischer Effekt der Laserleistung, der 31,9 % zur Variation der Oberflächenrauheit beiträgt.

Tab. 11: ANOVA-Ergebnisse für $R_{a, \text{senkrecht}}$

| Faktor | DF | Kor SS | Kor MS | F-Wert | p-Wert | Beitrag in % |
|-------------------|----|---------|---------|--------|--------|--------------|
| Modell | 9 | 32,3925 | 3,5992 | 5,35 | 0,007 | Signifikant |
| A - Spurbstand | 1 | 0,8888 | 0,8888 | 1,32 | 0,277 | 2,6 % |
| B - Scangeschw. | 1 | 3,899 | 3,899 | 5,8 | 0,037 | 11,6 % |
| C - Laserleistung | 1 | 16,4962 | 16,4962 | 24,53 | 0,001 | 49,1 % |
| A ² | 1 | 0,9633 | 0,9633 | 1,43 | 0,259 | 2,9 % |
| B ² | 1 | 0,3635 | 0,3635 | 0,54 | 0,479 | 1,1 % |
| C ² | 1 | 10,7146 | 10,7146 | 15,94 | 0,003 | 31,9 % |
| AB | 1 | 0,078 | 0,078 | 0,12 | 0,74 | 0,2 % |
| AC | 1 | 0,0232 | 0,0232 | 0,03 | 0,856 | 0,1 % |
| BC | 1 | 0,1868 | 0,1868 | 0,28 | 0,61 | 0,6 % |
| Fehler | 10 | 6,7238 | 0,6724 | | | |
| Total | 19 | 39,1163 | | | | |

$R^2 = 82,81 \%$; Kor $R^2 = 67,34 \%$

4.2.3 Härte

Für die Auswertung der Härtemessungen wurden sowohl der Einfluss der Prozessparameter als auch der Einfluss der Wärmebehandlung (NWB = keine Bauplattformheizung & kein Spannungsarmglühen; WB = 200 °C Bauplattformheizung + Spannungsarmglühen) untersucht. Die erweiterte Messunsicherheit U ($k = 2$) der Härtemessungen beträgt 6,5 HV 1.

Abb. 16 zeigt die Härtewerte im NWB-Zustand als 2D-Konturplot. Die Scangeschwindigkeit erweist sich als der signifikanteste Einflussfaktor auf die Härte, wobei höhere Geschwindigkeiten tendenziell zu höheren Härtewerten führen. Proben, die mit Scangeschwindigkeiten von 1300 mm/s bis 1500 mm/s hergestellt wurden, wiesen eine höhere Härte auf als solche, die mit 400 mm/s bis 700 mm/s produziert wurden. Die maximale Härte in dieser Studie beträgt 145,6 HV 1 bei einer Scangeschwindigkeit von 1300 mm/s und 350 W Laserleistung, während die niedrigste Härte (121,1 HV 1) bei einer Scangeschwindigkeit von 400 mm/s und 300 W Laserleistung gemessen wurde.

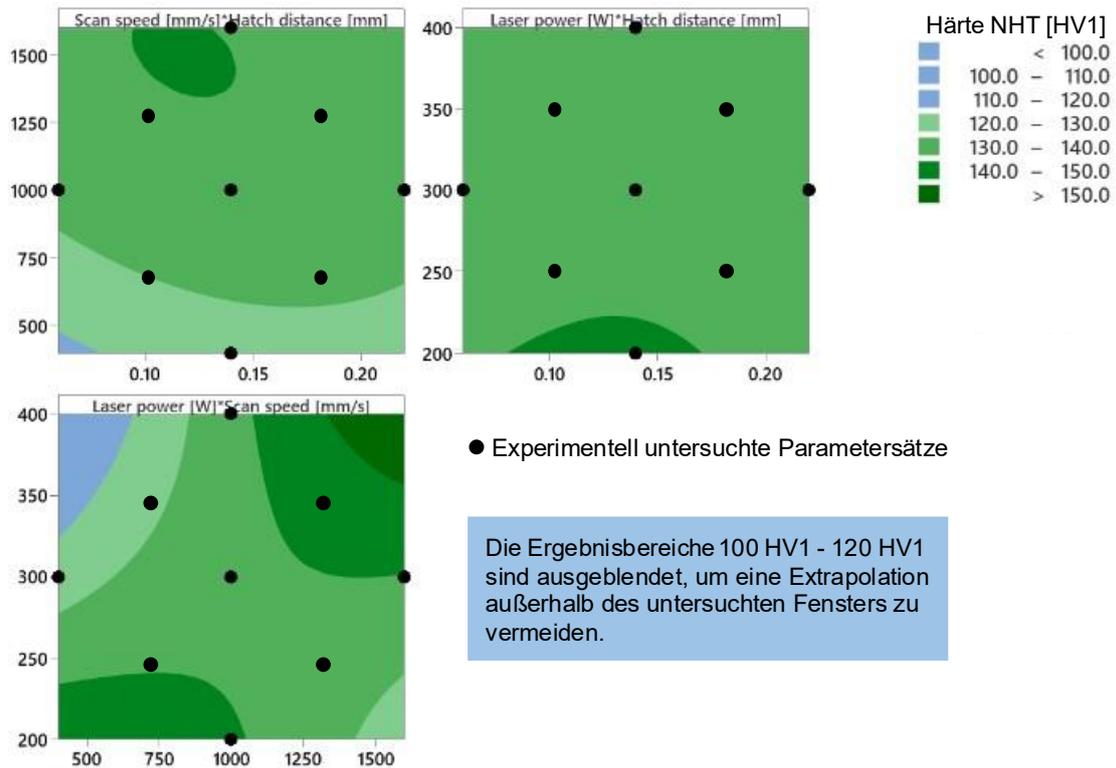


Abb. 16: Konturdiagramm der Härtemessungen im NWB-Zustand

Das überlagerte Konturdiagramm in Abb. 17 zeigt eine Auswertung der Härtewerte für den WB- und NWB-Zustand. Es ist zu erkennen, dass die höchsten Härtewerte, unabhängig vom Wärmebehandlungszustand, durchgehend bei hohen Scangeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen erreicht werden. Umgekehrt werden niedrigere Härtewerte typischerweise bei hohen Laserleistungen und niedrigen Scangeschwindigkeiten beobachtet. Die WB-Proben haben im Durchschnitt um 16 HV 1 niedrigere Härtewerte als die NWB-Proben, unabhängig von den verwendeten Prozessparametern (s. Tab. A4). Dies deutet darauf hin, dass die Wärmebehandlung einen signifikanten Einfluss auf die Härte hat und die Mikrostruktur beeinflusst.

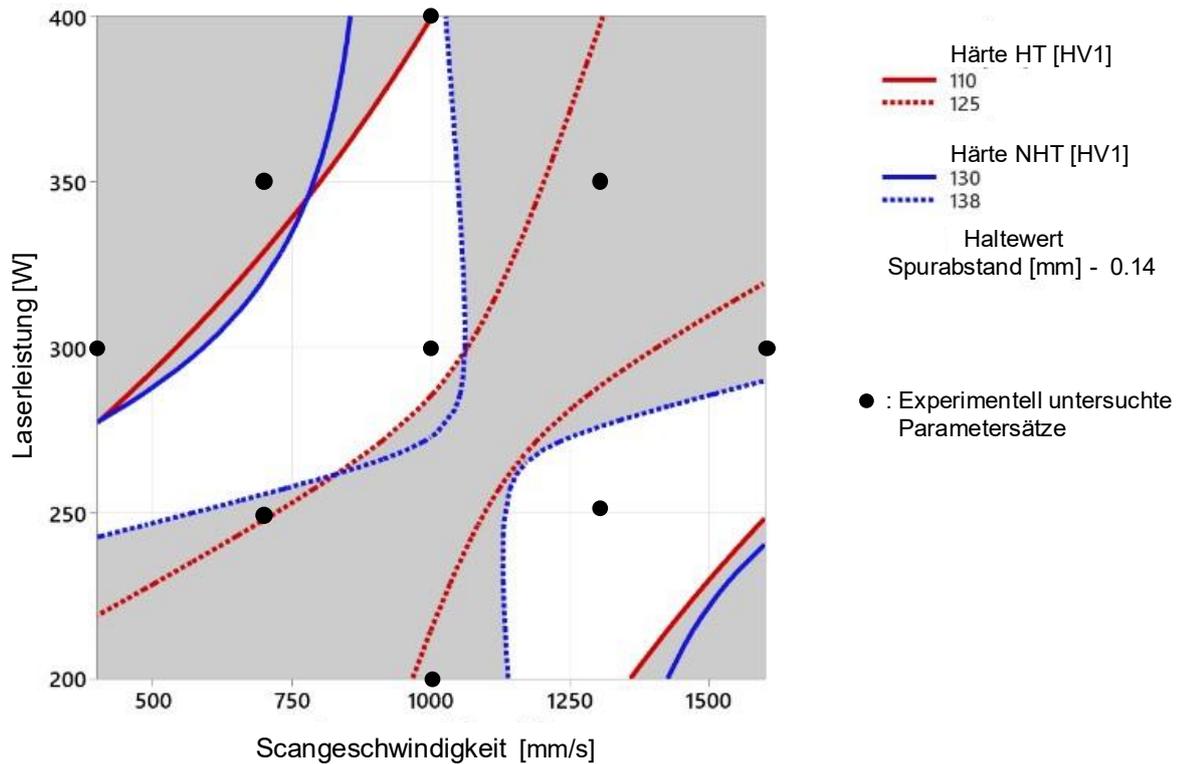


Abb. 17: Auswertung der Härtemessungen für den WB- und NWB-Zustand als überlagertes Konturdiagramm

Die ANOVA-Ergebnisse für die Härteprüfung im NWB-Zustand sind in Tab. 12 dargestellt. Die Signifikanz des Modells wird durch einen p-Wert von 0,007 bestätigt. Die Scangeschwindigkeit hat mit einem Beitrag von 43,4 % den größten Einfluss auf die Härte. Darüber hinaus zeigt die zweifaktorielle Interaktion von Scangeschwindigkeit und Laserleistung (BC) einen signifikanten Einfluss auf die Härtewerte (38,1 %).

Tab. 12: ANOVA-Ergebnisse für die Härte im NWB-Zustand

| Faktor | DF | Kor SS | Kor MS | F-Wert | p-Wert | Beitrag in % |
|-------------------|----|---------|---------|--------|--------|--------------|
| Modell | 9 | 501,984 | 55,776 | 5,45 | 0,007 | Signifikant |
| A - Spurabstand | 1 | 1,322 | 1,322 | 0,13 | 0,727 | 0,3 % |
| B - Scangeschw. | 1 | 216,534 | 216,534 | 21,15 | 0,001 | 43,4 % |
| C - Laserleistung | 1 | 18,542 | 18,542 | 1,81 | 0,208 | 3,7 % |
| A ² | 1 | 23,416 | 23,416 | 2,29 | 0,161 | 4,7 % |
| B ² | 1 | 37,77 | 37,77 | 3,69 | 0,084 | 7,6 % |
| C ² | 1 | 4,269 | 4,269 | 0,42 | 0,533 | 0,9 % |
| AB | 1 | 5,125 | 5,125 | 0,5 | 0,495 | 1,0 % |
| AC | 1 | 1,943 | 1,943 | 0,19 | 0,672 | 0,4 % |
| BC | 1 | 190,398 | 190,398 | 18,6 | 0,002 | 38,1 % |
| Fehler | 10 | 102,37 | 10,237 | | | |
| Total | 19 | 604,354 | | | | |

$R^2 = 83,06 \%$; Kor $R^2 = 67,82 \%$

4.2.4 Zugprüfung: Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Bei der Analyse der Zugfestigkeit und Bruchdehnung werden neben den Wärmebehandlungszuständen (WB, NWB) und den Prozessparametern auch die Bauteilorientierung als Einflussfaktor berücksichtigt. Die erweiterte Messunsicherheit U ($k = 2$) für Zugfestigkeit und Bruchdehnung beträgt $2 \cdot 10^{-2}$.

Die Konturdiagramme in Abb. 18 zeigen die Beziehung zwischen der Zugfestigkeit und den Prozessparametern für den NWB-Zustand. Niedrigere Zugfestigkeitswerte treten typischerweise bei hohen Scangeschwindigkeiten (1300 mm/s - 1600 mm/s) und niedrigen Laserleistungen (200 W - 250 W) auf, während höhere Zugfestigkeitswerte bei höheren Laserleistungen (350 W - 400 W) und variablen Scangeschwindigkeiten (1000 mm/s - 1600 mm/s) erzielt werden.

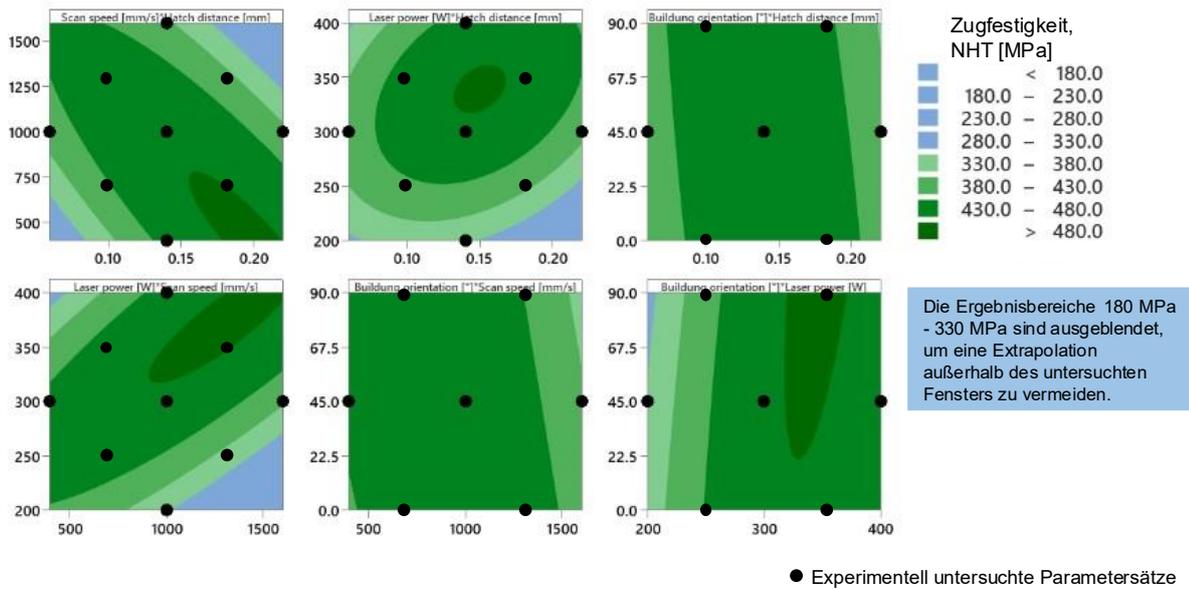


Abb. 18: Konturdiagramm der Zugfestigkeitsmessungen im NWB-Zustand

Die in Abb. 19 überlagerten Konturplots veranschaulichen zudem die Auswirkungen der Wärmebehandlungszustände auf die Zugfestigkeit. Die höchsten gemessenen Zugfestigkeiten betragen 484 MPa für den NWB-Zustand und 321 MPa für den WB-Zustand, während die maximalen Bruchdehnungswerte 8 % (NWB) und 16,3 % (WB) erreichen (s. Tab. A5). Konsistent hohe Werte für Zugfestigkeit und Bruchdehnung wurden bei einer Laserleistung von 300 W bis 400 W und einer Scangeschwindigkeit von 750 mm/s bis 1250 mm/s erzielt, während niedrigere Laserleistungen (200 W bis 250 W) zu geringeren Werten führten.

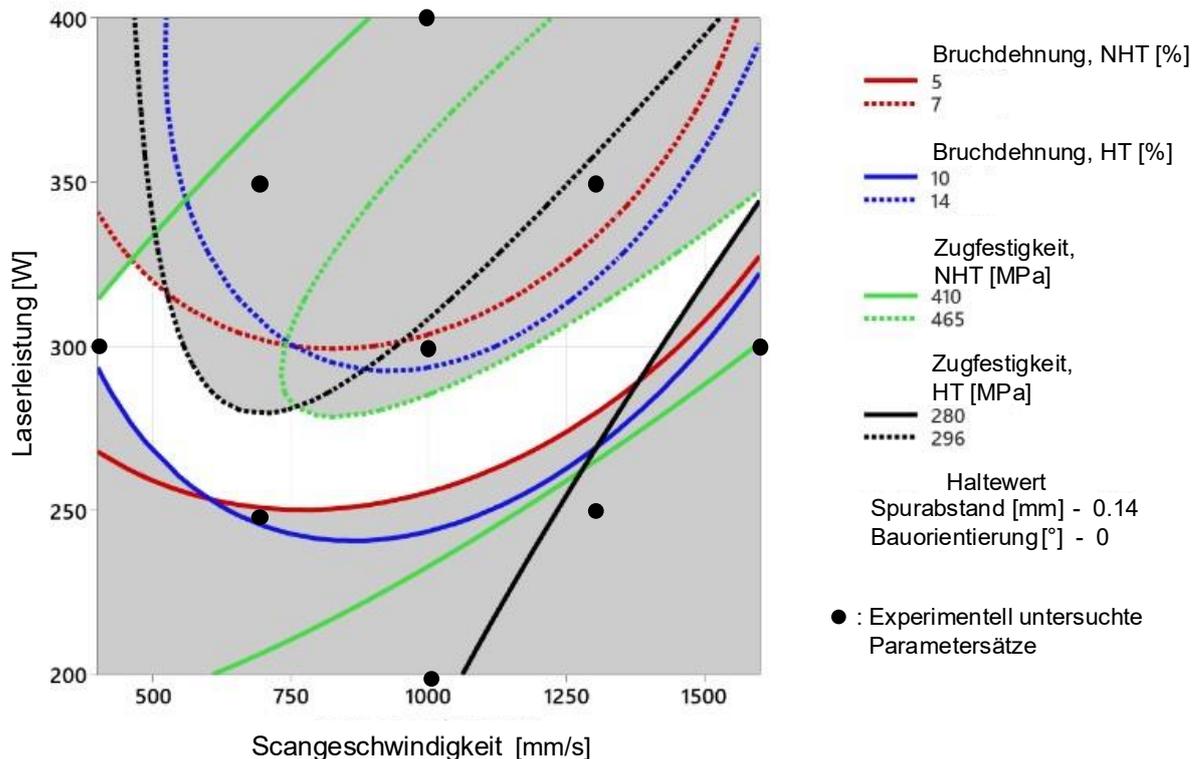


Abb. 19: Statistische Auswertung der experimentellen Zugfestigkeits- und Bruchdehnungsmessungen als überlagerte Konturplots

Die ANOVA-Ergebnisse für die Zugfestigkeit im NWB-Zustand sind in Tab. 13 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Laserleistung sowie ihr quadratischer Effekt einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit haben. Zusätzlich beeinflussen der quadratische Effekt des Spurabstands (A^2) sowie die zweifaktorielle Interaktion zwischen Scangeschwindigkeit und Laserleistung (BC) besonders stark die Zugfestigkeit. Die Bauorientierung (D) hat hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit.

Im Gegensatz dazu hat die Bauorientierung (D) jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Bruchdehnung (s. Tab. 14). Die 0° -Zugproben erreichen die höchsten Bruchdehnungswerte, während die 90° -Zugproben die niedrigsten Werte aufweisen (vgl. Anisotropie, Abb. 12).

Tab. 13: ANOVA-Ergebnisse für die Zugfestigkeit im NWB-Zustand

| Faktor | DF | Kor SS | Kor MS | F-Wert | p-Wert | Beitrag in % |
|---------------------|----|---------|---------|--------|--------|--------------|
| Modell | 14 | 76400,0 | 5457,1 | 5,49 | 0,002 | Signifikant |
| A - Spurabstand | 1 | 66,7 | 66,7 | 0,07 | 0,8 | 0,1 % |
| B - Scangeschw. | 1 | 4648,2 | 4648,2 | 4,68 | 0,05 | 5,7 % |
| C - Laserleistung | 1 | 19153,5 | 19153,5 | 19,27 | 0,001 | 23,6 % |
| D - Bauorientierung | 1 | 64 | 64 | 0,06 | 0,804 | 0,1 % |
| A ² | 1 | 8550,4 | 8550,4 | 8,6 | 0,012 | 10,5 % |
| B ² | 1 | 4873,5 | 4873,5 | 4,9 | 0,045 | 6,0 % |
| C ² | 1 | 9720,4 | 9720,4 | 9,78 | 0,008 | 12,0 % |
| D ² | 1 | 21,1 | 21,1 | 0,02 | 0,886 | 0,0 % |
| AB | 1 | 13340,3 | 13340,3 | 13,42 | 0,003 | 16,4 % |
| AC | 1 | 3136 | 3136 | 3,16 | 0,099 | 3,9 % |
| AD | 1 | 812,2 | 812,2 | 0,82 | 0,382 | 1,0 % |
| BC | 1 | 13924 | 13924 | 14,01 | 0,002 | 17,2 % |
| BD | 1 | 1722,3 | 1722,3 | 1,73 | 0,211 | 2,1 % |
| CD | 1 | 1156 | 1156 | 1,16 | 0,3 | 1,4 % |
| Fehler | 13 | 12918,7 | 993,7 | | | |
| Total | 27 | 89318,7 | | | | |

$R^2 = 85,54 \%$; Kor $R^2 = 69,96 \%$

Abb. 20 bietet einen Überblick über die makroskopischen und mikroskopischen Bruchflächeneigenschaften der verschiedenen Wärmebehandlungszustände und zeigt die damit verbundenen Bruchmechanismen auf.

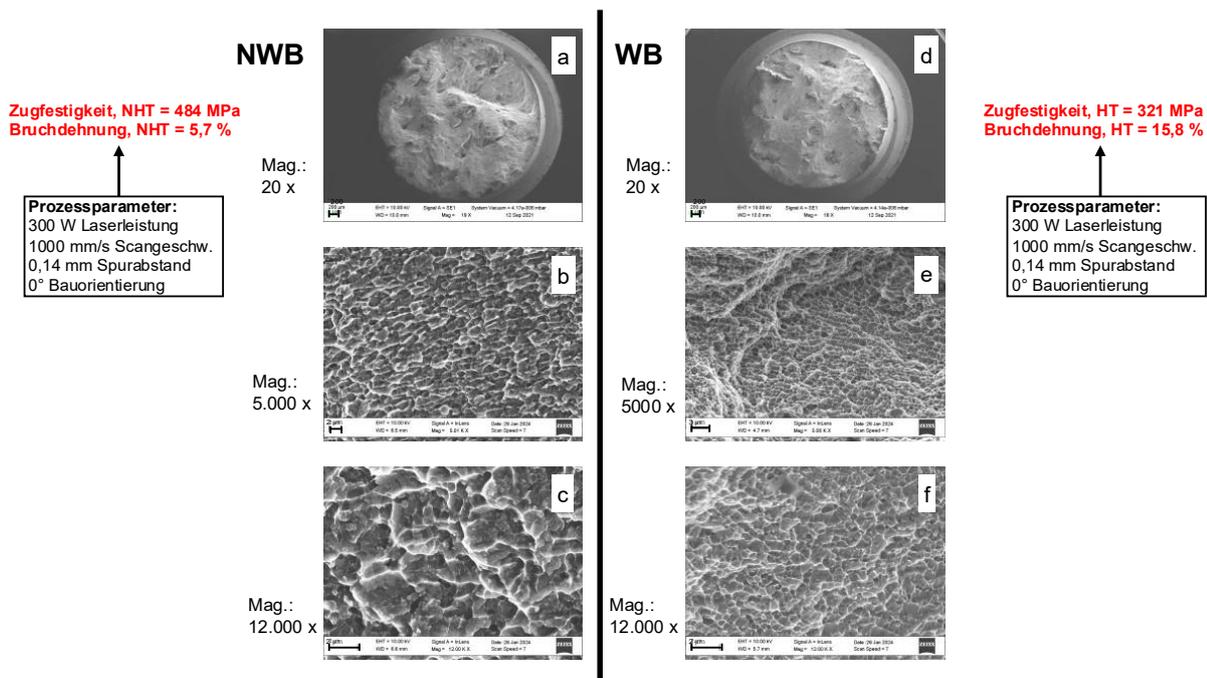


Abb. 20: REM-Bruchbilder von Proben im NWB- (a, b, c) und WB-Zustand (d, e, f)

Im makroskopischen Vergleich (20x Vergr.) weisen die NWB- und WB-Zustände ähnliche Bruchflächen auf, wobei der WB-Zustand zu einer homogeneren Bruchfläche führt (vgl. Abb. 20(a) und Abb. 20(d)). Auf mikroskopischer Ebene zeigt der NWB-Zustand größere Grübchensegmente (s. Abb. 20(b)-(c)), die auf eine höhere Festigkeit und geringere Duktilität hinweisen [58,185,220–222]. Im Gegensatz dazu weist der WB-Zustand kleinere und feiner entwickelte Grübchen auf (s. Abb. 20(e)-(f)), was auf duktilere Brucheigenschaften hindeutet [58,185,220–222].

4.3 ANOVA-Ergebnisse

In Tab. 14 sind die korrigierten R^2 -Werte und p-Werte für die untersuchten Zielvariablen sowie deren quadratische Terme (A^2 , B^2 , C^2 , D^2) und Interaktionsterme (AB, AC, AD, BC, BD, CD) zusammengefasst. Höhere korrigierte R^2 -Werte deuten auf eine stärkere Erklärungskraft des Modells hin. Die in dieser Studie berechneten korrigierten R^2 -Werte liegen zwischen 60 % und 70 %, was zeigt, dass die Modelle eine solide Erklärung für die Variabilität der Materialeigenschaften bieten.

Besonders die Laserleistung (C) und ihr quadratischer Term (C^2) erwiesen sich als signifikante Faktoren für alle untersuchten Zielvariablen ($p = 0,0 - 0,008$), mit Ausnahme der Härte im NWB-Zustand. Dies unterstreicht die Bedeutung der Laserleistung als zentraler Einflussfaktor in der Prozessparameteroptimierung.

Tab. 14: Zusammenfassung der kor. R²-Werte und der signifikanten Effekte (p = 0,05)

| Kontrollfaktor | Dichte | R _{a,parallel} | R _{z,parallel} | Härte, NWB | Zugfestigkeit, NWB | Bruchdehnung, NWB |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------|-------------------|
| Kor R ² [%] | 61,36 | 67,34 | 70,07 | 67,82 | 69,96 | 80,20 |
| A – Spurabstand | - | - | - | - | - | - |
| B – Scangeschwindigkeit | - | p = 0,026 | - | p = 0,001 | - | p = 0,001 |
| C – Laserleistung | p = 0,005 | p = 0,002 | p = 0,002 | - | p = 0,001 | p = 0,0 |
| D – Bauorientierung | | | | | - | p = 0,038 |
| A ² | p = 0,049 | - | - | - | p = 0,012 | p = 0,001 |
| B ² | - | - | - | - | p = 0,045 | p = 0,029 |
| C ² | p = 0,008 | p = 0,002 | p = 0,0 | - | p = 0,008 | - |
| D ² | | | | | - | p = 0,024 |
| AB | - | - | - | - | p = 0,003 | p = 0,011 |
| AC | - | - | - | - | - | - |
| AD | | | | | - | - |
| BC | p = 0,048 | - | - | p = 0,002 | p = 0,002 | - |
| BD | | | | | - | - |
| CD | | | | | - | - |

4.4 Optimierung der Prozessparameter / Zielgrößenoptimierung

Durch die statistische Zielgrößenoptimierung lassen sich individuelle Anforderungen für die Zielgrößen festlegen, was eine maßgeschneiderte Herstellung von Bauteilen mit spezifischen Materialeigenschaften ermöglicht. Die gleichzeitige Festlegung von Anforderungen für alle Zielgrößen erlaubt zudem eine Multi-Response-Optimierung. Die optimierten Werte werden mit dem in der Software *Minitab* verfügbaren Response Optimizer Tool bestimmt, bei dem für jede Zielgröße ein spezifisches Ziel anhand definierter Grenzwerte festgelegt wird. Ziel ist es, eine maximale Dichte sowie gleichzeitig eine hohe Härte, Zugfestigkeit und Bruchdehnung zu erreichen, während die Rauheit der optimierten Probe möglichst niedrig sein sollte (s. Abb. 21).

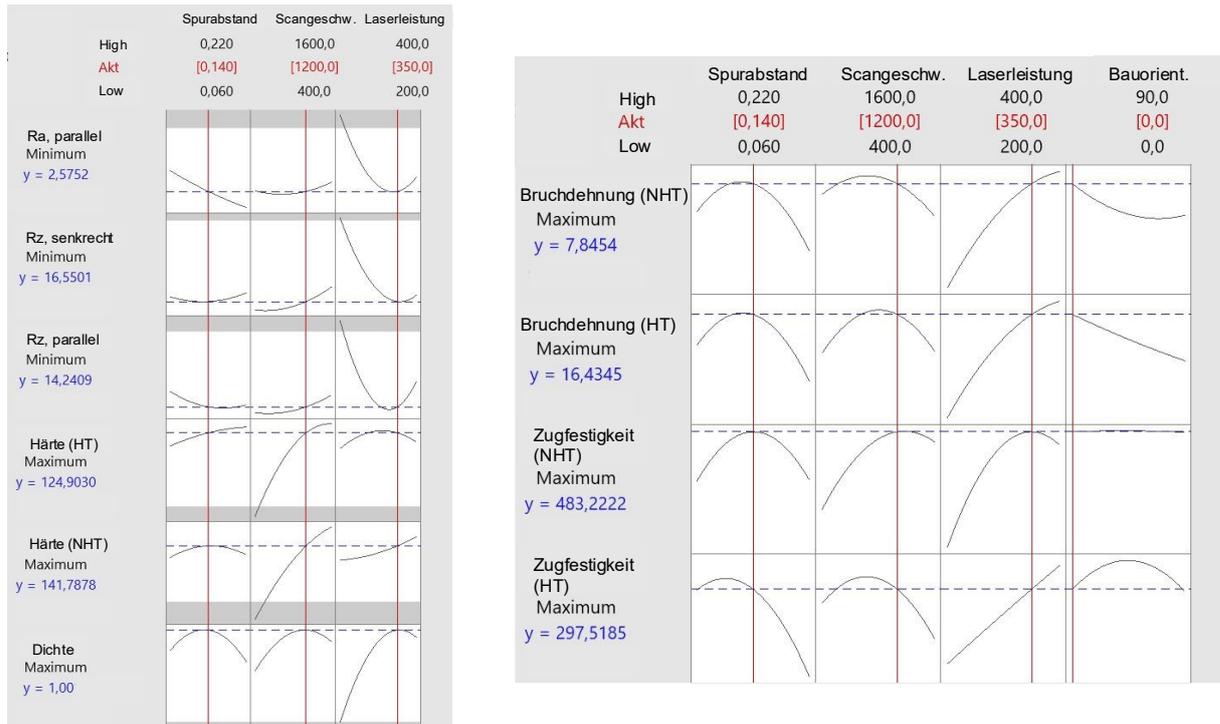


Abb. 21: Minitab-Zielgrößenoptimierung

Basierend auf der statistischen Parameteroptimierung wurden fünf zusätzliche Würfel- und Zugproben gefertigt und analysiert. Tab. 15 zeigt die optimierten Materialeigenschaften, einschließlich der vorhergesagten und gemessenen Werte, was einen Vergleich zwischen dem optimierten Design und den tatsächlichen Ergebnissen ermöglicht.

Tab. 15: Optimierung der Prozessparameter und Materialeigenschaften mittels Zielgrößenoptimierung

| Zielgröße / Parameter | Ziel | Dichte | Härte | Rauheit | Festigkeit & Dehnung | Alle Eigenschaften gleichzeitig |
|--|------|--------------|-------------|---------|----------------------|---------------------------------|
| Spurabstand [mm] | | 0,135 | 0,13 | 0,18 | 0,14 | 0,14 |
| Scangeschwindigkeit [mm/s] | | 1225 | 1600 | 470 | 1200 | 1200 |
| Laserleistung [W] | | 350 | 400 | 320 | 350 | 350 |
| Bauorientierung [°] | | - | - | - | 0 | 0 |
| Geschätzte Dichte [%] | | 100 | | | | 100 |
| Gemessene Dichte [%] | Max. | 99,96 ± 0,03 | | | | 99,94 ± 0,03 |
| Geschätzte Härte NWB [HV 1] | | | 158,8 | | | 141,7 |
| Gemessene Härte NWB [HV 1] | Max. | | 154,6 ± 1,1 | | | 138 ± 1,2 |
| Geschätzte Härte WB [HV 1] | | | 132,3 | | | 124,9 |
| Gemessene Härte WB [HV 1] | Max. | | 130,5 ± 1,4 | | | 125,8 ± 1,4 |
| Geschätzte Rauheit $R_{a,parallel}$ [µm] | | | | 1,9 | | 2,5 |
| Gemessene Rauheit $R_{a,parallel}$ [µm] | Min. | | | 2 ± 0,3 | | 2,6 ± 0,3 |
| Geschätzte Zugfestigk. NWB [MPa] | | | | | 483,2 | 483,2 |
| Gemessene Zugfestigk. NWB [MPa] | Max. | | | | 476 ± 8,7 | 476 ± 8,7 |
| Geschätzte Dehnung NWB [%] | | | | | 7,8 | 7,8 |
| Gemessene Dehnung NWB [%] | Max. | | | | 7,6 ± 0,4 | 7,6 ± 0,4 |
| Übereinstimmung Schätzung / Messung [%] | | 99,9 | 97,3 / 98,6 | 95 | 98,5 / 97,4 | |

Die Ergebnisse zeigen, dass diese Methode eine effektive Optimierung der Materialeigenschaften ermöglicht. Beispielsweise lag die vorhergesagte Dichte bei 100 %, während die gemessene Dichte 99,96 % ± 0,03 % betrug. Die vorhergesagten und gemessenen Härtewerte lagen ebenfalls eng beieinander, was auf einen wirkungsvollen Optimierungsprozess hinweist. Ähnlich nahe lagen die vorhergesagten und gemessenen Werte für Rauheit, Zugfestigkeit und Dehnung. Diese Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit statistischer Methoden und der Prozessparameteroptimierung für die Fertigung spezifischer Materialeigenschaften. Im Vergleich zum ersten Durchlauf aus dem DoE (Hauptversuch) konnten auf diese Weise neue Maximalwerte für Dichte, Härte, Rauheit und Bruchdehnung erreicht werden. Die im Rahmen dieser

Zielgrößenoptimierung festgelegten Anforderungen entsprechen den initial definierten Zielwerten, die für eine ausreichend hohe Materialqualität der Bauteile maßgeblich sind (s. Kap. 4.1.2). Die Ergebnisse der Zielgrößenoptimierung zeigen, dass die folgenden Anforderungen erfüllt wurden:

Dichte: Die optimierte Dichte erreichte $> 99,9 \%$, was die Anforderung von $\geq 99 \%$ übertrifft.

Oberflächenrauheit: Die gemessenen Rauheitswerte lagen bei minimal $2,0 \mu\text{m } R_a$ und erfüllten die Anforderung von $R_a < 15 \mu\text{m}$.

Härte: Mit Werten von $154,6 \text{ HV } 1$ (NWB-Zustand) und $130,5 \text{ HV } 1$ (WB-Zustand) lag die Härte über dem geforderten Mindestwert von 110 HV .

Zugfestigkeit (R_m): Die optimierte Zugfestigkeit erreichte 476 MPa und übertraf damit die Anforderung von $\geq 350 \text{ MPa}$.

Bruchdehnung: Mit einer optimierten Bruchdehnung von $7,6 \%$ wurde die Mindestanforderung von $\geq 4 \%$ erfüllt.

4.5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse dieser Studie differenziert bewertet und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

4.5.1 Dichte

In dieser Studie wurde eine maximale Dichte von $99,96 \%$ bei einem Spurbstand von $0,14 \text{ mm}$, einer Scangeschwindigkeit von 1225 mm/s und einer Laserleistung von 350 W erreicht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Pan et al. [137] und Shah et al. [78], die ebenfalls hohe Laserleistungen ($330 \text{ W} - 370 \text{ W}$) und Scangeschwindigkeiten ($1200 \text{ mm/s} - 1450 \text{ mm/s}$) verwendeten und Dichtewerte zwischen $99,63 \%$ und $99,92 \%$ erreichten. Die hier erzielte Dichte übertrifft jedoch die meisten Ergebnisse aus früheren Studien, was die Bedeutung eines erweiterten Parameterfelds und einer optimierten Parameterauswahl unterstreicht.

4.5.2 Rauheit

Die Rauheitswerte, die in dieser Studie beobachtet wurden, variierten stark in Abhängigkeit von den Prozessparametern. Die niedrigsten Rauheitswerte wurden bei niedrigen Scangeschwindigkeiten (470 mm/s) und höheren Laserleistungen (320 W) erzielt. Diese Trends stimmen gut mit den Beobachtungen von Boschetto et al. [223] überein, die eine Rauheit R_a (90° , senkrecht) von $2,69 \mu\text{m}$ bei 360 W und 600 mm/s ermittelten. Höhere Rauheitswerte R_a (90° , senkrecht) von $12 \mu\text{m}$ bis $18 \mu\text{m}$ wurden dort bei 270 W und einer Scangeschwindigkeit von 1100 mm/s gemessen. In der vorliegenden Studie wurden mit ähnlichen Parametern Rauheitswerte um $4 \mu\text{m}$ erzielt.

Der umfassendere Parametersatz, der in dieser Arbeit untersucht wurde, zeigt eine größere Bandbreite an Ergebnissen und verdeutlicht, dass niedrigere Rauheitswerte auch in einem größeren Parameterfeld erreicht werden können. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die

günstigsten Bedingungen für niedrige Rauheitswerte in einem Laserleistungsbereich von 250 W bis 350 W und bei Scangeschwindigkeiten zwischen 400 mm/s und 1000 mm/s liegen. Zusätzlich beinhaltet die VDI-Richtlinie 3405 - Blatt 2.1 einen Ringvergleich zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg, der von sechs verschiedenen Teilnehmern durchgeführt wurde. In diesen Tests lag die niedrigste gemessene mittlere Rautiefe R_z bei 36 μm . Im Vergleich dazu waren alle in dieser Studie gemessenen mittleren Rautiefen R_z , sowohl parallel als auch senkrecht zur Baurichtung, kleiner als 36 μm [211].

4.5.3 Härte

Die Härteergebnisse in dieser Studie zeigen einen erkennbaren Trend zu höheren Härtewerten bei steigender Scangeschwindigkeit (1300 mm/s - 1600 mm/s) und höherer Laserleistung (350 W - 400 W). Umgekehrt wurden niedrigere Härtewerte bei niedrigeren Scangeschwindigkeiten (400 mm/s - 1000 mm/s) und Laserleistungen (200 W) erzielt. Diese Beobachtungen korrelieren mit den Ergebnissen früherer Studien von Yusuf et al. [98] und Manfredi et al. [37], die ebenfalls den Einfluss der Scangeschwindigkeit und Laserleistung auf die Härte bestätigten. Yusuf et al. [98] ermittelten etwa einen Härtewert von 145 HV bei 400 W Laserleistung und 1600 mm/s Scangeschwindigkeit, während in der vorliegenden Studie mit den gleichen Parametern eine ähnliche Härte von 154,6 HV erzielt wurde. Manfredi et al. [37] berichteten von einer Härte von 108 HV bei 195 W Laserleistung und 800 mm/s Scangeschwindigkeit, während in dieser Studie bei vergleichbaren Bedingungen eine Härte von 124 HV erreicht wurde.

Der Härteverlust bei AlSi10Mg-Bauteilen wird auf Gefügeveränderungen zurückgeführt, die sowohl während des PBF/LB-M-Verfahrens als auch durch nachfolgende Wärmebehandlungen auftreten (s. Kap. 2.3.2). Diese Veränderungen sind stärker ausgeprägt, wenn zusätzliche Wärmebehandlungen, wie die Bauplattformheizung und das Spannungsarmglühen, eingesetzt werden, da sie zu einer Vergrößerung der Zellstruktur führen und somit die mechanischen Eigenschaften verringern. Die Bauplattformheizung bei 200 °C bewirkt eine langsamere Erstarrung während des Druckprozesses aufgrund einer reduzierten Abkühlungsrate [24,25,81,88]. Ein ähnliches Phänomen wurde in Studien zu Ti6Al4V-Bauteilen festgestellt, die mittels Directed Energy Deposition (DED, dt. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung) hergestellt wurden. Dort führte eine Homogenisierungswärmebehandlung, die die Mikrostruktur angleichen sollte, trotz vollständiger Rekristallisation zu erhöhter Anisotropie [97]. In beiden Fällen zeigen sich die inhärenten Merkmale des additiven Fertigungsverfahrens (ob PBF/LB-M oder DED) als limitierend, wenn es darum geht, mikrostrukturelle Inhomogenitäten und Anisotropie vollständig zu beseitigen.

Abb. 22 zeigt optische Schlifffbilder im NWB-Zustand (s. Abb. 22(a)) und im WB-Zustand (s. Abb. 22(b)). Im NWB-Zustand ist die Mikrostruktur feinkörnig und homogen, was durch die schnelle Erstarrung während des PBF/LB-M-Prozesses entsteht (s. Abb. 22(a)). Nach der Wärmebehandlung durch Bauplattformheizung bei 200 °C und anschließendem Spannungsarmglühen zeigt sich eine deutliche Veränderung der Mikrostruktur (s. Abb. 22(b)), die auf die langsamere Abkühlung und das daraus resultierende Kornwachstum infolge der reduzierten

thermischen Gradienten zurückgeht. Dies führt zu einer gröberen Kornstruktur, die mit einer Reduktion der Härte einhergeht, während gleichzeitig innere Spannungen abgebaut werden.

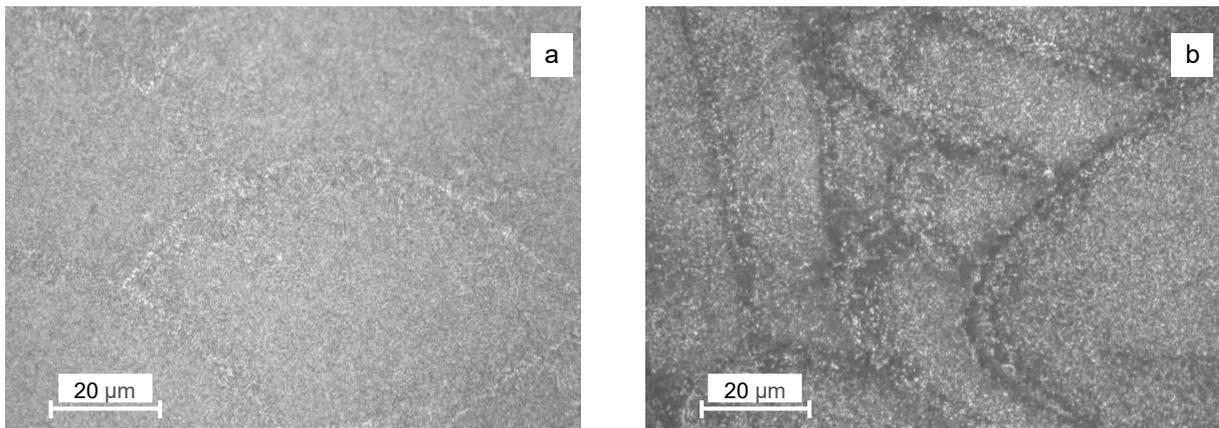


Abb. 22: Optische Schlifffbilder von AlSi10Mg im NWB- (a) und WB-Zustand (b)

Die experimentellen Härteergebnisse aus dieser Studie übertreffen zudem die Ergebnisse des Ringvergleichs nach VDI 3405 Blatt 2.1 [211]. Im Ringvergleich wurde im NWB-Zustand eine maximale Härte von 119 HBW (entspricht ca. 125 HV) erzielt, während die maximale Härte in dieser Studie 145,6 HV beträgt. Nach einer T6-Wärmebehandlung wurde im Ringvergleich eine maximale Härte von 101 HBW (entspricht 106 HV) erreicht, während in dieser Studie für den WB-Zustand eine Härte von bis zu 128,0 HV gemessen wurde.

4.5.4 Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Die Zugfestigkeitsergebnisse dieser Studie zeigen eine klare Abhängigkeit von der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit. Die höchste Zugfestigkeit wurde mit 486 MPa bei einer Laserleistung von 250 W und einer Scangeschwindigkeit von 1300 mm/s erreicht. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen von Wang et al. [224], die ebenfalls feststellten, dass eine Erhöhung der Laserleistung bei konstanter Scangeschwindigkeit zu einer höheren Zugfestigkeit führt.

Die Wärmebehandlung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften der Zugproben erheblich. Nicht wärmebehandelte Proben (NWB) zeigen im Vergleich zu wärmebehandelten Proben (WB) eine höhere Zugfestigkeit, die nach der Wärmebehandlung abnimmt (in dieser Arbeit Abnahme von 484 MPa (NWB) auf 321 MPa (WB)). Gleichzeitig führt die Wärmebehandlung zu einer signifikanten Steigerung der Bruchdehnung von 8 % auf 16,3 %. Diese Effekte lassen sich durch mikrostrukturelle Veränderungen erklären. Die Wärmebehandlung bewirkt eine Homogenisierung des Gefüges und einen Abbau innerer Spannungen, was die Duktilität erhöht. Die Bauplattformheizung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften vor der Wärmebehandlung, indem sie die Abkühlung verlangsamt und eine Vergrößerung des Mikrogefüges verursacht. Proben, die auf einer kalten Bauplattform hergestellt werden, zeigen aufgrund der schnelleren Erstarrung ein feineres Gefüge, was zu einer höheren Zugfestigkeit und geringeren Bruchdehnung führt. Proben, die auf einer beheizten Plattform gefertigt und anschließend einem Spannungsarmglühen unterzogen wurden, weisen dagegen niedrigere Zugfestigkeits-

und höhere Bruchdehnungswerte auf, da der Spannungsabbau die Verformungsfähigkeit steigert.

Ein Vergleich mit der Literatur bestätigt diese Ergebnisse. Han et al. [96] dokumentierten ebenfalls signifikante Änderungen der mechanischen Eigenschaften nach einer Wärmebehandlung. Während Han et al. [96] ein intensiveres Lösungsglühen bei 550 °C für zwei Stunden einsetzten, zeigt die vorliegende Studie, dass auch ein Spannungsarmglühen bei niedrigeren Temperaturen (300 °C für zwei Stunden) zu einer vergleichbaren Erhöhung der Bruchdehnung führt (16,3 % in dieser Arbeit gegenüber 22 % bei Han et al. [96]). Bezüglich der Zugfestigkeit beobachteten Han et al. [96] eine Reduktion von 400 MPa (hier 484 MPa) auf etwa 150 MPa (hier 321 MPa) infolge der Wärmebehandlung.

Weitere Studien, die den Einfluss der Bauplattformheizung auf die Erstarrungsbedingungen und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften untersuchten, zeigen ebenfalls, dass eine schnellere Erstarrung auf kalten Plattformen zu einem feineren Gefüge führt, was höhere Festigkeitswerte und geringere Dehnungswerte zur Folge hat [88,222,225,226]. Diese Übereinstimmungen mit der Literatur zeigen das Potenzial für Energieeinsparungen und Kostensenkungen bei der Nachbearbeitung auf. Ein weniger intensives Spannungsarmglühen bei niedrigeren Temperaturen kann ebenfalls eine signifikante Zunahme der Duktilität bewirken, was die Effizienz der Nachbehandlung steigern könnte, ohne erhebliche Einbußen bei der mechanischen Festigkeit hinnehmen zu müssen.

Die Erkenntnisse von Thijs et al. [82] und Trevisan et al. [25] unterstreichen die Bedeutung der Steuerung der Abkühlungsraten während der Erstarrung. Durch Anpassungen von Laserleistung und Scangeschwindigkeit kann gezielt das Mikrogefüge beeinflusst werden, was letztlich die Zugeigenschaften der Bauteile beeinflusst. Es wurde festgestellt, dass Bauteile, die mit höherer Laserleistung und langsamerer Scangeschwindigkeit hergestellt wurden, eine höhere Zugfestigkeit aufweisen.

Darüber hinaus stimmen die Ergebnisse der Zugversuche gut mit den Ergebnissen des Ringversuchs gemäß VDI 3405 Blatt 2.1 [211] überein. Während im Ringversuch 270 Zugproben von sechs verschiedenen Teilnehmern geprüft wurden, umfasste diese Studie 56 Zugproben. Beide Studien ermittelten eine maximale Zugfestigkeit von etwa 480 MPa für NWB-Proben und 320 MPa für WB-Proben. Auch die Bruchdehnung ist in beiden Studien vergleichbar und erreicht ein Maximum von 7 % – 8 % bei NWB-Proben und 16 % – 18 % bei WB-Proben.

4.6 Herausforderungen bei der Übertragbarkeit und vergleichende Studie zu den Materialeigenschaften von AlSi10Mg

Die eingeschränkte Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen und Parametern zwischen verschiedenen Maschinen stellt eine bedeutende Herausforderung für die breitere Anwendung der PBF/LB-M-Technologie dar und bleibt bisher weitgehend unerforscht. Diese Studie verfolgt einen innovativen Ansatz, indem sie Ergebnisse aus mehreren Arbeiten unter verschiedenen Wärmebehandlungsbedingungen und Prozessparametern systematisch analysiert und vergleicht. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Variabilität zwischen Maschinen und deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften (s. Tab. A6). Dieser Ansatz liefert neue

Erkenntnisse über die zugrunde liegenden Faktoren, die die mechanischen Eigenschaften auf unterschiedlichen Plattformen beeinflussen, und zeigt praktische Strategien zur Überwindung von Übertragbarkeitsbarrieren auf.

Der Fokus liegt dabei auf dem Vergleich der gewählten Prozessparameter aus den verschiedenen Studien und der daraus resultierenden Materialeigenschaften wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Dichte und Härte. Zudem wird analysiert, wie verschiedene Wärmebehandlungen die Ergebnisse beeinflussen.

Die in dieser Studie erzielten Ergebnisse, die mit dem optimierten Prozessparametersatz von 350 W Laserleistung, 1200 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurabstand von 0,14 mm erzielt wurden, dienen dabei als Referenz. Dieser Vergleichsmaßstab erleichtert eine Einordnung und Bewertung der Materialeigenschaften, die in anderen Studien unter abweichenden Prozessbedingungen ermittelt wurden.

Zugfestigkeit:

Frühere Studien zu AlSi10Mg haben Zugfestigkeiten zwischen 471 MPa und 496 MPa mit Dehnungen von 3,9 % bis 6,3 % im as-built-Zustand erzielt [53,66,95,137]. Die vorliegende Studie zeichnet sich durch eine Verfeinerung der Prozessparameter aus, die es ermöglicht, sowohl eine hohe Festigkeit (476 MPa) als auch eine erhöhte Duktilität (7,6 %) zu erreichen. Trotz der Verwendung ähnlicher Parameter wie in anderen Arbeiten – Laserleistung (340 W - 490 W), Scangeschwindigkeit (1300 mm/s - 2000 mm/s) und Spurabstand (0,1 mm – 0,2 mm) – zeigt diese Untersuchung, dass eine Optimierung die Dehnung erhöhen kann, ohne die Festigkeit zu reduzieren.

Studien, in denen das Spannungsarmglühen und ähnliche Prozessparameter wie in dieser Arbeit untersucht wurden, haben Zugfestigkeiten zwischen 248 MPa und 310 MPa und Dehnungen von 13,7 % bis 21,3 % ergeben. Diese Arbeit erreichte eine Zugfestigkeit von 307 MPa und eine Dehnung von 16,6 %, was die meisten vergleichbaren Arbeiten übertrifft (s. Abb. 23) [57,62,66,95,137]. Die Innovation dieser Arbeit liegt in der systematischen Feinabstimmung der Prozessparameter, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Festigkeit und Duktilität zu erzielen.

Diese Optimierung stellt eine bedeutende Weiterentwicklung dar, da sie aufzeigt, wie durch Abstimmung innerhalb der üblichen Prozessparametergrenzen mechanische Eigenschaften gesteigert werden können. Die vergleichende Auswertung (s. Abb. 23) verdeutlicht, wie diese Arbeit auf bestehende Parameterbereiche und Literaturergebnisse aufbaut, um die Materialeigenschaften zu optimieren.

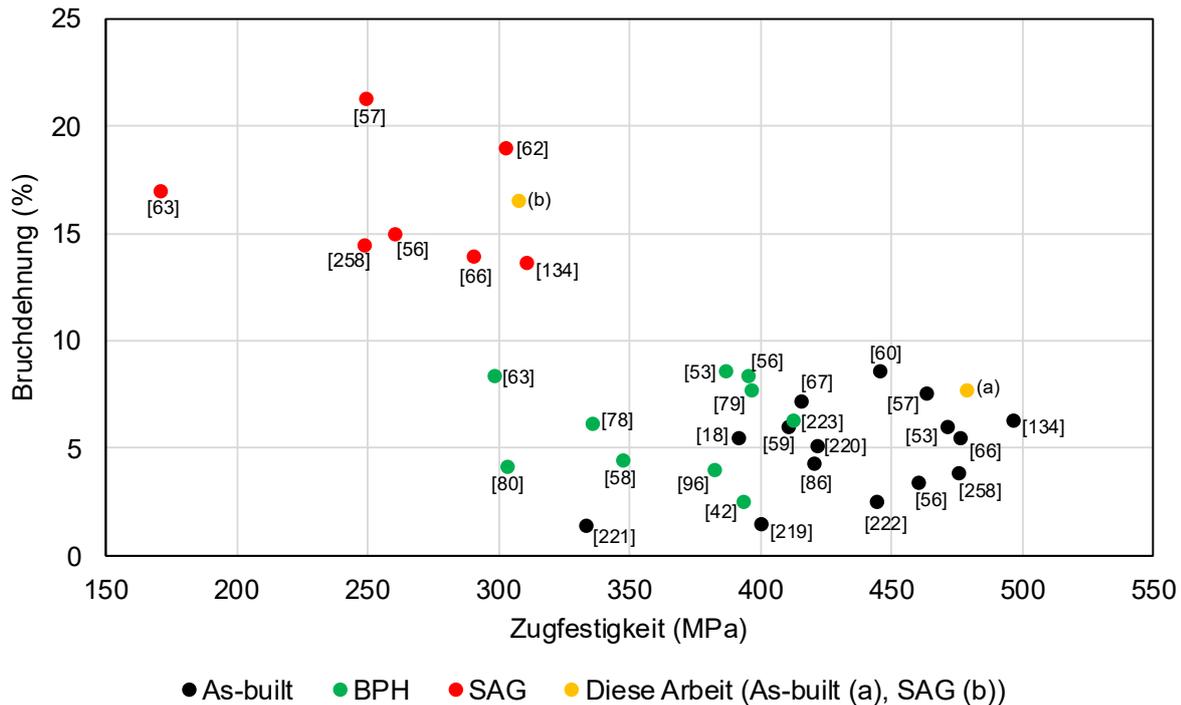


Abb. 23: Bruchdehnung vs. Zugfestigkeit von AlSi10Mg für verschiedene Studien in der wissenschaftlichen Literatur: Die dargestellten Daten umfassen verschiedene Prozessparameter und Wärmebehandlungsbedingungen, wie as-built [18,53,56,57,59,60,66,67,89,95,137,227–230], Bauplattformheizung (BPH) [42,53,56,58,63,78–80,99,231] und Spannungsarmglühen (SAG) [56,57,62,63,66,95,137]

Dichte:

Die Ergebnisse der Studien in Tab. A6 zeigen, dass die Dichte von AlSi10Mg mit zunehmender Laserleistung tendenziell zunimmt, was mit den Ergebnissen dieser Arbeit übereinstimmt (vgl. Kap. 4.2.1). Die Laserleistung beeinflusst die Schmelztiefe und -breite des Pulverbettes sowie den Wärmeeintrag in das Material. Eine höhere Laserleistung kann die Schmelztiefe und -breite erhöhen, den Abstand zwischen den Pulverpartikeln reduzieren und Schmelzfehler minimieren. Gleichzeitig birgt eine höhere Laserleistung das Risiko von Schmelzbadinstabilität und Gaseinschlüssen, die durch übermäßigen Wärmeeintrag entstehen können. Daher existiert ein Parameterfeld für die Laserleistung, mit dem AlSi10Mg-Proben im PBF/LB-M-Verfahren eine hohe Dichte erreichen können [52,232,233].

In dieser Studie wurde eine Dichte von 99,94 % erreicht, die die meisten in der Literatur für AlSi10Mg angegebenen Werte übertrifft. Die Prozessparameter dieser Studie – eine hohe Laserleistung und Scangeschwindigkeit – ähneln denjenigen von Arbeiten mit Dichtewerten zwischen 99,63 % und 99,92 % [78,89,137,228]. Diese Studien verwenden ebenfalls eine bidirektionale Streifenbelichtung und eine Drehung der Scanrichtung um 67° oder 90° zwischen den Schichten.

Im Gegensatz dazu weisen Studien mit deutlich abweichenden Parametern und niedrigeren Dichten (zwischen 97 % und 98,59 %) meist eine geringere Laserleistung (200 W - 220 W) und eine niedrigere Scangeschwindigkeit (500 mm/s - 1100 mm/s) auf [18,79,80,132,230].

Härte:

In dieser Studie wurden Härtewerte von 138 HV 1 für den NWB-Zustand und 125,8 HV 1 für den WB-Zustand erzielt. Die verwendeten Prozessparameter sind vergleichbar mit denen von Arbeiten, die Härtewerte zwischen 132 HV 1 und 145 HV 1 im NWB-Zustand und zwischen 88 HV 1 und 132 HV 1 für den WB-Zustand ermittelt haben [66,69,95,98]. Diese Studien verwendeten ebenfalls eine hohe Laserleistung (370 W - 490 W) und eine hohe Scangeschwindigkeit (1300 mm/s - 2000 mm/s). Häufig wird dabei eine bidirektionale Streifenbelichtung mit einer 67°- oder 90°-Drehung der Scanrichtung zwischen den Schichten verwendet.

Im Vergleich dazu berichten andere Studien über niedrigere Härtewerte von 108 HV 1 bis 119 HV 1 für as-built-Proben, die mit geringeren Laserleistungen (200 W) und langsameren Scangeschwindigkeiten (800 mm/s - 1300 mm/s) hergestellt wurden [37,58,230].

Die in dieser Arbeit erzielten höheren Härtewerte mit optimierten Parameterkombinationen verdeutlichen, dass eine Feinabstimmung innerhalb der oberen Parameterbereiche eine gesteigerte Härte bewirken kann. Dies unterstreicht den erheblichen Einfluss der Prozessparameter und zeigt, wie eine Anpassung der Parameter die Variabilität verringern kann – ein wesentlicher Aspekt für die industrielle Anwendung.

Herausforderungen bei der Übertragbarkeit zwischen Maschinen:

Ein zentraler Beitrag dieser Arbeit liegt in der Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen verschiedenen PBF/LB-M-Maschinen. Trotz der Anwendung vergleichbarer Prozessparameter in zahlreichen Studien – etwa Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurbabstand und Schichtdicke – bleibt die Übertragbarkeit zwischen unterschiedlichen Maschinen eine große Herausforderung. Bisherige Studien, die ähnliche Parameter verwendeten, liefern oft uneinheitliche Ergebnisse. Diese Variabilität wird hauptsächlich auf maschinenspezifische Unterschiede zurückgeführt, wie beispielsweise unterschiedliche Laserquellen, Strahldurchmesser, Bauraumatmosphären und Vorwärmssysteme. Diese Arbeit trägt zur Schließung dieser Lücke bei, indem sie zeigt, dass trotz ähnlicher Parameter erhebliche Abweichungen auftreten können, wenn das Zusammenspiel zwischen Prozessparametern und maschinenspezifischen Faktoren nicht ausreichend verstanden und angepasst wird.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit ähnlichen Parametern, wie hoher Laserleistung (340 W - 490 W) und Scangeschwindigkeit (1300 mm/s - 2000 mm/s), auf verschiedenen Plattformen ähnliche Ergebnisse hergestellt werden können. Ebenso liegen die Parameter, die häufig mit geringeren mechanischen Eigenschaften assoziiert werden, in einem vergleichbaren Bereich – z.B. geringere Laserleistung (175 W - 250 W) und niedrigere Scangeschwindigkeit (500 mm/s - 1025 mm/s). Diese Untersuchung verdeutlicht aber auch, dass bereits geringe Abweichungen in diesen Parametern zu inkonsistenten Ergebnissen führen können und unterstreichen damit die Notwendigkeit für eine stärkere Standardisierung der Maschinen. Ohne solche Standards können Unsicherheiten und Schwankungen im PBF/LB-M-Prozess weiter zunehmen.

Ein weiteres Problem stellt die oft unzureichende Berichterstattung in einigen Studien dar. Fehlende Angaben zu Prozessparametern, zur Scanstrategie, zur Dichte oder zu Härtewerten erschweren den Vergleich und die Optimierung der Materialeigenschaften zwischen

verschiedenen Arbeiten. Gleichzeitig wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse durch konsistente Trends in den Studien unterstützt. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Maschinen und bei vergleichbaren Prozessparametern und Wärmebehandlungen erzielt wurden, legt nahe, dass es grundlegende Faktoren gibt, die die mechanischen Eigenschaften unabhängig von der verwendeten Maschine beeinflussen. Dies deutet darauf hin, dass maschinenspezifische Unterschiede zwar eine Rolle spielen, die gewählten Prozessparameter und Wärmebehandlungen jedoch entscheidend für die Bestimmung der Materialeigenschaften sind.

4.7 Schlussfolgerung / Zwischenresultat

Die Optimierung der Prozessparameter im PBF/LB-M-Verfahren zeigt, dass die Materialeigenschaften von AlSi10Mg durch statistische Methoden abgestimmt werden können. Die umfassende Analyse der Wechselwirkungen zwischen Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand ermöglicht eine zielgerichtete Einstellung von Dichte, Härte, Rauheit, Zugfestigkeit und Bruchdehnung.

Durch die Zielgrößenoptimierung wurden einige der höchsten in der Literatur angegebenen Werte für Dichte (99,96 %), Härte (154,6 HV1), Zugfestigkeit (478,5 MPa) und Bruchdehnung (16,6 %) erreicht. Mithilfe der ANOVA wurden die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit als signifikanteste Faktoren identifiziert, die diese Materialeigenschaften beeinflussen. Gleichzeitig wurden die festgelegten normativen und branchenüblichen Anforderungen an die Materialqualität deutlich übertroffen, was die Wirksamkeit der Optimierungsstrategie zusätzlich verdeutlicht.

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit war zudem die Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen verschiedenen Maschinen. Die Ergebnisse zeigen, dass schon kleinste Abweichungen in den Prozessparametern zu signifikanten Unterschieden in den Materialeigenschaften führen können. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Wichtigkeit einer Standardisierung von Maschinen, um die Qualität und Konsistenz der Bauteile sicherzustellen.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse ist es wichtig, die Grenzen des verwendeten Versuchsplans anzuerkennen. Die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse ist durch das untersuchte Parameterfeld limitiert und unberücksichtigte Wechselwirkungen zwischen Variablen könnten die Vorhersagen beeinflussen. Die Konturdiagramme lieferten wertvolle Erkenntnisse innerhalb des untersuchten Parameterfensters, jedoch ist Vorsicht geboten, wenn diese Ergebnisse auf Bereiche außerhalb dieses Fensters extrapoliert werden.

Dieses Kapitel bietet somit eine fundierte Grundlage für die anstehenden Maßhaltigkeitsuntersuchungen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur statistischen Optimierung und zu den Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften werden im nächsten Schritt eingesetzt, um die Maßhaltigkeit der Bauteile systematisch zu untersuchen und zu optimieren. So bildet die Optimierung der Materialeigenschaften den Grundstein für eine umfassende Qualitätsbetrachtung der AF-Bauteile.

5 Einfluss der Prozessparameter und Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit und Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter für die Materialeigenschaften steht in diesem Kapitel die Maßhaltigkeit der AF-Bauteile im Vordergrund. Ziel ist es, eine differenzierte Analyse der Faktoren durchzuführen, die die Maßgenauigkeit von AlSi10Mg-Bauteilen beeinflussen. Hierbei werden insbesondere die Einflüsse der Prozessparameter, die Position der Bauteile auf der Bauplattform und die Reproduzierbarkeit untersucht. Diese Studie greift bestehende Forschungsergebnisse auf und erweitert sie um eine systematische Bewertung der Wechselwirkungen zwischen den Parametern und deren Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit, um mögliche Optimierungspotenziale zu identifizieren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Um die Maßgenauigkeit umfassend zu bewerten, wurde in dieser Arbeit zudem ein Vergleich zwischen CT- und KMG-Messungen und eine Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Dieser Vergleich ermöglicht die Identifikation systematischer Abweichungen, die durch Faktoren wie Rauheit und Bauteilgeometrie bedingt sind. Dies trägt zu einer ganzheitlichen Bewertung der Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen bei.

5.1 Prüfkörperentwicklung und Messplan

5.1.1 Hintergrund

Ein wesentlicher Bestandteil von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie von Qualifizierungsbemühungen im Bereich der AF ist der Einsatz von Testartefakten. Testartefakte ermöglichen eine standardisierte und vereinfachte Überprüfung relevanter Merkmale des Fertigungsprozesses [181,234–236]. Geometrische und dimensionale Qualitätskontrollen sind entscheidend, um das Vertrauen in AF-Produkte zu stärken und den Einsatz dieser Technologie in der Industrie weiter voranzutreiben [164,235,236]. Ein gängiger Ansatz zum Vergleich verschiedener AF-Maschinen und -Prozesse besteht darin, ein einheitliches 3D-Modell zu verwenden, das als gemeinsame Basis dient. Forscher haben daher standardisierte Prüfkörper mit definierten geometrischen Merkmalen entwickelt, die von verschiedenen AF-Systemen gefertigt werden können [164,181,234,237]. Diese sogenannten Benchmark-Artefakte [181] sind von zentraler Bedeutung, um die geometrischen Fähigkeiten eines AF-Systems zu bewerten und direkte Systemvergleiche zu ermöglichen. Artefakte umfassen eine Vielzahl von Merkmalen zur Bewertung der geometrischen Grenzen eines AF-Systems, wie z.B. maximaler Überhangwinkel, minimale Merkmalgröße, Reproduzierbarkeit oder Oberflächenrauheiten [164,181,234,238]. Da es jedoch kein standardisiertes Benchmark-Artefakt gibt, das für alle AF-Maschinen und -Prozesse gleichermaßen geeignet ist, entwickeln Forscher maßgeschneiderte Benchmark-Artefakte, die speziell auf die untersuchten Systeme und deren Besonderheiten abgestimmt sind. Viele dieser Artefakte wurden so konzipiert, dass sie unabhängig vom Herstellungsprozess verwendet werden können, wobei der Schwerpunkt auf der geometrischen Genauigkeit liegt [234,235,239–244].

Eines der ersten geometrischen Artefakte für AF-Prozesse wurde 1991 von Kruth [245] entwickelt [181,234,245]. Im Jahr 2012 entwickelte das National Institute of Standards and Technology (NIST) ein Testartefakt, das aus einer flachen Platte mit verschiedenen geometrischen Merkmalen besteht, die zur Bewertung der Maßgenauigkeit und minimalen Merkmalgrößen dienen. Diese Entwicklung stellt einen wichtigen Schritt in Richtung Standardisierung und Evaluierung von AF-Prozessen dar [181,234]. Im Juni 2019 veröffentlichten die Organisationen ISO (International Organization for Standardization) und ASTM (American Society for Testing and Materials) die Norm „ISO/ASTM 52902:2019 - Additive Fertigung – Testartefakte – Geometrische Fähigkeitsbewertung von additiven Fertigungssystemen“ [238]. Diese Norm könnte breite Akzeptanz finden, da sie potenzielle Maschinenfehler mit spezifischen Prüfteilen bewertet und zusätzlich ein Referenzteil zur Prüfung der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit vom Überhangwinkel enthält [164,234,238].

Ein Beitrag zu der Norm stammt von Gradl et al. [164], die einen Prüfkörper gemäß DIN EN ISO/ASTM 52902 entwickelt haben. Der geometrische Prüfkörper weist eine Grundfläche von 140 mm in X- und Y-Richtung sowie 31,8 mm in Z-Richtung auf und hat eine Gesamtmasse von 1,34 kg. Obwohl dieser Prüfkörper viele nützliche Merkmale beinhaltet und so gestaltet wurde, dass er auf den meisten PBF/LB-M-Plattformen gefertigt werden kann, ist er für einige Messtechniken wie z.B. für viele Computertomographen (CT) und einige AF-Anlagen zu groß. Aufgrund der Größe und Materialstärke kann ein so massiver Prüfkörper nicht vollständig erfasst werden, was die Anwendung einschränkt.

5.1.2 Beschreibung des Prüfkörpers

Der in dieser Arbeit verwendete Prüfkörper basiert ebenfalls auf den geometrischen Elementen der Norm DIN EN ISO/ASTM 52902, die zur Bewertung der geometrischen Leistung, einschließlich Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität, von additiven Fertigungssystemen dient [238]. Der Prüfkörper besitzt eine Grundfläche von 45 mm in X-Richtung, 50 mm in Y-Richtung und 16 mm in Z-Richtung. Die Norm DIN EN ISO/ASTM 52902 spezifiziert keine exakte Konfiguration oder Kombination von Testartefakten. Eine Darstellung des Prüfkörpers ist in Abb. 24 zu sehen.

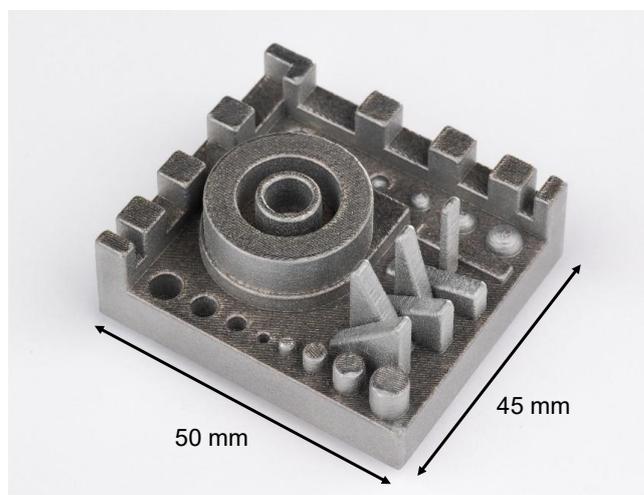


Abb. 24: Maßhaltigkeitsprüfkörper für die additive Fertigung

Tab. 16: Beschreibung der Geometrie- und Maßhaltigkeitsmerkmale des Prüfkörpers

| Merkmal | Beschreibung |
|--|--|
| Längenprüfkörper - LA_X_A# & LA_Y_A# | Rechteckige Stufenmaß-Blöcke zur Bestimmung der Maßhaltigkeit bei steigenden Messabständen. Die Abstände zwischen den Blöcken nehmen inkrementell um 2,5 mm zu. Die Abstände werden 3 x unidirektional (A1-A3: 7,5 mm, A1-A5: 17,5 mm, A1-A7: 30 mm) und 4 x bidirektional (A1-A2: 2,5 mm, A1-A4: 12,5 mm, A1-A6: 25 mm und A1-A8: 40 mm) in X- und Y-Richtung gemessen. |
| Stifte - DPp_# | Vier zylindrische Stifte mit Durchmessern von 2 mm, 3 mm, 4 mm und 5 mm. |
| Löcher - DPn_# | Vier zylindrische Löcher mit Durchmessern von 2 mm, 3 mm, 4 mm und 5 mm. |
| Halbkugeln - DKp_# | Halbkugelförmige Elemente, die aus der Oberfläche herausragen. Diese Features werden verwendet, um die Maßgenauigkeit bei der Fertigung sphärischer Oberflächen zu testen. Kugeldurchmesser von 2 mm, 3 mm und 4 mm. |
| Kalotten - DKn_# | Vertiefte halbkugelförmige Elemente mit den Durchmessern 2 mm, 3 mm und 4 mm. |
| Hohlzylinder - CA_#_# | Diese Merkmale umfassen einen Hohlzylinder mit größerem Außen- und Innendurchmesser (23,5 mm bzw. 15 mm) und einen inneren Hohlzylinder mit kleinerem Außen- und Innendurchmesser (9 mm und 7 mm). Die Durchmesser werden in sechs verschiedenen Höhen mit 1 mm Abstand gemessen. |
| Oberflächenstruktur - SA_# | Sieben Oberflächen in verschiedenen Winkeln von 0° - 90° (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), um den Einfluss geneigter Flächen auf die Oberflächenrauheit zu untersuchen. |

5.1.3 Versuchsplan

Um den Einfluss der Bauplattformposition und der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit sowie die Reproduzierbarkeit umfassend zu untersuchen, wurden insgesamt 20 Prüfkörper gefertigt (s. Tab. 17). Die Grundlagenuntersuchungen (Kap. 4) haben verdeutlicht, dass eine gezielte Kombination der Prozessparameter die Herstellung von Bauteilen mit sehr hohen Materialeigenschaften und nahezu vollständiger Dichte ermöglicht. Diese im Grundlagenteil ermittelten Bestparameter bilden nun die Grundlage für die folgenden Untersuchungen: 350 W Laserleistung, 1200 mm/s Scangeschwindigkeit, 0,14 mm Spurabstand.

Tab. 17: Versuchsplan für die Maßhaltigkeitsuntersuchungen: Variation von Prozessparametern und Bauplattformpositionen und Bewertung der Reproduzierbarkeit

| Einflussfaktor | Bezeichnung | Laserleistung P_L [W] | Scangeschwindigkeit v_s [mm/s] | Spurabstand h_s [mm] | Anmerkung |
|------------------------|---|---|--|--|--|
| Prozessparameter | P1 | 250 | 800 | 0,08 | <u>Variation der Prozessparameter:</u> Laserleistung, Scangeschw., und Spurabstand |
| | P2 | 250 | 800 | 0,2 | |
| | P3 | 250 | 1600 | 0,08 | |
| | P4 | 250 | 1600 | 0,2 | |
| | P5 | 450 | 800 | 0,08 | |
| | P6 | 450 | 800 | 0,2 | |
| | P7 | 450 | 1600 | 0,08 | |
| | P8 | 450 | 1600 | 0,2 | |
| Bauplattformpositionen | Raster aus drei Reihen und drei Spalten (3x3) | 350 | 1200 | 0,14 | Neun Prüfkörper mit gleichen Prozessparametern an unterschiedlichen <u>Bauplattformpositionen</u> |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | | 350 | 1200 | 0,14 | |
| Reproduzierbarkeit | W1 | 350 | 1200 | 0,14 | Fünf Prüfkörper mit identischen Parametern in Einzeldruckjobs (<u>Reproduzierbarkeit</u>) |
| | W2 | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | W3 | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | W4 | 350 | 1200 | 0,14 | |
| | W5 | 350 | 1200 | 0,14 | |

Prozessparameter:

Um den Einfluss verschiedener Prozessparameter, darunter Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand, auf die Maßhaltigkeit zu untersuchen, wurden acht Prüfkörper mit gezielter Variation dieser Parameter gefertigt. Ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Stufen pro Parameter (s. Tab. 17) wurde verwendet [190], um systematisch den Einfluss jeder Variable auf die geometrische Präzision der Bauteile zu bestimmen.

Die Stufen für diese Parameter orientieren sich dabei am Bestparameter aus der Grundlagenuntersuchung: 350 W Laserleistung \pm 100 W, 1200 mm/s Scangeschwindigkeit \pm 400 mm/s, 0,14 mm Spurabstand \pm 0,06 mm.

Bauplattformposition:

Um den Einfluss unterschiedlicher Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit zu untersuchen, wurden neun Prüfkörper bei identischen Prozessparametern an verschiedenen Positionen der Bauplattform hergestellt. Die Prüfkörper wurden in einem 3x3-Raster auf der Bauplattform (300 mm x 300 mm) gefertigt (s. Abb. 26). Diese Anordnung ermöglicht es, potenzielle räumliche Unterschiede innerhalb des Systems und deren Auswirkungen auf die Maßgenauigkeit zu bewerten.

Als Prozessparameter wurde der in der Grundlagenuntersuchung (Zielgrößenoptimierung, s. Kap. 4.4) ermittelte Bestparameter verwendet (350 W Laserleistung, 1200 mm/s Scangeschwindigkeit, 0,14 mm Spurbstand).

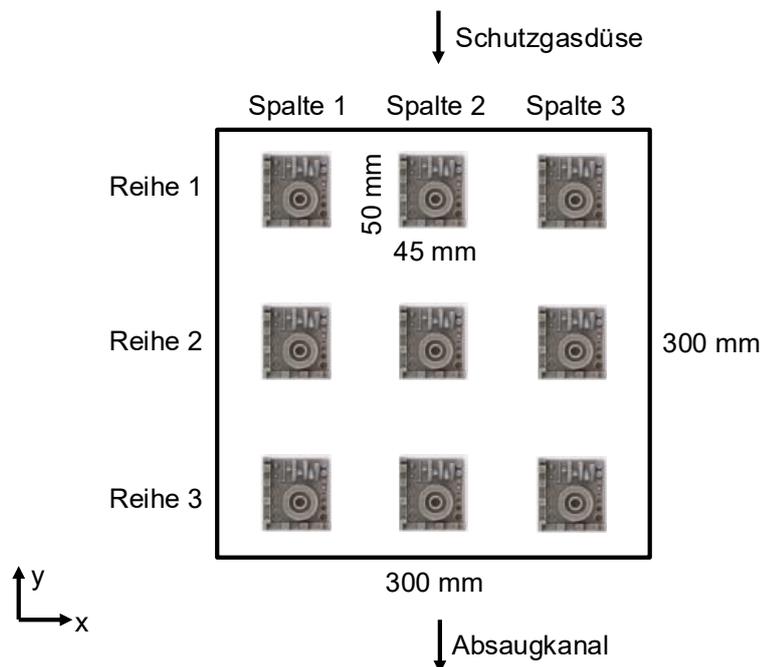


Abb. 26: Anordnung der Prüfkörper auf der Bauplattform zur Maßhaltigkeitsuntersuchung

Reproduzierbarkeit:

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurden in fünf Druckaufträgen (auf derselben Maschine) jeweils einzelne Prüfkörper mit identischen Prozessparametern an derselben Position (im Zentrum der Bauplattform) gefertigt. Dies dient der Bewertung der Prozessstabilität und der Reproduzierbarkeit (s. Tab. 17).

5.1.4 Verwendete Messsysteme

In dieser Studie wurden zwei verschiedene Messsysteme zur Bewertung der geometrischen Eigenschaften von AF-Prüfkörpern verwendet: ein taktiles KMG und ein CT. Diese Systeme arbeiten mit unterschiedlichen Messprinzipien und ergänzen sich, um eine umfassendere Untersuchung der Prüfkörper zu ermöglichen.

KMG: Hexagon Reference HP 10.7.6

Das KMG *Hexagon Reference HP 10.7.6* verwendet ein taktilen Messprinzip, bei dem ein Taster die Oberfläche des Prüfkörpers abtastet. In dieser Arbeit wurde eine Tasterkugel mit einem Durchmesser von 1,35 mm eingesetzt. Die maximal zulässige Längenmessabweichung $E_{L,MPE}$ dieses KMG-Systems beträgt:

$$E_{L,MPE} = 0,6 \mu\text{m} + L / (400 \text{ mm}/\mu\text{m}), \text{ mit } L \text{ in mm}$$

Die so gewonnenen Messdaten dienen als Referenzwerte für den Vergleich mit den Ergebnissen der CT-Messungen. Aufgrund der etablierten Kalibrierung gelten die taktilen Messungen als verlässliche Referenz. KMG-Systeme ermöglichen durch standardisierte Methoden eine verlässliche Basis zur Bestimmung der Messunsicherheit. Dabei können jedoch die unterschiedlichen Messprinzipien und die Empfindlichkeit gegenüber Oberflächenrauheit bei taktilen und CT-Messungen zu Abweichungen führen. Bei AF-Bauteilen mit häufig rauen Oberflächen ist es fundamental, die jeweiligen Unsicherheitsfaktoren ausführlich zu berücksichtigen.

CT: TomoScope XS von Werth Messtechnik

Das CT-System *TomoScope XS* von *Werth Messtechnik* arbeitet hingegen berührungslos und verwendet Röntgenstrahlen, um eine dreidimensionale Rekonstruktion der Prüfkörper zu erzeugen. Die Aufnahmen der Prüfkörper wurden mit einer Spannung von 160 kV, einem Strom von 85 μA und einer Integrationszeit von 1500 ms durchgeführt. Die Messungen erfolgten als 360° on-the-fly Messungen mit 2000 Drehschritten. Die Auflösung des Detektors beträgt 2200 Pixel x 2800 Pixel.

Für die Messungen wurde ein 0,5 mm Kupferfilter eingesetzt und die Messdauer lag bei ca. einer Stunde. Der Röntgenquelle-Detektor-Abstand (SDD) betrug 501,66 mm, der Röntgenquelle-Objekt-Abstand (SOD) lag bei 350,94 mm, was zu einer Vergrößerung von 1,43 führte. Die Voxelgröße lag bei den Messungen bei 32,3 μm . Die maximal zulässige Längenmessabweichung MPE_E des CT-Systems beträgt:

$$MPE_E = 4,5 \mu\text{m} + L / (75 \text{ mm}/\mu\text{m}), \text{ mit } L \text{ in mm}$$

Die mit dem CT-System gewonnenen Daten wurden anschließend mit der Werth-Software *WinWerth* verarbeitet und ausgewertet, um die geometrischen Merkmale gemäß der Norm DIN EN ISO/ASTM 52902 [238] anhand des Messplans zu messen.

5.2 Voruntersuchungen

5.2.1 Anpassung des Strahlversatzes und der X-Y-Achsenkalibrierung

In einem ersten Schritt wurden im Rahmen von Voruntersuchungen die vom Systemhersteller vorgegebenen Standardparameter für AlSi10Mg überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass sowohl der Strahlversatz als auch die X-Y-Achsenkalibrierung angepasst werden mussten, um die Maßhaltigkeit zu steigern.

Bei der initialen Untersuchung wurden Abweichungen zwischen erhabenen Elementen (wie Zylinder und Halbkugeln) und vertieften Elementen (wie Löcher und Kalotten) festgestellt, die

primär auf einen nicht kompensierten Strahlversatz zurückzuführen sind. Der Kompensationswert für den Strahlenversatz wurde berechnet, indem die Abweichungen von den Nennmaßen der Stifte DPp und Löcher DPn ermittelt, der Mittelwert dieser Abweichungen gebildet und dieser anschließend durch zwei geteilt wurde [181].

Ebenso wurden bei den Längenprüfkörpern (LA_X und LA_Y) mit steigenden Messabständen zunehmende Abweichungen festgestellt, die auf eine ungenaue Achsenskalierung zurückzuführen sind. Die notwendige Anpassung der Achsenskalierung wurde durch Berechnung der Steigung einer Geraden zu den Abstandsmessungen in X- und Y-Richtung bestimmt (s. Abb. 27). Diese Steigung wurde zu den ursprünglichen Skalierungswerten hinzugefügt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Anschließend wurde der Prüfkörper mit den angepassten Werten für den Strahlversatz und die Achsenskalierung neu gefertigt.

Abb. 27 und Abb. 28 verdeutlichen den Optimierungsprozess durch die Anpassung des Strahlversatzes und der Achsenskalierung im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem unkompensierten Standardparameter, insbesondere in Bezug auf die Abweichungen bei den Längenprüfkörpern LA (Abb. 27) sowie bei den Stiften DPp und Löchern DPn (Abb. 28).

Mit dem Standardparameter zeigten die Abweichungen in X- und Y-Richtung (LA_X und LA_Y) eine Zunahme mit wachsendem Abstand. So lag die Abweichung bei 2,5 mm Abstand (A1-A3) bei -0,01 mm, stieg jedoch bei 40 mm Abstand (A1-A8) auf -0,2 mm an. Nach der Anpassung reduzierte sich die maximale Abweichung auf -0,05 mm (s. Abb. 27).

Die Abweichungen bei den Stiften (DPp) und Löchern (DPn) konnten durch die Anpassung um etwa 0,1 mm reduziert werden, unabhängig vom Durchmesser der Prüfkörper. Für die Stifte wurden im Schnitt Abweichungen von ca. 0,02 mm gemessen, während für die Löcher die Abweichungen auf -0,05 mm gesenkt wurden (s. Abb. 28).

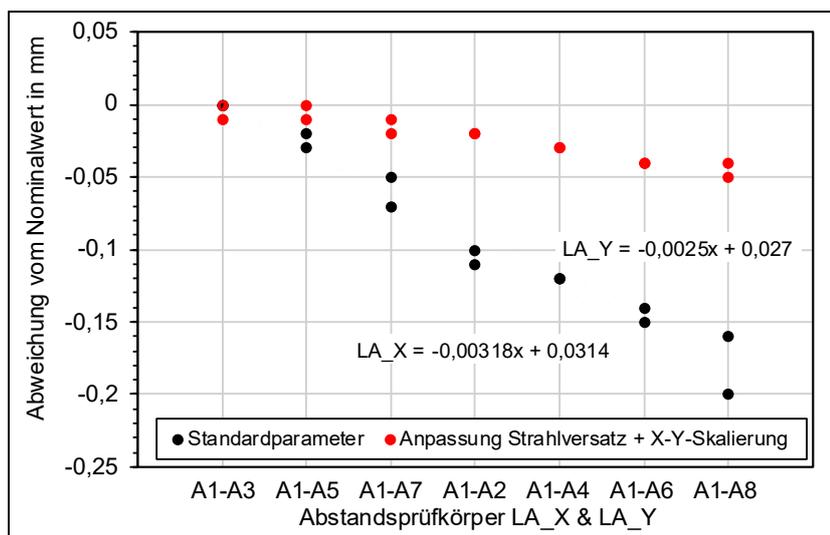


Abb. 27: Einfluss der Anpassung von Strahlversatz und XY-Skalierung auf die Maßhaltigkeit bei Längenprüfkörpern

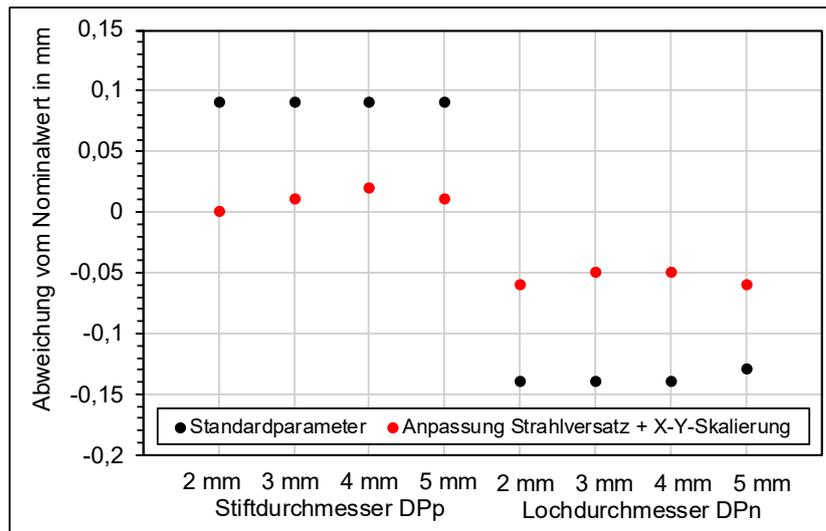


Abb. 28: Einfluss der Anpassung von Strahlversatz und XY-Skalierung auf die Maßhaltigkeit bei Stiften und Löchern

5.2.2 Vergleich von CT- und KMG-Messungen

Abb. 29 stellt die Differenz zwischen den CT-Messungen und den Referenz-KMG-Messungen für die AF-Prüfkörper dar. Die unidirektionalen Abstände in X- und Y-Richtung, gemessen zwischen den Ebenen A1-A3 (7,5 mm), A1-A5 (17,5 mm) und A1-A7 (30 mm), zeigen für die AF-Prüfkörper durchgängig geringe Differenzen zwischen den CT- und KMG-Messungen. Diese Abweichungen liegen im Bereich von bis zu 5 μm und steigen mit zunehmendem Abstand leicht an. Die bidirektionalen Abstände in X- und Y-Richtung, gemessen zwischen den Ebenen A1-A2 (2,5 mm), A1-A4 (12,5 mm), A1-A6 (25 mm) und A1-A8 (40 mm), weisen hingegen einen systematischen Offset von etwa 40 μm zwischen den CT- und den KMG-Messungen auf, wobei dieser Offset bei allen bidirektionalen Abständen nahezu konstant bleibt.

Darüber hinaus weisen die Messungen der Stifte und Löcher (DPp, DPn) zwischen den beiden Messsystemen einen Offset von etwa $\pm 30 \mu\text{m}$ auf. Dies gilt ebenso für die äußeren (CA_1, CA_3) und inneren Kreisringe (CA_2, CA_4), bei denen ähnliche Differenzen zwischen den beiden Messmethoden beobachtet wurden. Weil die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Höhen bei den Kreisringen $< 5 \mu\text{m}$ sind, werden nur die Ergebnisse für die erste Höhe dargestellt (CA_#_1). Da bei den Messungen der bidirektionalen Abstände in dieser Arbeit stets die Lücke zwischen zwei Ebenen erfasst wird, resultieren positive Abweichungen, wie sie beispielsweise bei den Löchern (DPn) zu sehen sind (s. Abb. 29), bei denen ebenfalls eine Lücke gemessen wird, im Gegensatz zu den Stiften (DPp).

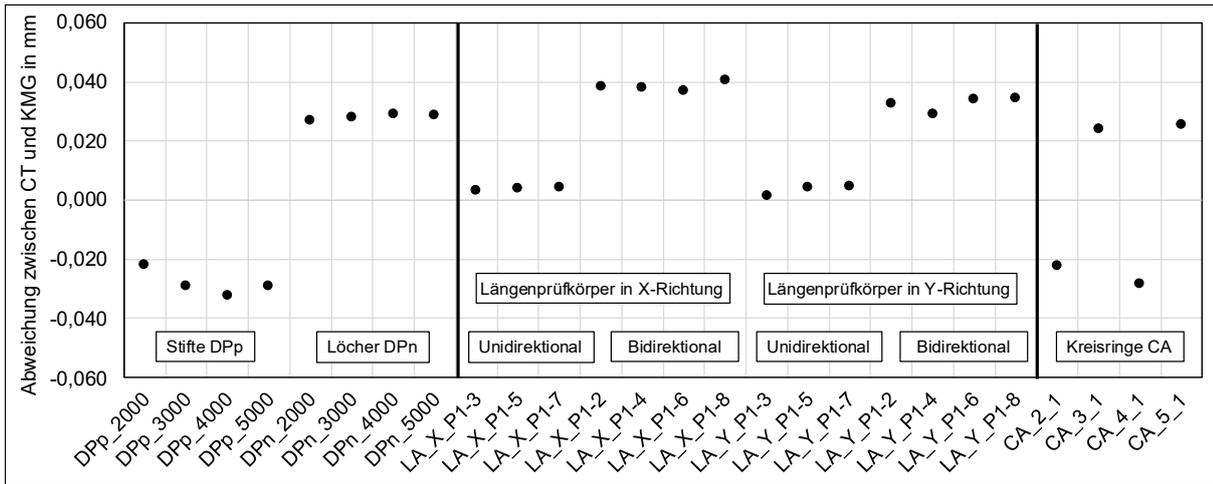


Abb. 29: Differenzen zwischen CT- und KMG-Messungen für verschiedene Geometrielemente beim AF-Prüfkörper

Zusätzlich bestätigen Vergleichsmessungen an einem kalibrierten Normal (PTB-Lochplatte) die zuvor beobachteten systematischen Abweichungen. Um eine konsistente Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgte die Messung der Lochplatte, die vergleichbare Abmaße wie der AF-Prüfkörper aufweist, mit den gleichen CT-Messparametern wie beim AF-Prüfkörper (Vergrößerung von 1,43 und 32,3 μm Voxelgröße).

Die PTB-Lochplatte besteht aus Aluminium und hat eine quadratische Form mit den Maßen 48 mm x 48 mm x 8 mm (s. Abb. 30). Sie verfügt über 28 Löcher zur Messung von Längen in verschiedenen Raumrichtungen. Die Lochplatte dient als kalibriertes Normal zur Validierung und Analyse der Längenmessfehler bei Computertomographen. Die Lochanordnungen ermöglichen die Messung von Abständen in sieben Hauptrichtungen innerhalb von etwa 66 % des Messvolumens, was den Anforderungen der VDI/VDE 2630-1.3 entspricht [246,247]. Insgesamt werden 70 unidirektionale und bidirektionale Abstände gemessen.

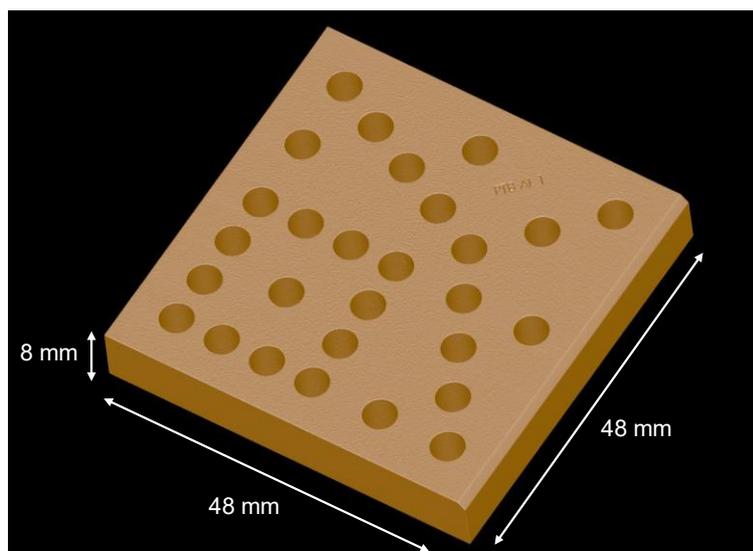


Abb. 30: PTB-Lochplattennormal für Vergleichsmessungen

Die unidirektionalen Längenmessungen beim kalibrierten Normal erfassen die Abstände zwischen den Mittelpunkten der Referenzkreise (Mitte zu Mitte) und erfolgen entlang einer Richtung. Die bidirektionalen Messungen umfassen die Abstände zwischen den Antastpunkten der Referenzkreise mit dem größten Abstand (Punkt zu Punkt) [157,246]. Ausführlichere Beschreibungen der Lochplatte und der angewendeten Messstrategie sind in den Arbeiten von Bartscher et al. [246] und Villarraga-Gomez et al. [157] zu finden.

Wie beim AF-Prüfkörper, zeigen auch die Vergleichsmessungen mit dem kalibrierten Normal systematische Abweichungen bei den unidirektionalen Abständen, die proportional zur Messlänge ansteigen (s. Abb. 31). Dieser Anstieg ist auf einen Fehler im Vergrößerungsmaßstab (Skalierungsfehler) der CT-Messung zurückzuführen. Da dieser Skalierungsfehler nicht korrigiert wurde und andere Unsicherheitsbeiträge im Vergleich dazu als vernachlässigbar eingeschätzt werden, wird die Messunsicherheit der unidirektionalen Abstände am PBF/LB-M-Prüfkörper auf etwa 8 μm geschätzt, basierend auf der maximalen Abweichung, die auf dem kalibrierten Normal beobachtet wurde. Andere Beiträge zur Messunsicherheit, wie etwa durch Rauheit (u_w), Kalibrierunsicherheit (u_{cal}) oder Reproduzierbarkeit (u_p), sind bei $\leq 1 \mu\text{m}$ und haben bei den unidirektionalen Messungen daher einen geringeren Einfluss. Die angegebene Messunsicherheit von etwa 8 μm gilt für alle unidirektionalen Messwerte, sofern keine abweichenden Unsicherheiten explizit ausgewiesen sind.

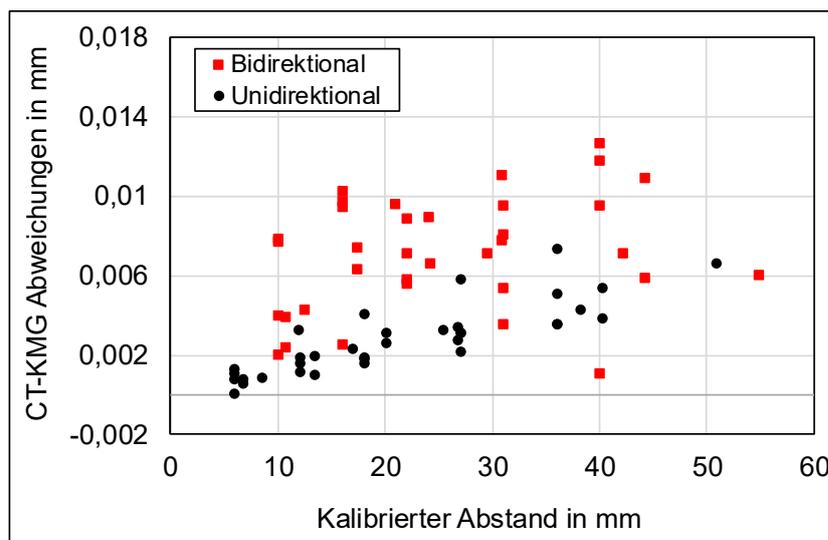


Abb. 31: Differenzen zwischen CT- und KMG-Messungen für unidirektionale und bidirektionale Abstände beim kalibrierten PTB-Lochplattennormal

Im Vergleich zu den unidirektionalen Abstandsmessungen zeigen die bidirektionalen Messungen am AF-Prüfkörper einen Offset von ca. 40 μm (s. Abb. 29).

Beim kalibrierten PTB-Normal sind die Abweichungen bei den bidirektionalen Maßen ebenfalls größer als für die unidirektionalen Maße und haben darüber hinaus mehr zufällige Schwankungen (s. Abb. 31). Dies liegt vor allem daran, dass die bidirektionalen Messungen als Punkt-zu-Punkt-Abstand definiert sind. Das bedeutet, dass Formabweichungen, Rauheit und die Oberflächenbestimmung im CT-Volumen hier einen größeren Einfluss haben. Dies spiegelt sich auch in der größeren Unsicherheit bei der Kalibrierung wider. Der Kalibrierschein für die

PTB-Lochplatte, ausgestellt von einem von der DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) akkreditierten Labor, gibt für die unidirektionalen Abstände erweiterte Messunsicherheiten von etwa 1 µm an, während die bidirektionalen Abstände mit erweiterten Messunsicherheiten von etwa 5 µm spezifiziert sind.

Diese Abweichungen sind somit nicht auf zufällige Messfehler oder Rauschen zurückzuführen, sondern spiegeln systematische Unterschiede bei bidirektionalen Messungen wider, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Messunsicherheitsbetrachtung

Die Messunsicherheit (vgl. Kap. 2.4.3.3) beschreibt die Streuung der Messwerte aufgrund unvermeidbarer Fehlerquellen wie Messgeräte und Umweltbedingungen. Die Messunsicherheit wird spezifisch für jede Messaufgabe ermittelt und berücksichtigt die eingesetzte Messstrategie sowie Einflussfaktoren wie die Rauheit des Prüfkörpers.

Eine fundierte Betrachtung der Messunsicherheit ist elementar, um die Zuverlässigkeit der Messergebnisse zu bewerten. Das gesamte Vorgehen zur Berechnung der Messunsicherheit basiert auf der Kombination von Unsicherheitskomponenten, die sowohl aus dem Kalibrierprozess als auch aus den verwendeten Messmethoden und Prüfkörpern resultieren. Die erweiterte Messunsicherheit wird nach der in Kap. 2.4.3.3 angegebenen Gl. 1 berechnet.

Für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit wird im Folgenden die Messunsicherheitsbetrachtung für die bidirektionalen Abstandsmessungen des AF-Prüfkörpers dargestellt, bei denen ein systematischer Offset von 40 µm zwischen den CT- und KMG-Messungen beobachtet wurde.

Die Messunsicherheit setzt sich zusammen aus den folgenden Einzelbeiträgen:

1. Kalibrierunsicherheit (u_{cal}):

Die Unsicherheit der Kalibrierung des verwendeten Normals beschreibt die Genauigkeit, mit der die Referenzmessungen durchgeführt wurden. Dieser Beitrag wird durch den Kalibrierschein der Lochplatte oder durch die Spezifikation der referenzierten Prüfkörper bestimmt. In diesem Fall beträgt die Kalibrierunsicherheit $u_{cal} = 2.5 \mu\text{m}$

2. Verfahrensunsicherheit (u_p):

Die Verfahrensunsicherheit umfasst alle Unsicherheitskomponenten, die aus der Reproduzierbarkeit der Messungen resultieren. Dazu zählen insbesondere Bedienerfehler, Schwankungen der Umgebungsbedingungen sowie die Präzision des eingesetzten Messgeräts. In dieser Arbeit wurde die Verfahrensunsicherheit durch Wiederholungsmessungen bestimmt. Hierbei wurden fünf Wiederholungsmessungen an jeweils identischen Messpunkten durchgeführt, um die Streuung der Messergebnisse zu erfassen. Aus den fünf Wiederholungen resultiert eine Verfahrensunsicherheit von $u_p = 2 \mu\text{m}$.

3. Unsicherheit durch Rauheit und Geometrie des Prüfkörpers (u_w):

Dieser Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt die Oberflächenbeschaffenheit des Prüfkörpers, die insbesondere bei AF-Bauteilen eine signifikante Rolle spielt. Rauere Oberflächen führen zu größeren Abweichungen bei den Messergebnissen, da die mechanische Filterwirkung der taktilen Messtechnik sowie die Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion im

CT-Bild durch Unebenheiten beeinflusst werden. In fünf Wiederholungsmessungen wurde ein Rauheitswert von $R_z = 47 \mu\text{m}$ bestimmt. In Übereinstimmung mit den Empfehlungen aus der Literatur wird der Rauheitsbeitrag als rechteckige Verteilung mit $\pm R_z/2$ angesetzt [154,156,158,159]. Daher ergibt sich eine Unsicherheit durch die Rauheit von:

$$u_w = \frac{R_z}{2} = \frac{47 \mu\text{m}}{2} = 23,5 \mu\text{m}$$

4. Unsicherheit des systematischen Fehlers (u_b):

Dieser Unsicherheitsbeitrag beschreibt den Einfluss systematischer Fehler, die durch Skalierungsabweichungen sowie weitere systematische Effekte wie geometrische Abweichungen im Messaufbau und Oberflächenfindung in der CT-Software entstehen können. Der maximale Skalierungsfehler selbst beträgt für uni- und bidirektionale Maße $u_b = 8 \mu\text{m}$. Für die bidirektionalen Maße wurden zusätzliche systematische Unsicherheiten berücksichtigt, da bei Punkt-zu-Punkt-Abständen lokale Unebenheiten oder Oberflächenabweichungen einen direkten Einfluss auf das Messergebnis haben. Die Gesamtunsicherheit der systematischen Effekte für die bidirektionalen Messungen wird daher auf der Grundlage der am Referenznormal beobachteten maximalen Abweichungen auf $15 \mu\text{m}$ geschätzt, um alle relevanten systematischen Einflüsse zu erfassen (s. Abb. 31).

Mit einem Erweiterungsfaktor $k = 2$ (für ein Vertrauensniveau von 95 %) und den oben genannten Unsicherheitsbeiträgen folgt:

$$U_{bidirektional} = 2 \cdot \sqrt{(2,5 \mu\text{m})^2 + (2 \mu\text{m})^2 + (23,5 \mu\text{m})^2 + (15 \mu\text{m})^2}$$

Dies ergibt eine erweiterte Messunsicherheit von:

$$U_{bidirektional} = 2 \cdot \sqrt{(6,25 + 4 + 552,25 + 225)} \mu\text{m} = 2 \cdot \sqrt{787,5} \mu\text{m} \approx 56,1 \mu\text{m}$$

Diese erweiterte Messunsicherheit gilt einheitlich für alle Messwerte, die sich auf bidirektionale Abstände beziehen, sofern nicht anders angegeben.

Die resultierende erweiterte Messunsicherheit von ca. $56 \mu\text{m}$ für die bidirektionalen Abstände zeigt, dass der größte Unsicherheitsbeitrag durch die Rauheit des Prüfkörpers und die Unsicherheit des systematischen Fehlers verursacht wird. Dies steht im Einklang mit den Beobachtungen von Schild et al. [153], die ebenfalls feststellen, dass insbesondere bei rauen Oberflächen die Unsicherheitskomponente u_w einen großen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit hat. Es wird damit verdeutlicht, dass eine optimierte Oberflächenbehandlung der AF-Bauteile erforderlich ist, um die Gesamtmessunsicherheit zu minimieren und die Verlässlichkeit der Mess-ergebnisse sicherzustellen.

Aloisi et al. [156] bestätigen dies und beschreiben, dass die Rauheit erhebliche Messabweichungen verursachen kann. Dies führt zu systematischen Abweichungen zwischen CT-Messungen und taktilen KMG-Messungen. Zudem bietet das CT-System abhängig von der Auflösung eine präzisere Erfassung der Topographie, da es sowohl die Spitzen als auch die Täler des Profils genauer abbilden kann, während KMG-Messungen bedingt durch die Größe der Tasterkugel eher die Spitzen erheben, was systematisch zu kleineren äußeren und größeren

inneren Durchmessern bei den CT-Messungen führt, etwa um den Wert $R_z/2$ der Rauheit, was mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit übereinstimmt (vgl. $R_z/2$ von $23,5 \mu\text{m}$ ist etwa die Differenz bei den inneren und äußeren Kreisringen (CA_1 – CA_4) in Abb. 29).

Zusätzlich untersuchten Lou et al. [154] den mechanischen Filtereffekt bei der taktilen Messung von AF-Bauteilen. Sie zeigten, dass der Durchmesser der Tastkugel einen erheblichen Einfluss auf die Messabweichung hat. Für Kugeldurchmesser von 3 mm, 4 mm und 5 mm zeigte sich, dass die äußeren Zylinderdurchmesser systematisch um etwa $15 \mu\text{m}$ pro 1 mm Zunahme des Tastkugeldurchmessers anstiegen, während die inneren Zylinderdurchmesser um ca. $20 \mu\text{m}$ pro 1 mm Zunahme des Tastkugeldurchmessers abnahmen. Dies liegt daran, dass größere Tastkugeldurchmesser Oberflächenunebenheiten stärker glätten und dadurch systematische Abweichungen in den Messergebnissen verursachen.

Darüber hinaus haben die Prozessparameter einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Abweichungen. Während die Konsistenz der Differenzen zwischen CT- und KMG-Messungen für den dargestellten Prozessparameter stabil bleibt, zeigen andere Parameter deutlich variablere Ergebnisse bei den Differenzen und größere Schwankungen. Diese Variabilität lässt sich durch eine unzureichende Präzision und prozessbedingte Abweichungen der Parameter beim Druckprozess erklären, was dazu führt, dass die Abweichungen zwischen CT- und KMG-Messungen weniger konsistent ausfallen und eine höhere Streuung zeigen. Dies verdeutlicht, dass eine gleichbleibende Präzision nicht für alle Parameter gewährleistet ist, was die Bedeutung einer geeigneten Abstimmung der Prozessparameter unterstreicht, wie schon im Grundlagenteil ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass taktile KMG für Referenzmessungen von AF-Bauteilen mit rauer Oberfläche, wie sie beim PBF/LB-M-Verfahren häufig auftreten, weniger geeignet sind (s. Kap. 2.4.3.2). Die raue Oberflächenstruktur erschwert die taktile Vermessung und führt bei der Verwendung großer Tastkugeldurchmesser zu systematischen Abweichungen, was die Messunsicherheit erhöht. Aufgrund dieser Einschränkungen ist das KMG als Referenz für Messtechnologien wie die CT nur bedingt geeignet. Im Gegensatz dazu bietet die CT den Vorteil, auch komplexe innere Strukturen und schwer zugängliche Bereiche von AF-Bauteilen verlässlich zu erfassen.

Da die Hauptbeiträge zur Messunsicherheit systematisch sind, besteht die Möglichkeit, diese zu korrigieren und dadurch die Unsicherheit zu reduzieren. Eine weiterführende Untersuchung dieses Ansatzes bleibt Gegenstand zukünftiger Forschung.

Die Vergleichsmessungen zwischen CT- und KMG-Messungen sowie die Analyse der Messunsicherheiten bieten eine fundierte Grundlage für die anschließende Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit. Im nächsten Kapitel wird der Einfluss der Prozessparameter, insbesondere der Laserleistung und Scangeschwindigkeit, auf die Maßhaltigkeit der Bauteile detailliert betrachtet.

5.3 Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit

Nachdem die Messtechniken und die Grundparameter bewertet und festgelegt wurden, wird der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit untersucht (s. Tab. 17 – Prüfkörper P1-P8). Zu den variierten Parametern zählen die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und der Spurbstand, deren Wirkung im Folgenden genauer untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass, wie bei den Materialeigenschaften, insbesondere die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit signifikante Auswirkungen auf die Maßgenauigkeit der Bauteile haben, während der Spurbstand im untersuchten Bereich keine nennenswerten Einflüsse auf die Maßgenauigkeit zeigt.

Einfluss der Laserleistung

Die Laserleistung wurde in zwei Stufen untersucht. Es zeigte sich, dass höhere Laserleistungen zu größeren Maßabweichungen führen. Bei den mit 450 W gefertigten Proben (P5 bis P8) wurden für die Stifte (DPp) und Löcher (DPn) Abweichungen von bis zu $\pm 0,4$ mm festgestellt. Im Vergleich dazu wiesen die Proben P1 bis P4, die mit 250 W gefertigt wurden, geringere Abweichungen auf, mit max. $-0,15$ mm (s. Abb. 32). Die höheren Laserleistungen führten somit zu signifikanten Abweichungen, was auf die komplexe Wechselwirkung zwischen dem Energieeintrag und der Schmelzbadbildung im Fertigungsprozess hinweist.

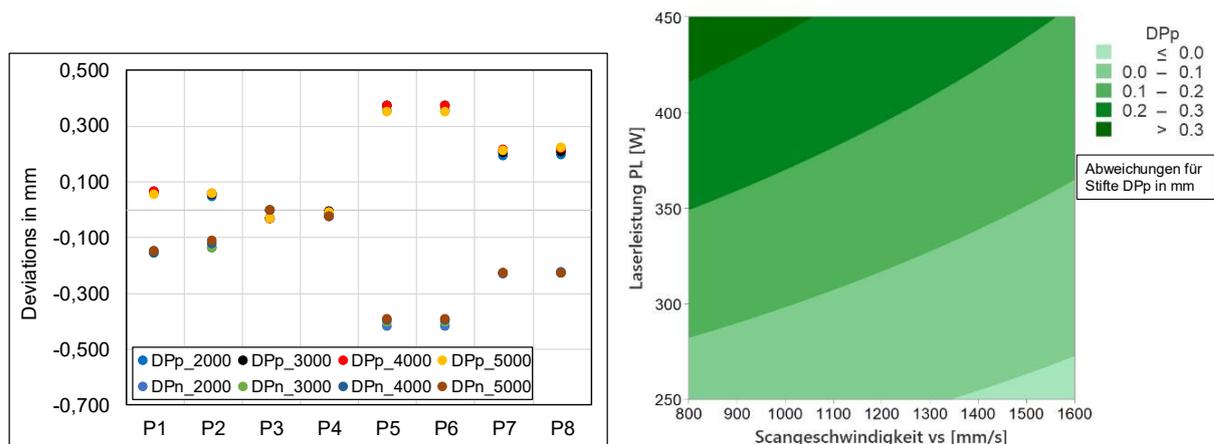


Abb. 32: Einfluss der Prozessparameter P1 – P8 auf die Maßhaltigkeit von Stiften (DPp) und Löchern (DPn)

Einfluss der Scangeschwindigkeit

Neben der Laserleistung wurde auch die Scangeschwindigkeit untersucht, wobei zwischen 800 mm/s und 1600 mm/s unterschieden wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass Prüfkörper, die mit einer höheren Scangeschwindigkeit von 1600 mm/s (P3-P4, P7-P8) gefertigt wurden, geringere Abweichungen von den Nominalmaßen aufwiesen als jene, die mit einer niedrigeren Scangeschwindigkeit von 800 mm/s (P1-P2, P5-P6) hergestellt wurden. Konkret sind die Abweichungen bei den Prüfkörpern mit höherer Scangeschwindigkeit zwischen 0,1 mm und 0,15 mm geringer im Vergleich zu den Prüfkörpern mit niedrigerer Scangeschwindigkeit (s. Abb. 32).

Einfluss des Spurbabstands

Der Einfluss des Spurbabstands auf die Maßhaltigkeit wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich jedoch, dass der Spurbabstand in den betrachteten Bereichen von 0,08 mm und 0,2 mm keine signifikanten Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit hatte. Die Abweichungen blieben unabhängig von diesem Parameter innerhalb ähnlicher Wertebereiche, sodass keine Trends oder Muster in Bezug auf den Spurbabstand identifiziert werden konnten.

Toleranzklassen

Zusätzlich wurden die Abweichungen für die Prüfkörper gemäß den in DIN 2769 [248] definierten Allgemeintoleranzklassen für Längenmäße klassifiziert und bewertet (s. Abb. 33). Dieser Ansatz bietet eine Möglichkeit die Abweichungen einzuordnen, ohne spezifische Toleranzen festzulegen, da diese von der Funktionalität eines Bauteils abhängen und bei einem Testartefakt frei gewählt werden können.

Die Proben P3 und P4, die mit einer Laserleistung von 250 W und einer Scangeschwindigkeit von 1600 mm/s gefertigt wurden, zeigten die höchste Maßhaltigkeit und lagen vollständig in der Toleranzklasse A (fein). Bei den Proben P1 und P2, die mit der gleichen Laserleistung, aber einer niedrigeren Scangeschwindigkeit von 800 mm/s gefertigt wurden, verteilen sich die Abweichungen gleichmäßig auf die Toleranzklassen A (fein), B (mittel) und C (grob). Die Abweichungen in der Klasse A (fein) befinden sich dabei bei Nennmaßen, die größer als 6 mm sind. Dies ist ebenso bei den Parametern P5-P6 und P7-P8 der Fall. Die wenigen Abweichungen in der Klasse A befinden bei Nennmaßen größer 6 mm. Bei den Parametern P7-P8 liegt der Großteil der Abweichungen in der Toleranzklasse C (grob). Die größten Abweichungen wurden bei den Proben P5 und P6 beobachtet, die mit einer Laserleistung von 450 W und einer Scangeschwindigkeit von 800 mm/s gefertigt wurden. Die Abweichungen lagen bei diesen Proben bei bis zu $\pm 0,45$ mm, was teilweise die Grenzen der Toleranzklassen überschritt und somit die Funktionalität der Bauteile beeinträchtigen könnte [248].

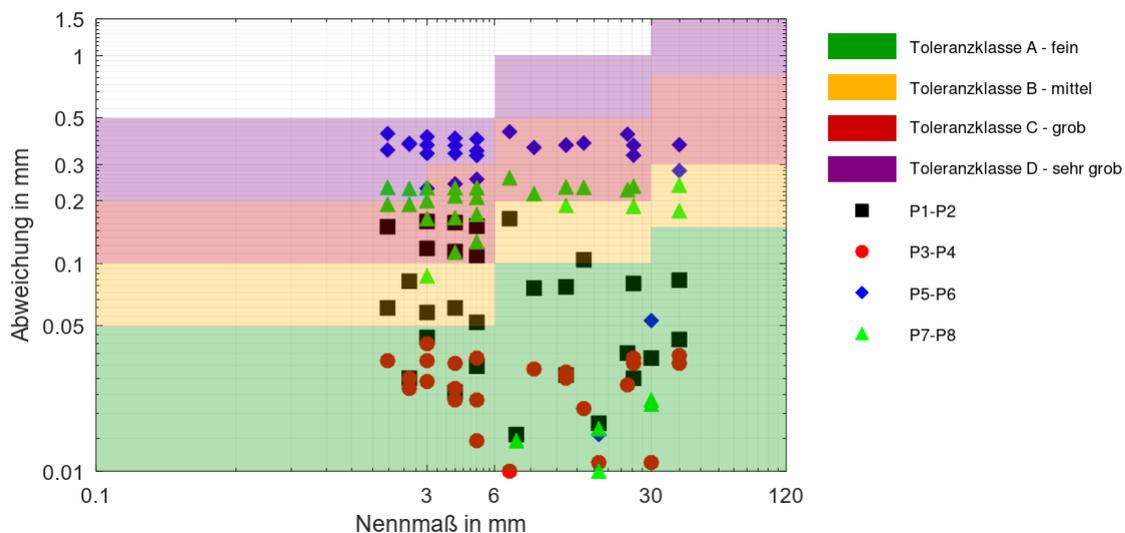


Abb. 33: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für die Prozessparameter P1-P8 gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen)

ANOVA

Die ANOVA-Analyse der Messergebnisse für die zylindrischen und sphärischen Elemente (Stifte DPp, Löcher DPn, Halbkugeln DKp, Kalotten DKn, Kreisringe CA) bestätigt, dass die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit die wichtigsten Einflussfaktoren unter den untersuchten Parametern auf die Maßhaltigkeit sind (s. Tab. 18). Die Laserleistung hatte einen Anteil von etwa 70 % (p-Wert = 0,006) an der Maßhaltigkeit, während die Scangeschwindigkeit mit einem Anteil von 13 % (p-Wert = 0,014) ebenfalls signifikante Auswirkungen zeigte. Der Spurabstand hingegen trug mit weniger als 0,1 % kaum zur Maßhaltigkeit bei. Ein p-Wert von 0,016 (< 0,05) bestätigt die Signifikanz des Modells. Diese Analysen unterstreichen die Notwendigkeit einer Abstimmung und Optimierung der Prozessparameter zur Sicherstellung hoher Maßhaltigkeiten.

Tab. 18: Varianzanalyse zur Bewertung der Prozessparameter und ihrer Wechselwirkungen auf die Maßhaltigkeit

| Faktor | DF | Kor SS | Kor MS | F-Wert | p-Wert | Beitrag in % |
|-------------------|----|----------|----------|--------|--------|--------------|
| Modell | 6 | 0,179175 | 0,029862 | 2389 | 0,016 | Signifikant |
| A - Laserleistung | 1 | 0,148513 | 0,148513 | 11881 | 0,006 | 71,05% |
| B - Scangeschwi. | 1 | 0,027613 | 0,027613 | 2209 | 0,014 | 13,21% |
| C - Spurabstand | 1 | 0,000112 | 0,000112 | 9 | 0,205 | 0,05% |
| AB | 1 | 0,002813 | 0,002813 | 225 | 0,042 | 1,35% |
| AC | 1 | 0,000012 | 0,000012 | 1 | 0,5 | 0,01% |
| BC | 1 | 0,000112 | 0,000112 | 9 | 0,205 | 0,05% |
| Fehler | 1 | 0,000013 | 0,000013 | | | |
| Total | 7 | 0,179187 | | | | |

$R^2 = 99,99\%$; Kor $R^2 = 99,95\%$; Kor R^2 (Prog.) = 99,55 %

Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und Prozessparametern

Die dargestellten Daten in Abb. 34 zeigen, dass die Prozessparameter bei Neigungswinkeln von 0° und 15° einen deutlichen Einfluss auf die Rauheit haben. Bei höheren Neigungswinkeln hingegen nimmt dieser Einfluss ab, und die Rauheitswerte stabilisieren sich auf ein konstantes Level. Bei Neigungswinkeln von 0° und 15° treten deutliche Schwankungen in den Rauheitswerten auf, die bei bestimmten Parametern, wie beispielsweise Parameter 8, zu erhöhten Rauheiten von über 24 μm R_a führen. Ab einem Winkel von 30° bis 45° stabilisieren sich die Rauheitswerte hingegen und liegen konsistent zwischen 6 μm und 12 μm , unabhängig von den Prozessparametern. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenqualität bei größeren Neigungswinkeln weitgehend unabhängig von den spezifischen Prozessparametern bleibt. Dies deutet darauf hin, dass andere Faktoren, wie die Schichtdicke, einen stärkeren Einfluss auf die Rauheit ausüben könnten.

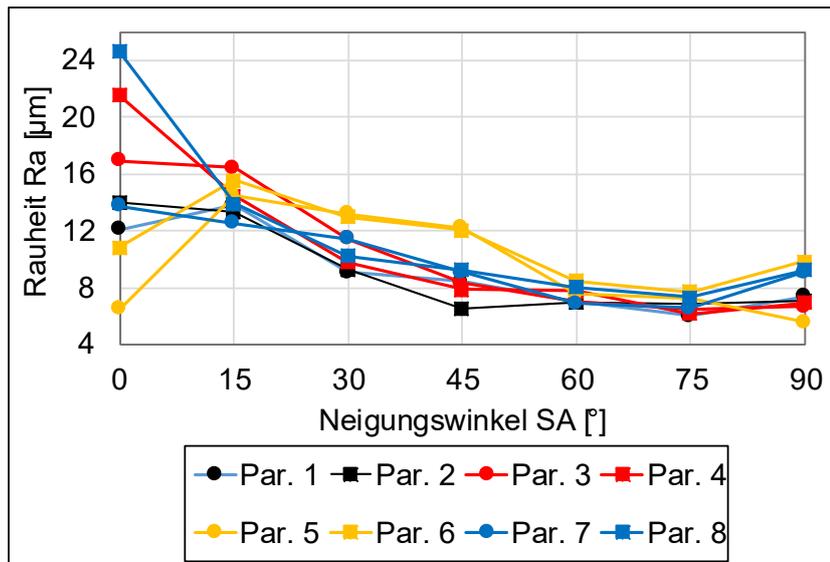


Abb. 34: Einfluss des Neigungswinkels und der Prozessparameter auf die Oberflächenrauheit (R_a)

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen die starke Abhängigkeit der Maßhaltigkeit von den Prozessparametern, insbesondere von der Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Die daraus resultierenden Maßabweichungen bedürfen einer differenzierten Diskussion, um die zugrundeliegenden Mechanismen weiter zu verstehen und die Auswirkungen auf die Bauteilqualität einzuordnen.

5.4 Untersuchung des Einflusses der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit

Aufbauend auf den Erkenntnissen über die Prozessparameter wird in diesem Kapitel untersucht, wie verschiedene Bauplattformpositionen die Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen beeinflussen. Im Fokus steht die Analyse der Maßhaltigkeit in X- und Y-Richtung sowie die Rolle des Schutzgasstroms in der Fertigungskammer. Der Abschnitt beleuchtet auch die Relevanz von thermischen Effekten, die durch die Positionierung auf der Bauplatte entstehen.

Methodik

Um den Einfluss der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit zu untersuchen, wurde die Bauplatte in neun Zonen unterteilt. Die Anordnung der Proben erfolgt in einem Raster, das sich aus drei Reihen und drei Spalten zusammensetzt. Die Anordnung der Proben auf der Bauplatte und die Strömungs- und Abzugsrichtung des Schutzgases sind in Abb. 26 dargestellt. Basierend auf der Anordnung der Prüfkörper befindet sich die Reihe 3 am weitesten vom Schutzgaseinlass entfernt, während sich die Reihe 1 am nächsten zum Schutzgaseinlass befindet. Der Druck des Schutzgasstroms beträgt am Einlass 0,2 bar.

Ergebnisse der Bauplattformuntersuchungen

Die Untersuchung analysiert die Abweichungen der Messergebnisse an unterschiedlichen Positionen auf der Bauplatte. Abb. 35 zeigt die Mittelwerte, die 2- σ -Standardabweichung

(95 %) sowie die maximale Abweichung für jedes Element zwischen den neun Prüfkörpern. Diese Darstellung ermöglicht eine präzise Bewertung der Stabilität und Präzision der Messungen über den gesamten Bauraum hinweg.

Die Standardabweichung (dargestellt als Fehlerbalken) dient als wichtiger Indikator für die Reproduzierbarkeit und Konsistenz der Messergebnisse. Bei den zylindrischen und sphärischen Geometrien, wie Stiften (DPp) und Halbkugeln (DKp), bleiben die Standardabweichungen über alle Positionen hinweg gering und liegen im Bereich von 0,02 mm bis 0,04 mm. Dies zeigt, dass diese Geometrien unabhängig von ihrer Platzierung auf der Bauplattform eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen.

Die Längenprüfkörper in X-Richtung (LA_X) zeigen jedoch eine größere Streuung. Besonders bei größeren Messabständen, wie LA_X_A1-A6 (30 mm Abstand) oder LA_X_A1-A8 (40 mm Abstand), steigt die Standardabweichung auf bis zu 0,26 mm. Dies deutet darauf hin, dass größere Distanzen anfälliger für thermische Einflüsse und Wiederholbarkeitsfehler sind, was sich negativ auf die Maßhaltigkeit auswirkt.

Die maximalen Abweichungen (s. Abb. 35) sind in der Abbildung mit roten Punkten dargestellt und zeigen die größten Differenzen zwischen den neun Bauraumpositionen. Für zylindrische Elemente wie Stifte (DPp) und Löcher (DPn) liegen die Abweichungen zwischen 0,014 mm und 0,029 mm. Ähnliche Werte wurden bei Halbkugeln und Kalotten (DKp, DKn) beobachtet, deren Abweichungen zwischen 0,017 mm und 0,031 mm liegen. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Präzision und Stabilität der Messungen bei diesen Geometrien.

Die Längenprüfkörper in X-Richtung (LA_X) weisen hingegen erneut deutlich höhere maximale Abweichungen von bis zu 0,158 mm auf. In Y-Richtung (LA_Y) sind die Abweichungen geringer, mit maximal 0,04 mm, was eine stabilere Fertigung und Messung in dieser Richtung nahelegt. Bei den Kreisringen (CA) liegen die maximalen Abweichungen zwischen 0,024 mm und 0,056 mm, wobei äußere Kreise eine höhere Sensitivität gegenüber Variationen zeigen.

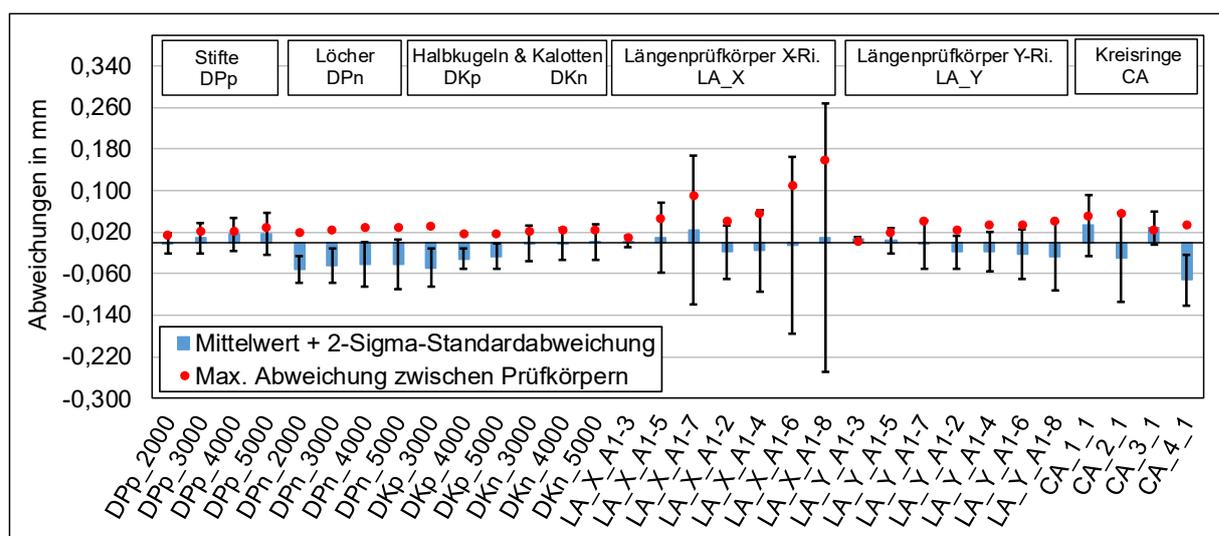


Abb. 35: Maximale Abweichungen und Standardabweichungen der Maßhaltigkeit der Geometrielemente in Abhängigkeit von den Bauplattformpositionen

Maßhaltigkeit in X- und Y-Richtung

Die Untersuchung der dimensional Genauigkeit in X- und Y-Richtung zeigt den Einfluss des Gasstroms auf die Maßhaltigkeit der gedruckten Bauteile. Wie in Abb. 36 dargestellt, weisen Elemente, die parallel zur Gasströmung in Y-Richtung ausgerichtet sind, im Durchschnitt geringere Maßabweichungen auf als solche, die senkrecht zum Gasstrom in X-Richtung gefertigt wurden. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass in X-Richtung größere thermische und mechanische Einflüsse auftreten könnten. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden für die Darstellung der Summen der absoluten Abweichungen (s. Abb. 36) für jedes Prüfelement (Längenprüfkörper, Stifte und Löcher, Halbkugeln und Kalotten) jeweils sieben Messdaten je Position im Bauraum einbezogen.

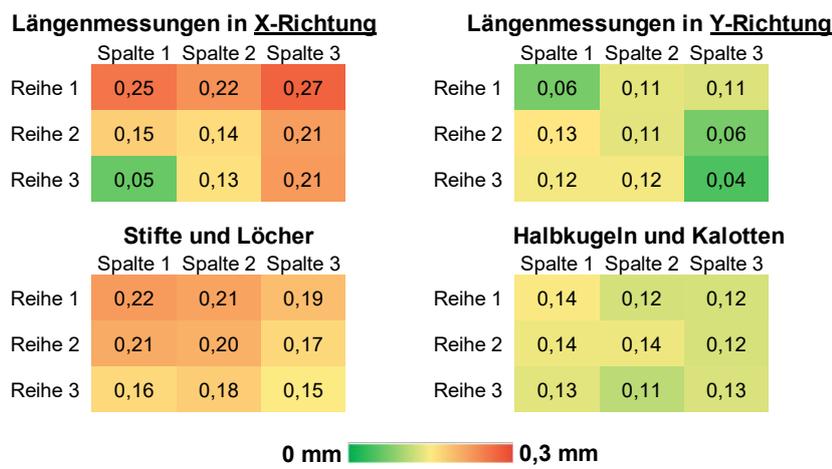


Abb. 36: Summe der absoluten Maßabweichungen in Abhängigkeit von den Bauplattformpositionen (jeweils sieben Messdaten je Prüfelement und Position im Bauraum)

Die Summe der absoluten Abweichungen in X-Richtung variiert zwischen 0,05 mm und 0,27 mm, wobei Prüfkörper, die näher am Schutzgaseinlass gefertigt wurden (Reihe 1), größere Abweichungen aufweisen. In Y-Richtung sind die Abweichungen im Vergleich zur X-Richtung geringer, gleichmäßiger über alle Zonen verteilt und zeigen keine Abhängigkeit von den Bauplattformpositionen.

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass der Gasstrom und die Orientierung der Bauteile einen wesentlichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit haben. Insbesondere senkrecht zur Strömung ausgerichtete Elemente (X-Richtung) zeigen größere Maßabweichungen, während eine parallele Ausrichtung zur Strömung (Y-Richtung) eine höhere Maßgenauigkeit begünstigt.

Die Ergebnisse (s. Abb. 36) verdeutlichen jedoch auch, dass die Bauplattformpositionen keinen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit von Geometrien wie Stifte, Löcher, Halbkugeln und Kalotten haben. Die Abweichungen dieser Elemente sind gleichmäßig verteilt und weitestgehend unabhängig von ihrer Position auf der Bauplattform.

Maßhaltigkeit in Reihen und Spalten

Die Untersuchung der Bauteilplatzierung in Bezug auf die Reihen und Spalten der Bauplattform zeigt ebenfalls signifikante Unterschiede. In den Heatmaps (s. Abb. 36) ist ein abnehmender Trend der Maßabweichungen bei den Längenprüfkörpern in X-Richtung von Reihe 1 (nah am Gaseinlass) zu Reihe 3 zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Entfernung zum Gaseinlass die Maßhaltigkeit positiv beeinflusst.

Die parallel zum Schutzgasstrom orientierten Elemente (Y-Richtung) zeigen eine homogenere Maßhaltigkeit, ohne signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Reihen und Spalten, was auf gleichmäßigere Bedingungen in dieser Richtung hinweist. Zudem weisen Bauteile in den linken Spalten der Bauplattform im Vergleich zu den rechten Spalten tendenziell größere Abweichungen auf (außer bei den Längenprüfkörpern in X-Richtung), was auf lokale Unterschiede im Gasfluss und der Temperaturverteilung hindeuten könnte.

Abb. 37 ergänzt die Analyse, indem die absoluten Maßabweichungen der verschiedenen Positionen nach Nennmaß und Toleranzklasse gemäß DIN 2769 dargestellt werden [248]. Die Ergebnisse zeigen, dass nahezu alle Abweichungen in der Toleranzklasse A (fein) liegen.

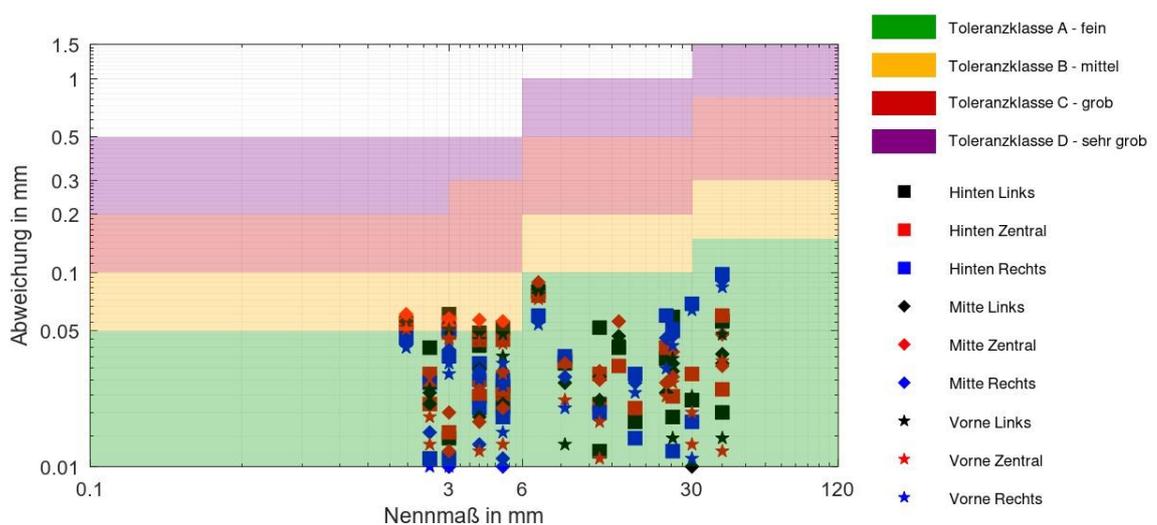


Abb. 37: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für unterschiedliche Bauplattformpositionen gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen für Längenmaße)

Einfluss der Bauplattformpositionen auf die Rauheit

Die Untersuchung der Oberflächenrauheit zeigt, dass die Bauplattformposition nur einen geringen Einfluss auf die Rauheit der gefertigten Bauteile hat. Abb. 38 stellt die Rauheitswerte (R_a) in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Oberflächen (SA) sowie von der Position der Bauteile auf der Bauplattform dar. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Rauheitsunterschiede zwischen den verschiedenen Positionen, insbesondere bei höheren Neigungswinkeln, vernachlässigbar sind. Unterschiede in der Rauheit sind vor allem bei flacheren Neigungswinkeln sichtbar, jedoch gleichen sich diese Unterschiede bei steileren Neigungswinkeln ($> 45^\circ$) an.

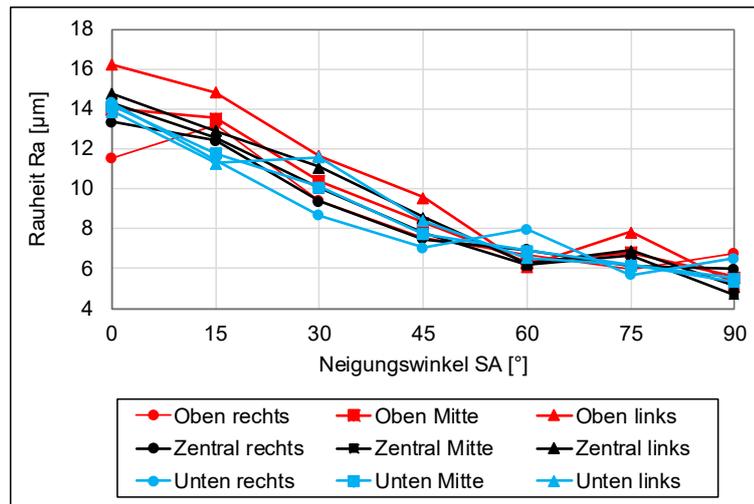


Abb. 38: Einfluss des Neigungswinkels und der Bauplattformpositionen auf die Oberflächenrauheit (R_a)

Die Messergebnisse verdeutlichen signifikante Abweichungen in der Maßhaltigkeit in Abhängigkeit von der Position der Prüfteile auf der Bauplattform sowie der Ausrichtung zum Schutzgasstrom. Diese Abweichungen, insbesondere in Bezug auf den Schutzgasstrom und die thermischen Einflüsse, bedürfen einer differenzierten Analyse der Stabilität und Strömungsbedingungen innerhalb des Bauraums, welche im Diskussionsteil näher betrachtet werden.

5.5 Reproduzierbarkeit

Eine der größten Herausforderungen in der AF ist die begrenzte Reproduzierbarkeit der gefertigten Bauteile (vgl. Kap. 2.8) [164,165,195]; d.h. wie stabil sind Ergebnisse, wenn identische Prozessbedingungen mehrfach reproduziert werden?

Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsmessungen

In dieser Studie wurden fünf Prüfkörper in fünf separaten Druckvorgängen mit identischen Parametern in der Mitte der Bauplattform gefertigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowohl von der gewählten Messmethode (s. Kap. 5.6.3) als auch von den Geometrien der Prüfkörper abhängt.

Abb. 39 zeigt die Abweichungen zwischen den fünf Prüfkörpern, wobei die Mittelwerte, 2- σ -Standardabweichungen sowie die maximale Abweichung zwischen den Prüfkörpern dargestellt sind. Dies erlaubt eine umfassende Analyse der Reproduzierbarkeit der Messungen über verschiedene Geometrien hinweg.

Die Standardabweichungen sind ein bedeutendes Maß, um die Reproduzierbarkeit zu beurteilen. Die geringe Streuung der Daten zeigt eine hohe Reproduzierbarkeit, insbesondere bei den einfacheren Geometrien wie den Stiften und Löchern (DPp, DPn) sowie Halbkugeln und Kalotten (DKp, DKn), bei denen die Standardabweichungen im Bereich von 0,004 mm bis 0,026 mm liegen. Diese Werte verdeutlichen, dass diese Geometrien hohe Reproduzierbarkeiten erzielen können.

Im Vergleich dazu weisen die Längenprüfkörper höhere Standardabweichungen auf, insbesondere bei größeren Messabständen wie LA_X_A1-A8 und LA_Y_A1-A8, bei denen die Standardabweichungen bis zu 0,038 mm betragen. Skalierungsfehler können bei größeren Messabständen einen stärkeren Einfluss haben und zu erhöhten Schwankungen führen (vgl. Abb. 31). Bei den Kreisringen (CA) fällt besonders bei den äußeren Kreisen (CA_1, CA_3) eine höhere Standardabweichung auf mit ca. 0,05 mm, was darauf hindeutet, dass diese spezifische Geometrie empfindlicher für Schwankungen während der Fertigung und Messungen ist. Insgesamt bleibt jedoch die Reproduzierbarkeit auch bei diesen komplexeren Geometrien innerhalb eines akzeptablen Rahmens.

Die roten Punkte in der Abbildung repräsentieren die maximale Abweichung zwischen den Prüfkörpern. Diese Werte sind besonders interessant, um die Stabilität der Fertigung und Messung zu bewerten. Bei den Stiften und Löchern (DPp, DPn) sowie Halbkugeln und Kalotten (DKp, DKn) liegen die maximalen Abweichungen zwischen 0,004 mm und 0,023 mm. Dies ist ein Hinweis darauf, dass diese Geometrien eine hohe Konsistenz zwischen den einzelnen Prüfkörpern aufweisen.

Die Längenprüfkörper (LA_X und LA_Y) zeigen, dass mit größeren Messabständen auch die maximalen Abweichungen steigen. Die Abweichungen betragen bis zu 0,038 mm in X-Richtung und 0,028 mm in Y-Richtung. Die größten Abweichungen sind bei den äußeren Kreisringen (CA_1, CA_3) aufgetreten mit 0,045 mm, während die max. Abweichungen bei den inneren Kreisringen (CA_2, CA_4) ca. 0,01 mm betragen.

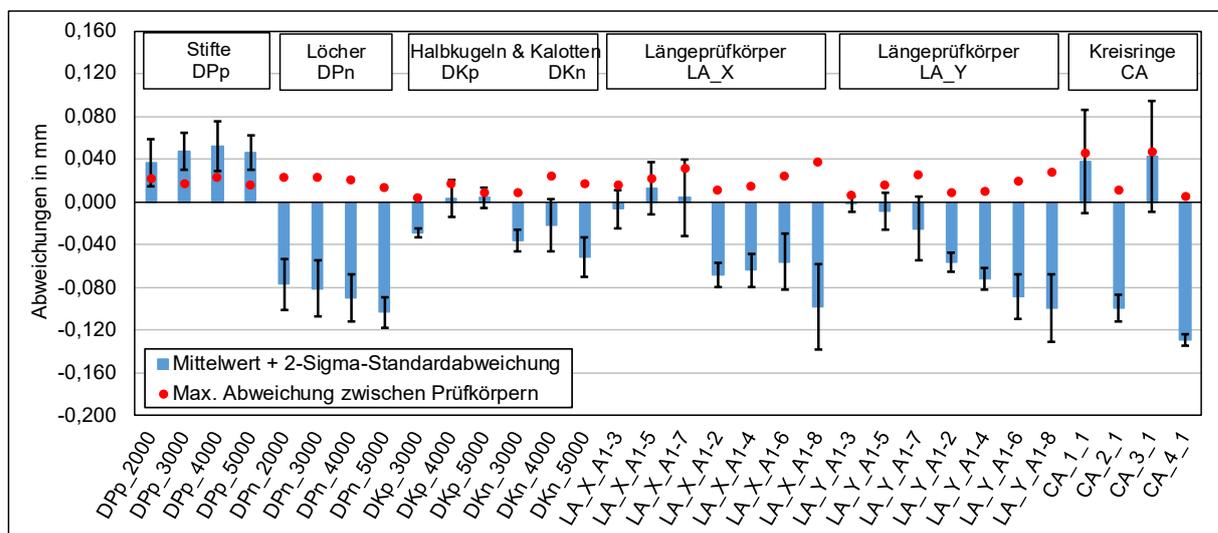


Abb. 39: Maximale Abweichungen und Standardabweichungen der Maßhaltigkeit der Geometrielemente in der Reproduzierbarkeitsstudie

Abb. 40 zeigt zudem alle gemessenen absoluten Maßabweichungen, sortiert nach Nennmaß und Toleranzklasse gemäß DIN 2769 [248]. Die Mehrheit der Maßabweichungen bei den fünf Prüfkörpern liegt für Nennmaße über 6 mm innerhalb der Toleranzklasse A „fein“. Bei den Elementen mit Nennmaßen bis 6 mm liegen die Abweichungen gleichmäßig verteilt in den Toleranzklassen A „fein“ und B „mittel“.

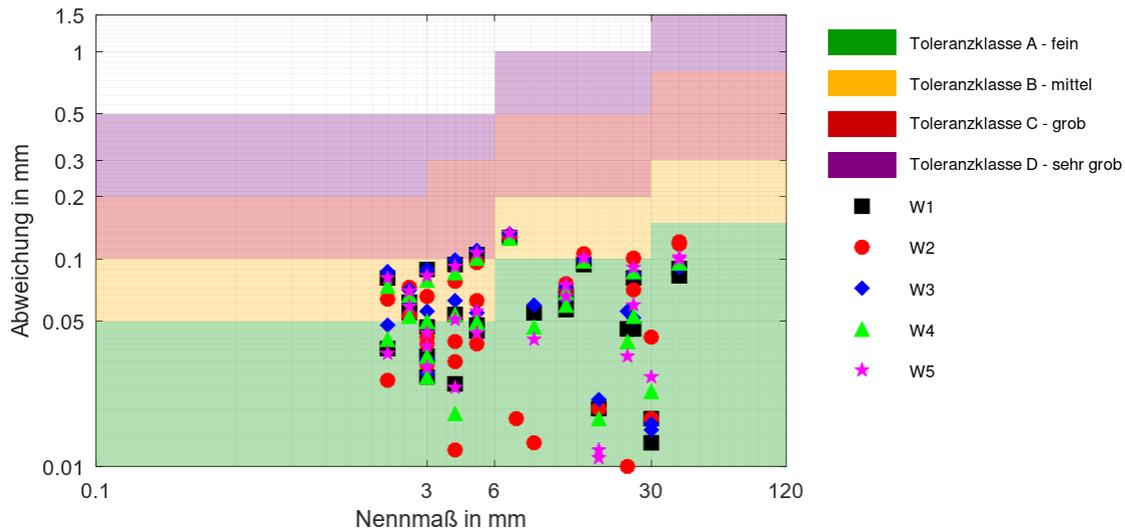


Abb. 40: Bewertung der Abweichungen vom Nennmaß für die Reproduzierbarkeitsstudie gemäß DIN 2769 (Allgemeintoleranzen)

Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und Reproduzierbarkeit

Die Rauheitswerte (R_a) für die Prüfkörper W1 bis W5 wurden bei Neigungswinkeln von 0° bis 90° gemessen und sind in Abb. 41 dargestellt. Mit zunehmendem Neigungswinkel verringert sich die Rauheit deutlich. Bei einem Neigungswinkel von 0° liegen die Rauheitswerte für alle Prüfkörper zwischen $14,7 \mu\text{m}$ und $15,2 \mu\text{m}$. Bei einem Neigungswinkel von 45° sinken die Rauheitswerte auf einen Bereich von $6,9 \mu\text{m}$ bis $7,4 \mu\text{m}$, und ab 60° stabilisieren sie sich auf einem Niveau zwischen $5,4 \mu\text{m}$ und $6,4 \mu\text{m}$.

Die Streuung der Rauheitswerte bleibt zwischen den Prüfkörpern bei allen Neigungswinkeln gering. So beträgt bei einem Neigungswinkel von 45° die maximale Differenz der Rauheitswerte $0,4 \mu\text{m } R_a$. Diese Konsistenz in den Ergebnissen deutet auf eine hohe Reproduzierbarkeit und Stabilität des Fertigungsprozesses hin. Die Standardabweichung der Rauheit liegt im Bereich von $0,16 \mu\text{m}$ bis $0,68 \mu\text{m}$.

Die minimalen Abweichungen zwischen den Prüfkörpern, die unter identischen Parametern gefertigt wurden, belegen die Konsistenz und Reproduzierbarkeit des Prozesses. Dadurch wird eine verlässliche Vorhersage der Rauheitswerte bei verschiedenen Neigungswinkeln sowie eine stabile Oberflächenqualität gewährleistet.

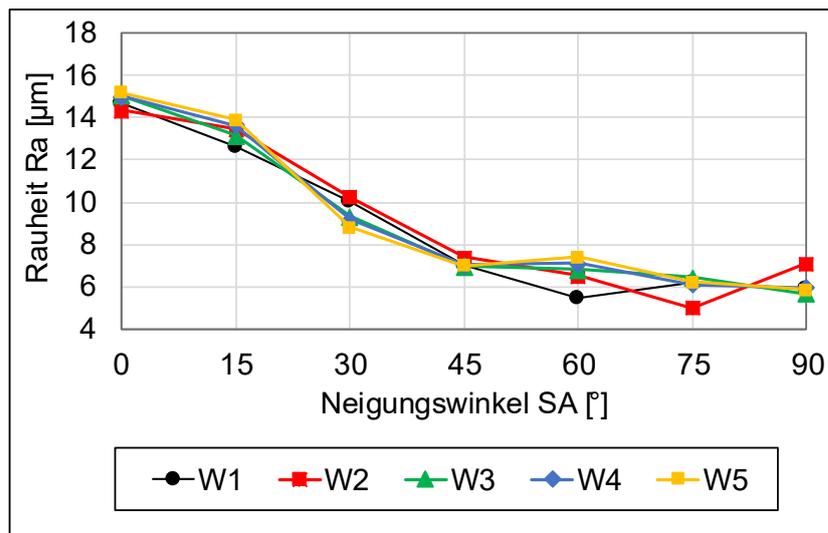


Abb. 41: Einfluss des Neigungswinkels auf die Oberflächenrauheit (R_a) bei verschiedenen Wiederholungsmessungen

Die durchgeführten Maßhaltigkeitsmessungen zur Reproduzierbarkeit zeigen leichte Variationen, die durch systematische und zufällige Einflüsse verursacht werden können. Um die Ursachen dieser Abweichungen besser zu verstehen, wird in der nachfolgenden Diskussion eine detaillierte Untersuchung der Einflussfaktoren vorgenommen.

5.6 Diskussion

5.6.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit

Die ausgewerteten Ergebnisse zu den Prozessparametern zeigen, dass insbesondere die Laserleistung und Scangeschwindigkeit entscheidend die Maßhaltigkeit beeinflussen. Die zugrunde liegenden Mechanismen und deren Auswirkungen auf den Fertigungsprozess werden in der folgenden Diskussion untersucht und bewertet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass die Laserleistung und Scangeschwindigkeit nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch die Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen fundamental beeinflussen. Insbesondere höhere Laserleistungen, wie die in dieser Untersuchung verwendeten 450 W, führen zu höheren Maßabweichungen. Die Laserleistung bestimmt dabei maßgeblich die Schmelztiefe und -breite des Pulverbettes sowie den Wärmeeintrag in das Material. Eine höhere Laserleistung kann die Schmelztiefe und -breite erhöhen, den Abstand zwischen den Pulverpartikeln reduzieren und Schmelzfehler minimieren. Gleichzeitig birgt sie jedoch das Risiko von Schmelzbadinstabilitäten und Gaseinschlüssen, die durch übermäßigen Wärmeeintrag entstehen können. Der erhöhte Wärmeeintrag erzeugt ein tieferes und breiteres Schmelzbad, wodurch während der Abkühlung und Erstarrung thermische Spannungen und Schrumpfungseffekte entstehen, die Verformungen und Geometrieabweichungen im Bauteil zur Folge haben [249–252]. Diese Beobachtungen korrelieren mit den Ergebnissen von Charles et al. [106], die ebenfalls zeigen, dass hohe Laserleistungen die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität beeinträchtigen können. Darüber hinaus führt der intensive Wärmeeintrag

zu einer Vergrößerung der Mikrostruktur, was neben der Maßhaltigkeit auch die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität negativ beeinflusst [88,90].

Eine höhere Scangeschwindigkeit hat hingegen einen positiven Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Durch die schnellere Bewegung des Lasers wird die Einwirkzeit des Wärmeeintrags reduziert, was zu einem kleineren und stabileren Schmelzbad führt, wodurch thermische Spannungen und der daraus resultierende Verzug reduziert werden. In dieser Studie zeigten Prüfkörper, die mit einer höheren Scangeschwindigkeit von 1600 mm/s gefertigt wurden, geringere Abweichungen im Vergleich zu denen, die mit einer niedrigeren Geschwindigkeit von 800 mm/s hergestellt wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Laser bei niedrigen Scangeschwindigkeiten länger auf dem Pulver einwirkt, was eine instabilere Schmelzbadbildung und eine erhöhte Verformungsanfälligkeit begünstigt. Wang et al. [250] bestätigen, dass geringere Scangeschwindigkeiten zu einer höheren Abweichungen führen können, da die Abkühlzeit verlängert wird und somit die Gefahr von thermischem Verzug steigt [250,251].

Bagci et al. [9] ergänzen diese Erkenntnisse, indem sie aufzeigen, dass Laserleistungen bis zu einem gewissen Schwellenwert, z. B. 370 W, in Kombination mit einer geeigneten Scangeschwindigkeit (1600 mm/s) zu höheren Maßhaltigkeiten führen können, da weniger thermische Spannungen entstehen. Sie betonen jedoch, dass die Geometrie der Bauteile, insbesondere bei komplexen oder überhängenden Strukturen, eine bestimmende Rolle bei der Wahl der Parameter spielt.

Ein weiterer zentraler Aspekt dieser Arbeit war die Untersuchung des Spannungsfeldes zwischen Maßhaltigkeit und Materialdichte. Es zeigte sich, dass die Parameterkombination aus 250 W Laserleistung, 1600 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurabstand von 0,2 mm (Parameter 4) zwar minimale Maßabweichungen erzielte, jedoch eine Porosität von etwa 6 % aufweist. Dies stimmt mit den Erkenntnissen aus den Grundlagenuntersuchungen (Kap. 4) überein und unterstreicht, dass bei einer Optimierung der Maßhaltigkeit häufig Kompromisse bei der Materialdichte eingegangen werden müssen, was für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Dichte problematisch sein kann.

In der in Kap. 5.7 durchgeführten Zielgrößenoptimierung werden daher zwei Ansätze mit unterschiedlichen Anforderungen verfolgt: Zum einen die Fokussierung auf maximale Maßgenauigkeit, um ausschließlich geometrische Abweichungen zu reduzieren. Zum anderen wurde ein ausgewogener Ansatz angestrebt, der sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Materialdichte berücksichtigt. Hierbei wurden die Laserleistung und Scangeschwindigkeit so angepasst, dass die Porosität reduziert und gleichzeitig eine hohe Maßhaltigkeit gewährleistet werden konnte.

Einfluss der Prozessparameter auf die Rauheit

Die Untersuchung der Rauheitswerte zeigt, dass die Prozessparameter einen geringeren Einfluss auf die Rauheit haben als auf die Maßhaltigkeit. Im Vergleich zu den von Charles et al. [253] beobachteten Rauheitswerten sind die in der vorliegenden Studie gemessenen Rauheiten auf nach oben gerichteten Flächen (s. Abb. 24) deutlich niedriger und weisen geringere Schwankungen auf. Während Charles et al. [253] besonders bei nach unten gerichteten Flächen, speziell bei 45°-Oberflächen, erhebliche Schwankungen in der Rauheit

feststellten, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit insgesamt homogenere und stabilere Rauheitswerte.

Die in dieser Arbeit beobachteten geringeren Rauheitswerte lassen sich durch die unterschiedliche Orientierung der gemessenen Flächen erklären. Während an nach unten gerichteten Flächen die Schwerkraft und unzureichende Materialunterstützung zu größeren Rauheitsabweichungen führen, konzentriert sich diese Studie auf nach oben gerichtete Flächen, die stabilere Bedingungen für die Schichtbildung bieten. Diese Flächen profitieren von einer stärkeren Unterstützung durch das darunterliegende Material, was zu geringeren Rauheitswerten führt. Speziell auf den 45°-Flächen, auf die sich Charles et al. [253] fokussierten, war die Rauheit in ihren Ergebnissen deutlich höher, was mit dem erhöhten Risiko von Schmelzbadinstabilitäten und der dadurch bedingten Dross- und Spritzerbildung zusammenhängt. Im Vergleich zu Charles et al. [253], die oft Rauheitswerte von über R_a 20 μm beobachteten, sind die in dieser Studie gemessenen Werte eindeutig niedriger (max. R_a 12 μm bei 45°-Flächen). Zudem ist die Streuung der Ergebnisse in dieser Arbeit geringer, was auf eine stabilere Prozessführung bei nach oben gerichteten Flächen hinweist.

5.6.2 Untersuchung des Einflusses der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Positionierung der Bauteile im Bauraum die Maßhaltigkeit bestimmter Elemente, insbesondere der Längenprüfkörper in X-Richtung, signifikant beeinflusst. Dieser Effekt ist eng mit dem Einfluss des Schutzgasstroms verknüpft. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer gleichmäßigen Gasstromführung über den gesamten Bauraum, um konsistente Druckergebnisse zu gewährleisten [254]. In der nachfolgenden Diskussion werden die zugrunde liegenden Mechanismen analysiert, um ein besseres Verständnis der beobachteten Abweichungen zu gewinnen.

Maßhaltigkeit in X- und Y-Richtung

Die Untersuchung der Maßgenauigkeit in X- und Y-Richtung verdeutlicht den Einfluss des Gasstroms auf die Bauteilgenauigkeit. Wie Veetil et al. [10] darlegen, weisen Elemente oder Bauteile, die in X-Richtung (senkrecht zum Gasstrom) orientiert sind, größere Abweichungen auf als Elemente, die parallel (Y-Richtung) zum Gasstrom gefertigt werden. Demnach wirkt der Gasstrom als treibende Kraft auf die Erstarrung in der Schmelzzone. Die konvektive Wirkung des Schutzgases beeinflusst die Erstarrung im Schmelzbad und führt zu einer stärkeren Kühlung, was Abweichungen begünstigen kann.

Im Gegensatz zu Veetil et al. [10] zeigen die zylindrischen Elemente in der vorliegenden Studie unabhängig von ihrer Bauplattformposition ähnliche Abweichungen, was auf einen geringeren Einfluss der Positionierung bei diesen Elementen hinweist. Allerdings sind die Maßabweichungen bei den Längenprüfkörpern in X-Richtung deutlich ausgeprägter.

Zusätzlich trägt der Gasstrom bei parallel ausgerichteten Oberflächen zu einer gleichmäßigen Pulververteilung bei, während bei senkrecht ausgerichteten Oberflächen vermehrter Materialabtrag auftreten kann. Dies kann wiederum geringere Maßabweichungen begünstigen [105].

Maßhaltigkeit in Reihen und Spalten

Die vorliegende Arbeit unterstreicht die zentrale Bedeutung des Gasstroms im PBF/LB-M-Prozess als wesentliche Einflussgröße auf das Schmelzbad und dessen Erstarrung. In diesem thermisch hochdynamischen Verfahren erfolgen Schmelzen und Erstarren innerhalb von Sekundenbruchteilen. Der Schutzgasstrom spielt hierbei eine Schlüsselrolle, indem er Wärme entlang des Laserpfads abtransportiert. Dies führt zu einer beschleunigten Abkühlung des aufgeschmolzenen Materials und beeinflusst somit die Maßhaltigkeit [163,254]. Studien von Lee et al. [255] zeigen zudem, dass höhere Schutzgasgeschwindigkeiten mit einer verminderten Maßhaltigkeit korrelieren.

Darüber hinaus hat der Gasstrom einen wesentlichen Einfluss auf den Materialabtrag, insbesondere durch den Denudationseffekt (Pulververarmung). Matthews et al. [114] stellten fest, dass der durch Verdampfung im Bereich der Laser-Pulver-Interaktion entstehende Dampfstrahl eine Unterdruckzone erzeugt, die Umgebungsgas und Pulverpartikel mit sich reißt. Diese verdampfungsinduzierte Gasströmung führt dazu, dass Pulverpartikel vom Pulverbett abgetragen werden, wodurch sich eine denudierte (pulververarmte) Zone auf beiden Seiten der Schmelzspur bildet [256]. Untersuchungen ergeben, dass die Hauptursache für die Denudation des Pulvers in der Nähe einer einzelnen Schmelzspur das Mitreißen von Pulvern durch den Gasstrom ist [250]. Dieser Effekt trägt zur Bildung von Hohlraumdefekten und ungleichmäßigen Schichten bei und beeinflusst letztendlich die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität. Die induzierte Schutzgasströmung bringt auch nach Abkühlung des Schmelzbades weiterhin Pulverpartikel in den laserbelichteten Bereich ein. Diese Partikel schmelzen daher nicht vollständig und können eine zusätzliche Quelle für Oberflächenrauheit und Porosität sein [114].

Untersuchungen von Veetil et al. [10] und Charles et al. [105] bestätigen ebenfalls, dass die Abweichungen mit zunehmender Entfernung zur Gaszufuhr geringer werden. Dies weist darauf hin, dass der Gasstrom einen gezielten Kühleffekt auf das Schmelzbad ausübt, wobei atmosphärische Bedingungen sowie Temperatur- und Abkühlungsgradienten im Bauvolumen eine entscheidende Rolle spielen. Die Platzierung der Bauteile auf der Bauplattform in Relation zur Gasströmung hat somit einen direkten Einfluss auf die Maßhaltigkeit.

Im Gegensatz dazu zeigt die Arbeit von Schmitt et al. [11], dass keine eindeutige Korrelation zwischen dem Gasstrom und der Maßhaltigkeit besteht. Ihre Untersuchung ergab, dass die Abweichungen in X-Richtung zwischen 0 mm und 0,05 mm variieren, jedoch auf der dem Gasstrom abgewandten Seite höhere Abweichungen von 0,05 mm bis 0,1 mm auftreten. Diese Ergebnisse widersprechen der Annahme, dass der Gasstrom auf der Gaszufuhr nahen Seite zu höheren Abweichungen führt.

Zongo et al. [257] führten anhand von 49 Zylindern, die in drei Durchläufen über die gesamte Bauplattform gedruckt wurden, eine Studie zur Untersuchung der Bauplattformpositionen und der Reproduzierbarkeit durch und stellten fest, dass es kein festes Muster für Abweichungen innerhalb der Baukammer in X- und Y-Richtung gibt. Die Standardabweichungen lagen bei 0,054 mm für den ersten Druckdurchlauf, 0,025 mm für den zweiten Durchlauf und 0,038 mm für den dritten Durchlauf. In der vorliegenden Arbeit war der Einfluss des Schutzgases auf zylindrische Elemente ebenfalls gering.

Zudem untersuchten Berez et al. [258] den Laserstrahlversatz über die gesamte Bauplattform anhand einfacher Geometrien wie Linien und Spuren. Sie zeigten, dass Fokusabweichungen von bis zu $\pm 1,7$ mm über den Bauraum auftreten und die Schmelztiefe sowie Mikrostruktur beeinflussen können. Solche Abweichungen wurden auf optomechanische Fehljustierungen zurückgeführt. Ein Fokusversatz konnte in dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Stattdessen sind die beobachteten Maßabweichungen primär auf den Einfluss des Schutzgasstroms und die dadurch induzierten thermischen Effekte zurückzuführen.

Einfluss der Bauplattformpositionen auf die Rauheit

Die Auswirkungen der Bauplattformposition auf die Oberflächenrauheit wurden in zahlreichen Studien untersucht. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit korrelieren mit den Beobachtungen von Morvayova et al. [113] und Guzanova et al. [161], die zeigen, dass die Bauplattformpositionen keinen signifikanten Einfluss auf die Rauheit haben.

Morvayova et al. [113] stellten fest, dass die Oberflächenrauheit trotz leichter Schwankungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauplattformpositionen aufwies. Sie führten die beobachteten Unterschiede hauptsächlich auf lokale thermische Effekte zurück. Ähnliche Ergebnisse wurden von Guzanova et al. [161] berichtet, die Ti6Al4V-Bauteile untersuchten. Ihre Messungen ergaben Rauheitswerte im Bereich von R_a 10 μm - 14 μm und R_z 52 μm - 70 μm , unabhängig von der Position auf der Bauplattform.

Im Gegensatz dazu berichteten Gautam et al. [259] von einem klaren Einfluss der Bauplattformposition auf die Oberflächenrauheit. Ihre Untersuchungen zeigten, dass die Rauheitswerte mit zunehmender Entfernung von der Gaszufuhr abnahmen, während Bauteile in der Nähe der Gaszufuhr höhere Rauheitswerte aufwiesen. Diese Unterschiede wurden auf den beschleunigten Erstarrungsprozess in der Nähe der Gaszufuhr sowie auf eine ungleichmäßige Pulverschichtdicke durch den Beschichter zurückgeführt.

5.6.3 Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit ergab, dass selbst bei identischen Druckparametern geringe Abweichungen zwischen den Messergebnissen mehrerer Prüfkörper beobachtet werden können. Diese Abweichungen sind auf prozessbedingte Schwankungen zurückzuführen, die durch verschiedene Einflussfaktoren wie Temperaturgradienten, Skalierungsfehler und Materialverteilung entstehen können. Während sich der Großteil der bisherigen Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit auf die Materialeigenschaften konzentrierte, fehlt es an systematischen Studien zur Maßgenauigkeit [195]. Im Folgenden werden die zentralen Ursachen sowie die wichtigsten Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit von AF-Bauteilen diskutiert.

Schmitt et al. [11] führten eine Studie durch, bei der vier Zahnräder in 21 Fertigungsläufen gedruckt und anhand der Innen- und Außendurchmesser (39,6 mm bzw. 101 mm Durchmesser) ausgewertet wurden. Die inneren Bohrungsdurchmesser zeigten maximale Abweichungen von 0,65 mm, während die äußeren Kopfkreisdurchmesser max. Abweichungen von 0,9 mm aufwiesen. Die Messungen wurden mit einem Messschieber durchgeführt.

In dieser Arbeit wurden jeweils 12 Innendurchmesser (15 mm und 7 mm) sowie 12 Außendurchmesser (23,5 mm und 9 mm) bei Prüfkörpern aus fünf Fertigungsläufen mit einem KMG-System gemessen. Die maximalen Abweichungen lagen bei 0,05 mm für die Innendurchmesser und 0,063 mm für die Außendurchmesser, mit einer Reproduzierbarkeit von 0,05 mm für die Innendurchmesser und 0,01 mm für die Außendurchmesser. Die geringeren Abweichungen und die höhere Reproduzierbarkeit sind auf die höhere Präzision des Fertigungsprozesses und des KMG-Systems im Vergleich zum Messschieber zurückzuführen. Das KMG weist eine maximal zulässige Längenmessabweichung ($E_{L,MPE, KMG}$) von $0,6 \mu\text{m} + L / (400 \text{ mm}/\mu\text{m})$ auf.

Ahmed et al. [165] führten bidirektionale Längenmessungen von 56 mm mit einem Messschieber durch, wobei die maximale Abweichung 0,027 mm und die Reproduzierbarkeit 0,0197 mm betrug. In der vorliegenden Arbeit wurden acht bidirektionale Abstände zwischen 2,5 mm und 40 mm in fünf Fertigungsläufen gemessen. Die maximalen Abweichungen lagen zwischen 0,038 mm und 0,09 mm, mit einer Reproduzierbarkeit von 0,032 mm.

Der Vergleich der Messsysteme zeigt deutliche Unterschiede in der Messgenauigkeit. Während Schmitt et al. [11] und Ahmed et al. [165] Messschieber verwendeten, kam in der vorliegenden Arbeit ein präziseres KMG-System zum Einsatz. Die höhere Messunsicherheit des Messschiebers führt zu größeren Abweichungen und einer geringeren Reproduzierbarkeit im Vergleich zu den mit dem KMG-System erzielten Ergebnissen. Die Arbeiten von Schmitt et al. und Ahmed et al. weisen daher eine deutlich höhere Unsicherheit auf, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation sind keine weiteren Studien bekannt, die die Reproduzierbarkeit der Maßhaltigkeit anhand mehrerer Prüfelemente untersucht haben. Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit den verfügbaren Literaturdaten ist in Tab. 19 dargestellt, um die gewonnenen Erkenntnisse zu einzuordnen.

Tab. 19: Vergleich von Arbeiten zur Reproduzierbarkeit der Maßhaltigkeitsuntersuchungen für unterschiedliche Geometrielemente

| | Innendurchmesser (\varnothing) | Außendurchmesser (\varnothing) | Bidirektionale Längenmessung |
|--|---|--|--|
| Messlänge | 39,60 mm (Schmitt et al.); 15 mm, 7 mm (Krasniqi) | 101,00 mm (Schmitt et al.); 23,5 mm, 9 mm (Krasniqi) | 56 mm (Ahmed et al.); 2,5 mm – 40 mm (Krasniqi) |
| Gemessene Messlängen pro Druckauftrag | 4 Innendurchmesser (Schmitt et al.); 12 Innendurchmesser (Krasniqi) | 4 Außendurchmesser (Schmitt et al.); 12 Außendurchmesser (Krasniqi) | 12 Messlängen (Ahmed et al.); 6 Messlängen (Krasniqi) |
| Anzahl Druckaufträge | 21 (Schmitt et al.); 5 (Krasniqi) | 21 (Schmitt et al.); 5 (Krasniqi) | 4 (Ahmed et al.); 5 (Krasniqi) |
| Messsystem | Mitutoyo Messschieber (Schmitt et al. & Ahmed et al.); KMG Hexagon Reference HP 10.7.6 (Krasniqi) | | |
| maximal zulässige Längenmessabweichung (MPE_E , $E_{L,MPE}$) | Messschieber: $MPE_E = 20 \mu\text{m}$ (Angabe in [165]) KMG: $E_{L,MPE} = 0,6 \mu\text{m} + L / (400 \text{ mm}/\mu\text{m})$, mit L in mm | | |
| Reproduzierbarkeit (σ_r) | 0,3 mm (Schmitt et al.); 0,05 mm (Krasniqi) | 0,01 mm (Krasniqi) | 0,0197 mm (Ahmed et al.); 0,09 mm - 0,032 mm (Krasniqi) |
| Abweichung Literatur | 0,65 mm (Schmitt et al.) | 0,9 mm (Schmitt et al.) | 0,027 mm (Ahmed et al.) |
| Abweichung Krasniqi | 0,05 mm | 0,063 mm | 0,09 mm - 0,038 mm (Krasniqi) |

Eine weitere relevante Untersuchung zur Reproduzierbarkeit wurde von Caravella et al. [260] durchgeführt, in der CuCrZr-Würfelproben (9 mm × 9 mm × 9 mm) in mehreren Druckprozessen mit identischen Parametern gefertigt wurden, um die Oberflächenrauheit zwischen den Durchläufen zu vergleichen.

Die Ergebnisse von Caravella et al. zeigen, dass die Rauheitswerte S_a innerhalb eines Drucks konstant bleiben, jedoch zwischen verschiedenen Durchläufen erhebliche Variationen aufweisen. So lagen die S_a -Werte in den drei Durchläufen bei 19,4 μm , 26,6 μm und 30,5 μm , was einer Abweichung von etwa 50 % entspricht. Ähnliche Schwankungen wurden auch bei der maximalen Höhe (S_z) beobachtet. Dies verdeutlicht, dass selbst bei konstanten Prozessparametern prozessbedingte Schwankungen zwischen den Druckvorgängen vorliegen können.

Im Vergleich dazu weist die vorliegende Arbeit eine höhere Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit auf. So betragen die Schwankungen zwischen den Druckaufträgen in der vorliegenden Arbeit nur etwa 3 % - 10 % (s. Tab. 20). Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse über verschiedene Durchläufe hinweg ist somit wesentlich stabiler.

Tab. 20: Vergleich von Arbeiten zur Reproduzierbarkeit der Oberflächenrauheitswerte bei 0° Neigungswinkel

| Fertigungslauf | S _a [0°] [μm] [260] | R _a [0°] [μm] (Krasniqi) | S _z [0°] [μm] [260] | R _z [0°] [μm] (Krasniqi) |
|-------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| 1 | 30,5 | 14,71 | 313,5 | 81,75 |
| 2 | 34,1 | 14,33 | 340,3 | 82,70 |
| 3 | 38,9 | 15,03 | 351,2 | 80,13 |
| Max. Abweichung in % | 27,5 % | 4,8 % | 12,0 % | 3,2 % |

Eine mögliche Ursache für die Abweichungen zwischen den fünf Prüfkörpern in dieser Arbeit könnte die Wiederverwendung von recyceltem Metallpulver sein. Durch das Recycling können sich die physikalischen Eigenschaften des Pulvers verändern, was die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität der gedruckten Bauteile beeinträchtigt. Selbst bei identischen Druckparametern können Änderungen in der Partikelgröße und -verteilung die Fließeigenschaften und die Packungsdichte des Pulvers beeinflussen. Zudem besteht das Risiko, dass während der wiederholten Druckprozesse Oxidation und Verunreinigungen auftreten, die die Schmelz- und Erstarrungseigenschaften des Pulvers negativ beeinflussen. Dies kann zu Defekten wie Porosität führen und eine ungleichmäßige Schichtdicke erzeugen. Wiederholte thermische Zyklen während des Druckprozesses können zudem die Morphologie der Pulverpartikel verändern, was zu Inhomogenitäten in den gedruckten Bauteilen führt. Daher sind regelmäßige Qualitätskontrollen und Anpassungen der Druckparameter notwendig, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten [165,261–263].

Neben dem Einsatz von recyceltem Pulver können auch andere Faktoren Maßabweichungen bei identisch gedruckten Bauteilen verursachen. Zu diesen zählt insbesondere die Stabilität der Prozessparameter. Selbst bei nominal identischen Einstellungen können minimale Schwankungen in der Laserleistung oder Veränderungen des Laserfokus auftreten, die die Energieeinbringung und die Schmelzbadgröße beeinflussen. Dies wirkt sich direkt auf die Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile aus.

Zudem können Veränderungen in der Maschinenkalibrierung eine Rolle spielen. Regelmäßige Kalibrierungen sind notwendig, um die Präzision des Druckprozesses sicherzustellen. Geringe Abweichungen in der Kalibrierung können zu Fehlern in der Positionierung des Lasers führen, was wiederum variierende Ergebnisse verursacht. Positionsfehler können die Konsistenz der Bauteile beeinträchtigen, selbst wenn die übrigen Parameter unverändert bleiben (vgl. Anpassung des Strahlversatzes und der X-Y-Achsenkalibrierung, Kap. 5.2.1).

Die Studie von Schmitt et al. [11] bestätigt diese Erkenntnisse und zeigt, dass sich die Maßhaltigkeit der Bauteile über mehrere Druckvorgänge hinweg verändert. In einer Studie von 21 Druckprozessen zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurden die Abweichungen in drei Cluster kategorisiert, wobei das zweite Cluster die höchsten Abweichungen aufwies.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass selbst bei gleichbleibenden Prozessparametern systematische Veränderungen auftreten können, was die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Prozessüberwachung und -kontrolle betont.

Vergleich zwischen Reproduzierbarkeit und Bauplattformposition

Die Analyse der Standardabweichungen aus den Studien zur Reproduzierbarkeit und den Bauplattformpositionen ermöglicht eine vertiefte Bewertung des Einflusses der Bauraumpositionen auf die Maßhaltigkeit der Prüfkörper. Zeigen die Standardabweichungen für bestimmte Elemente in beiden Studien ähnliche Werte, deutet dies darauf hin, dass die Position der Bauteile im Bauraum nur einen geringen Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat. Abb. 42 zeigt einen direkten Vergleich der Standardabweichungen beider Studien und unterstützt diese Einschätzung.

Die Stifte und Löcher (DPP und DPn) und die Halbkugeln und Kalotten (DKp und DKn) zeigen in beiden Untersuchungen ähnliche Standardabweichungen, die sich im Bereich von ca. 0,01 mm bis 0,04 mm bewegen. Bei der Bauplattformstudie sind die Standardabweichungen im Schnitt jedoch um 0,014 mm höher als bei der Studie zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit. Dies deutet darauf hin, dass die Bauplattformposition für diese Geometrien nur einen geringen Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat und sie unabhängig von der Position eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen.

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei den Längenprüfkörpern in X-Richtung (LA_X) ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Studien. Hier sind die Standardabweichungen in der Bauplattformpositionsstudie deutlich höher (bis zu 0,26 mm) im Vergleich zur Reproduzierbarkeitsstudie, in der sie wesentlich geringer ausfallen (0,01 mm bis 0,04 mm). Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass Abstände in X-Richtung (senkrecht zum Gasstrom orientiert) stark vom Gasstrom beeinflusst werden und dies einen erheblichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat.

Im Gegensatz dazu sind die Differenzen der Längenprüfkörper in Y-Richtung (LA_Y) verglichen mit der Reproduzierbarkeitsstudie erheblich geringer. Dies unterstreicht erneut, dass die Bauplattformposition bei Elementen, die parallel zur Strömungsrichtung des Schutzgases gefertigt wurden, einen geringeren Einfluss auf die Maßhaltigkeit ausübt (vgl. Kap. 5.4).

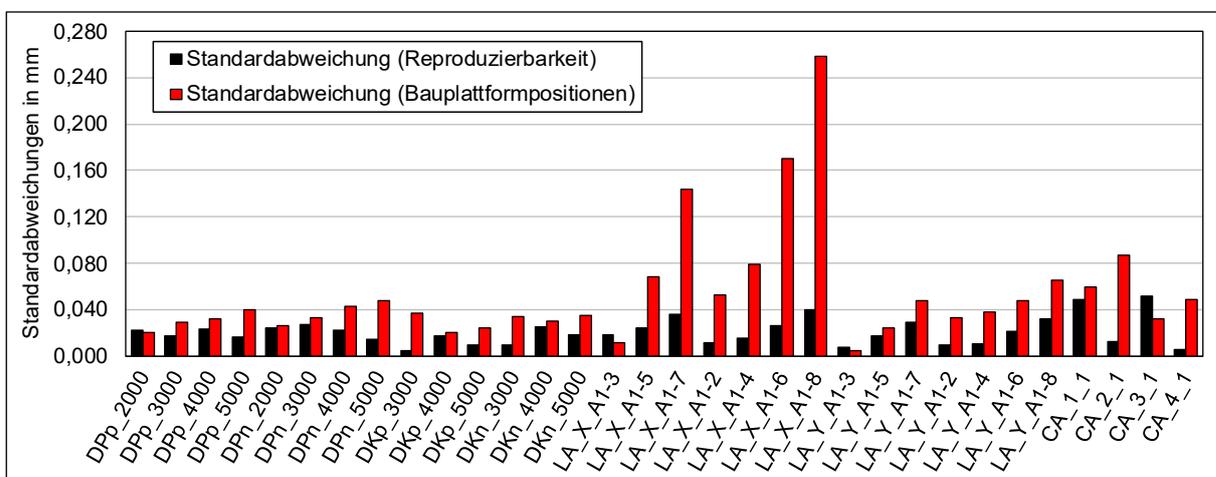


Abb. 42: Standardabweichungen für die Studien zur Reproduzierbarkeit und Bauplattformpositionen

5.7 Zielgrößenoptimierung

Wie bei den Materialeigenschaften (s. Kap. 4.4), ist die Optimierung der Zielgrößen von elementarer Bedeutung, um eine Balance zwischen Maßhaltigkeit, Materialdichte und weiteren Qualitätskriterien zu erreichen. In diesem Kapitel wird eine Optimierungsstrategie für die Prozessparameter im PBF/LB-M-Prozess basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Untersuchungen ausgelegt. Ziel ist es, ideale Prozessparameter zu identifizieren, um die Anforderungen an Maßhaltigkeit und Materialdichte zu erfüllen, wobei die Auswirkungen einer modifizierten Bauteilorientierung ebenfalls untersucht werden.

5.7.1 Optimierung der Prozessparameter und Zielgrößen zur Steigerung der Maßhaltigkeit und Materialdichte

Die Zielgrößenoptimierung umfasst drei verschiedene Prüfkörper, die unterschiedliche Anforderungen adressieren. Ziel ist es, spezifische Zielgrößen wie Maßhaltigkeit und Dichte zu optimieren (s. Tab. 21).

Fokussierung auf die Maßhaltigkeit:

Für diesen Prüfkörper liegt der Schwerpunkt auf der Reduzierung geometrischer Abweichungen. Mithilfe der statistischen Zielgrößenoptimierung wurde eine Kombination aus 260 W Laserleistung, 1500 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurabstand von 0,16 mm identifiziert, um minimale Maßabweichungen zu erzielen. Allerdings wurde bei Vorversuchen (Parameter P4, s. Kap. 5.6.1) bei ähnlicher Parametereinstellung eine Porosität von etwa 6 % festgestellt, was für Anwendungen, bei denen eine hohe Dichte gefordert ist, nicht akzeptabel ist. Daher dient dieser Prüfkörper primär der Optimierung der Maßhaltigkeit, ohne die Materialdichte als zentrale Anforderung zu berücksichtigen.

Balance zwischen Maßhaltigkeit und Dichteanforderungen:

Der zweite Prüfkörper wird gefertigt, um sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Dichteanforderungen zu erfüllen. Basierend auf der Zielgrößenoptimierung werden eine Laserleistung von 290 W, eine Scangeschwindigkeit von 1400 mm/s und ein Spurabstand von 0,10 mm gewählt. Diese Parameter gewährleisten einen Kompromiss zwischen geometrischer Präzision und der geforderten Dichte von > 99 % gemäß VDI 3405 – Blatt 2 [40]. Mit dieser Einstellung wird die Porosität reduziert, ohne die Maßanforderungen zu beeinträchtigen. Der Prüfkörper demonstriert die Fähigkeit der additiven Fertigung, sowohl hohe Maßhaltigkeit als auch eine angemessene Materialdichte in einem einzigen Fertigungsprozess zu erreichen.

Anpassung der Bauteilorientierung:

Der dritte Prüfkörper wird verwendet, um den Einfluss der Bauraumorientierung auf die Maßhaltigkeit zu untersuchen. Dabei wird das Bauteil um 45° gedreht, um die Auswirkungen dieser Orientierung auf Maßabweichungen in X- und Y-Richtung zu untersuchen. Der verwendete Parametersatz (290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit, 0,10 mm Spurabstand) bleibt unverändert, um eine vergleichbare Grundlage für die Analyse zu haben. Dies ermöglicht eine zusätzliche Bewertung der Einflüsse der Bauteilorientierung auf die Geometriepräzision, insbesondere im Hinblick auf die Wirkung des Gasstroms.

5.7.2 Ergebnisse der Zielgrößenoptimierung

Die Zielgrößenoptimierung ermöglicht gezielte Anpassungen der Prozessparameter, um spezifische Anforderungen an die Eigenschaften von AF-Bauteilen zu erfüllen (s. Tab. 21). In dieser Untersuchung wurden drei Parameterkonfigurationen mit unterschiedlichen Anforderungen entwickelt: eine Konfiguration, die auf maximale Maßhaltigkeit abzielt; eine zweite die einen Kompromiss zwischen Maßhaltigkeit und Dichte anstrebt; sowie eine dritte, die die Bauteilorientierung im Bauraum optimiert, um eine ausgewogene Maßhaltigkeit in X- und Y-Richtung zu erzielen.

Tab. 21: Zielgrößenoptimierung für Maßhaltigkeit und Dichte unter verschiedenen Prozessparametern

| Fokus der Zielgrößenoptimierung | Maßhaltigkeit | Maßhaltigkeit & Dichte | Bauteilorientierung |
|--|--|-----------------------------------|----------------------------|
| Laserleistung [W] | 260 | 290 | 290 |
| Scangeschwindigkeit [mm/s] | 1500 | 1400 | 1400 |
| Spurabstand [mm] | 0,16 | 0,1 | 0,1 |
| Bauteilrotation [°] | - | - | 45 |
| Abweichungen in mm | Prognose / Gemessene Abweichungen in mm | | |
| Stifte DPp | -0,01 / -0,01 | 0,04 / 0,04 | 0,04 / 0,06 |
| Löcher DPn | -0,04 / -0,03 | -0,09 / -0,06 | -0,09 / -0,09 |
| Halbkugeln DKp | 0,00 / -0,01 | 0,02 / 0,03 | 0,02 / 0,03 |
| Kalotten DKn | 0,00 / 0,01 | -0,04 / -0,05 | -0,04 / -0,06 |
| Kreisringe innen | 0,00 / -0,01 | -0,05 / -0,06 | -0,06 / -0,06 |
| Kreisringe außen | -0,01 / -0,01 | 0,04 / 0,05 | 0,04 / 0,06 |
| Längenprüfkörper LA_X | 0,00 / 0,01 | -0,04 / -0,03 | -0,02 / -0,02 |
| Längenprüfkörper LA_Y | 0,00 / 0,00 | 0,0 / 0,03 | -0,02 / -0,02 |
| Dichte [%] | 98,07 / 97,89 | 99,26 / 99,32 | 99,26 / 99,34 |
| Rauheit R _a (90°) [µm] | 6,7 / 6,9 | 7,2 / 7,3 | 7,2 / 7,4 |

Fokussierung auf die Maßhaltigkeit (260 W, 1500 mm/s, 0,16 mm Spurabstand):

Diese Parameterkombination ergab die höchsten Maßhaltigkeiten in dieser Arbeit, mit einer maximalen Abweichung von -0,03 mm bei den Lochdurchmessern DPn. Allerdings wurde bei diesem Parametersatz eine Dichte von 97,89 % erzielt, was unter der geforderten Mindestdichte von 99 % liegt. Diese Optimierung fokussiert sich stark auf die Maßhaltigkeit, jedoch ist sie für Anwendungen, die eine hohe Materialdichte erfordern, weniger geeignet.

Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Zielgrößenoptimierung mit dem Parameter P4 (250 W, 1600 mm/s, 0,2 mm Spurabstand), der die niedrigsten Abweichungen in den Vorversuchen

aufwies (s. Kap. 5.3), führte zu ähnlichen Maßabweichungen (s. Abb. 43). Allerdings zeigte Parameter P4 eine deutlich niedrigere Dichte von nur ca. 95 %. Dieser Vergleich verdeutlicht, dass durch die Zielgrößenoptimierung nicht nur die Maßgenauigkeit geringfügig gesteigert, sondern zugleich die Dichte optimiert werden konnte.

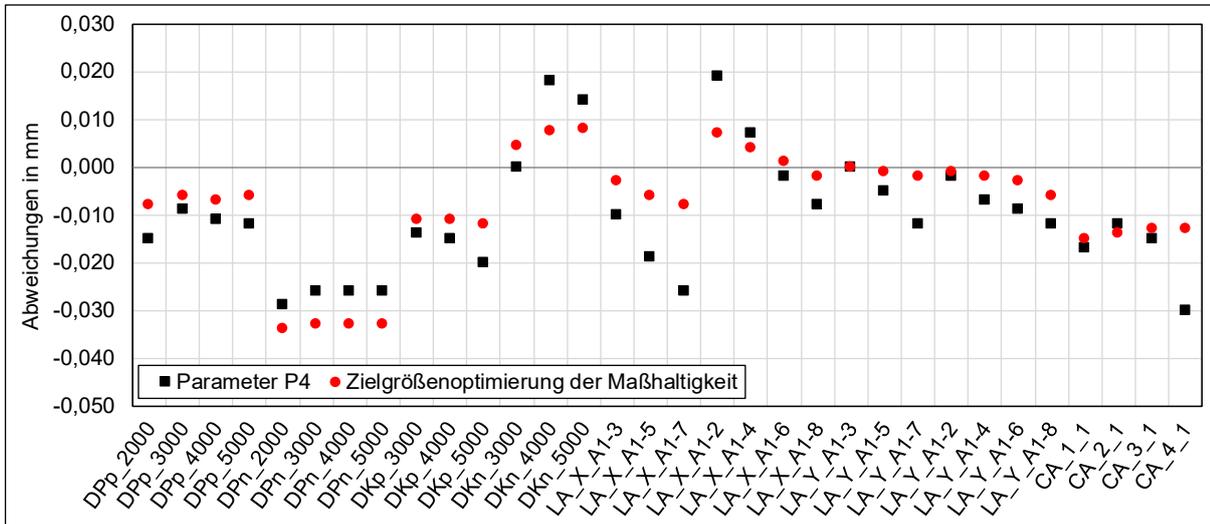


Abb. 43: Vergleich der Maßabweichungen für verschiedene Geometrien für Parameter P4 und Zielgrößenoptimierung der Maßhaltigkeit

Balance zwischen Maßhaltigkeit und Dichteanforderungen (290 W, 1400 mm/s, 0,1 mm Spurbstand):

Um sowohl eine hohe Maßhaltigkeit als auch die branchenüblichen Anforderungen an die Dichte zu erfüllen, wurde eine Parameterkombination mit 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurbstand von 0,10 mm gewählt. Mit diesem Parametersatz wurde eine Dichte von 99,3 % erzielt, was den Anforderungen gemäß VDI 3405 – Blatt 2 entspricht [40]. Gleichzeitig lag die maximale Abweichung bei den Löchern DPn bei etwa -0,08 mm. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die gewählte Parametereinstellung eine Balance zwischen Dichte und Maßhaltigkeit bietet und damit die Zielgrößen gleichzeitig erfüllt. Die Optimierung unterstreicht die Fähigkeit der additiven Fertigung, mechanische Eigenschaften und geometrische Präzision in Einklang zu bringen.

Anpassung der Bauteilorientierung (290 W, 1400 mm/s, 0,1 mm Spurbstand, 45° Rotation):

Die Untersuchung des Einflusses einer 45°-Rotation des Bauteils auf die Maßhaltigkeit in X- und Y-Richtung erfolgte unter Beibehaltung der Parameter von 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurbstand von 0,10 mm. Ziel war es, die direkten Auswirkungen der Rotation isoliert zu betrachten. Durch die Rotation wurde eine gleichmäßigere Verteilung des Gasstroms auf die Längenprüfkörper erreicht, was die Abweichungen in X-Richtung von -0,04 mm auf -0,02 mm reduzierte. Gleichzeitig stiegen die Abweichungen in Y-Richtung leicht an, ebenfalls auf -0,02 mm. Diese Annäherung der Abweichungen in beiden Richtungen lässt darauf schließen, dass die Rotation des Prüfkörpers eine gleichmäßigere Interaktion des Gasstroms mit den Bauteiloberflächen bewirkt, wodurch Unterschiede

in der Maßhaltigkeit zwischen den Achsen minimiert wurden. Die Dichte des um 45° gedrehten Prüfkörpers blieb konstant bei 99,3 %.

Interpretation der Ergebnisse

Die Zielgrößenoptimierung verdeutlicht, dass jede der drei untersuchten Parameterkonfigurationen spezifische Stärken und Anwendungsbereiche hat. Die Maßhaltigkeitsoptimierung zeigte zwar eine hohe geometrische Präzision, konnte jedoch die Dichteanforderungen nicht erfüllen, was ihre industrielle Anwendbarkeit einschränkt. Im Gegensatz dazu stellte die Parameterkombination aus 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und 0,10 mm Spurabstand eine ausgewogene Lösung dar, die sowohl eine hohe Maßhaltigkeit als auch die Dichteanforderungen erfüllte.

Die Untersuchung der Bauteilorientierung zeigte, dass eine 45°-Rotation im Bauraum die Abweichungen in X- und Y-Richtung ausgleichen kann. Dies hebt die Bedeutung der Bauteilorientierung als zusätzlichen Optimierungsansatz hervor, insbesondere bei der Herstellung geometrisch komplexer Bauteile.

Zusammenfassend bietet der Parametersatz aus 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und 0,10 mm Spurabstand eine ideale Balance zwischen Maßhaltigkeit und Dichte. Ergänzend dazu ermöglicht die gezielte Anpassung der Bauteilorientierung eine weitere Optimierung für spezifische Geometrien und Anforderungen.

5.8 Schlussfolgerung und Erkenntnisgewinn

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die AF mittels PBF/LB-M in der Lage ist, Bauteile mit hoher Maßhaltigkeit zu erzeugen, wenn die relevanten Prozessparameter systematisch optimiert werden. Der Einfluss bedeutender Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit wurde umfassend analysiert und liefert wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung dieser additiven Fertigungstechnologie.

Anpassung des Strahlversatzes und der Achsenskalierung:

Ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit ist die Optimierung des Strahlversatzes und der Achsenskalierung, die zu einer höheren Maßhaltigkeit führte. Insbesondere die Anpassung des Strahlversatzes ermöglichte die Reduktion von systematischen Abweichungen zwischen erhabenen und vertieften Geometrien. Die Anpassung der Achsenskalierung trug zudem zur Minimierung von Maßabweichungen in der X- und Y-Richtung bei.

Messunsicherheitsbetrachtung:

Die durchgeführte Messunsicherheitsbetrachtung ermöglicht es, die Verlässlichkeit der Messergebnisse zu bewerten und Unsicherheitsbeiträge aus verschiedenen Quellen zu quantifizieren. Dies ist essenziell für eine fundierte Bewertung der Ergebnisse und stärkt die Aussagekraft der gesamten Arbeit. Da die Hauptbeiträge zur Messunsicherheit systematisch sind, besteht die Möglichkeit, diese zu korrigieren und dadurch die Unsicherheit weiter zu reduzieren. Eine weiterführende Untersuchung dieses Ansatzes bleibt Gegenstand zukünftiger Forschung.

Einfluss der Prozessparameter:

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die beiden Prozessparameter Laserleistung und Scangeschwindigkeit den signifikantesten Einfluss von allen untersuchten Faktoren in dieser Arbeit auf die Maßhaltigkeit (und Materialeigenschaften) haben. Höhere Laserleistungen führen zu größeren Maßabweichungen durch Vergrößerung des Schmelzbades und der thermischen Spannungen, während eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit die Maßhaltigkeit positiv beeinflusst. Der Spurbstand zeigte im untersuchten Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit, beeinflusst jedoch die Dichte erheblich und ist daher ein wichtiger Parameter für die Optimierung der Bauteilqualität.

Einfluss der Bauplattformposition:

Die Position der Bauteile auf der Bauplattform beeinflusst durch die Nähe bzw. Entfernung zur Gaszufuhr insbesondere die Maßhaltigkeit von Elementen, die senkrecht zum Gasstrom ausgerichtet sind. Zylindrische Prüfkörper (DPp, DPn) sowie Halbkugeln und Kalotten (DKp, DKn) zeigen hingegen eine hohe Reproduzierbarkeit unabhängig von ihrer Position auf der Bauplattform. Die Ergebnisse belegen, dass der Einfluss der Bauplattformposition in diesen Fällen gering ist. Bauteile, die weiter von der Schutzgaszufuhr entfernt gefertigt wurden, wiesen tendenziell geringere Maßabweichungen auf. Dies bestätigt frühere Studien, die den Einfluss des Schutzgasstroms im Bauraum betonen. Insgesamt wurde festgestellt, dass der Einfluss der Bauplattformposition im Vergleich zu den Prozessparametern kleiner ist. Dennoch sollten diese Ergebnisse im Kontext der Streuungen aus der Reproduzierbarkeitsstudie beachtet werden, um eine vollständige Bewertung vorzunehmen (s. Abb. 42).

Reproduzierbarkeit:

Der PBF/LB-M-Prozess zeigt insgesamt eine hohe Reproduzierbarkeit, wie die Ergebnisse der zylindrischen Prüfkörper (DPp, DPn) und der Halbkugeln sowie Kalotten (DKp, DKn) belegen, bei denen die Standardabweichungen über mehrere Druckvorgänge hinweg ähnlich gering ausfallen (bis zu 0,026 mm). Dennoch treten bei einzelnen Druckvorgängen geringfügige Variationen auf, die auf Prozessinstabilitäten und zufällige Schwankungen hinweisen. Diese Abweichungen müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Besonders bei größeren Messabständen der Längenprüfkörper in X-Richtung (bis zu 0,04 mm) sowie Kreisringen (bis zu 0,05 mm) zeigen sich größere Unterschiede in der Reproduzierbarkeit, was darauf hinweist, dass diese Geometrien anfälliger für Schwankungen sind. Insgesamt zeigt der Prozess eine sehr hohe Reproduzierbarkeit.

Rauheit:

Die Untersuchungen zeigen, dass die Prozessparameter bei kleinen Neigungswinkeln (0° und 15°) einen großen Einfluss auf die Rauheit haben, wobei höhere Laserleistungen zu rauerer Oberflächen führen. Die Bauplattformpositionen haben nur einen geringen Einfluss auf die Rauheit, ohne signifikante Abweichungen zwischen verschiedenen Positionen. Die Reproduzierbarkeitsstudie bestätigt eine konstante Rauheit über mehrere Druckprozesse hinweg mit minimalen Schwankungen, was auf eine hohe Prozessstabilität hinweist.

Zielgrößenoptimierung:

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist die Anwendung der Zielgrößenoptimierung. Die Zielgrößenoptimierung zeigte, dass es möglich ist, eine Balance zwischen Maßhaltigkeit und Dichte zu erreichen, wenn die Prozessparameter abgestimmt werden. Insbesondere die Kombination aus 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und einem Spurbstand von 0,10 mm erwies sich als optimal, um sowohl eine hohe Maßhaltigkeit als auch eine Dichte von über 99 % zu erzielen.

Dabei wurde deutlich, dass eine reine Fokussierung auf die Maßhaltigkeit (z. B. durch Wahl niedrigerer Laserleistung) zwar geometrisch exakte Bauteile erzeugen kann, jedoch auf Kosten der Dichte. Umgekehrt führte eine höhere Laserleistung zwar zu einer höheren Dichte, jedoch zu größeren Maßabweichungen (s. Kap. 5.3). Die Zielgrößenoptimierung ermöglichte es somit, einen Kompromiss zu finden, der die wichtigsten Anforderungen an die Bauteilqualität erfüllt.

Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Bauteilorientierung im Bauraum einen Einfluss auf die Maßhaltigkeit haben kann. Eine Rotation des Bauteils um 45° führte zu einer gesteigerten Symmetrie der Maßabweichungen in X- und Y-Richtung, was zeigt, dass die Ausrichtung der Bauteile eine zusätzliche Möglichkeit zur Optimierung darstellt.

Erkenntnisgewinn:

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass eine abgestimmte Optimierung der Prozessparameter, der Bauplattformposition und der Kalibrierungsparameter wie Strahlversatz und Achsenkalibrierung entscheidend ist, um die Maßhaltigkeit von AF-Bauteilen zu optimieren. Dabei ist zu beachten, dass eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in separaten Druckvorgängen erzielt werden kann. Dieses Vorgehen bietet somit einen vielversprechenden Ansatz zur Steigerung der Bauteilqualität und zur Erweiterung des Anwendungsbereiches der additiven Fertigungstechnologie in der Industrie.

Diese Erkenntnisse tragen nicht nur zur Optimierung des PBF/LB-M-Prozesses bei, sondern bieten auch eine wertvolle Grundlage für zukünftige Forschungen und industrielle Anwendungen, bei denen die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit bedeutende Anforderungen darstellen.

6 Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Einflüsse der Prozessparameter und der Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Nun soll der Fokus auf einen weiteren kritischen Faktor im PBF-LB/M-Prozess gerichtet werden: die Scanstrategien.

Die Bahnführung des Laserstrahls hat einen entscheidenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Verschiedene Scanmuster wirken sich direkt auf die Wärmeverteilung im Schmelzbad aus und tragen so maßgeblich zur Qualität bei. In diesem Kapitel wird der Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Maßgenauigkeit untersucht. Zu den analysierten Strategien gehören die Streifenbelichtung mit verschiedenen Scanrotationen, die Inselbelichtung sowie die Kreuzbelichtung. Ergänzend werden Laserumschmelztechniken (engl. Laser remelting) einbezogen, um deren Auswirkung auf die Oberflächenqualität zu bewerten.

Dieses Kapitel beruht auf der Arbeit "Influence of scanning strategies on dimensional accuracy in laser powder bed fusion" von Krasniqi et al. [264].

6.1 Methoden und Verfahren

6.1.1 Prüfkörper und Messplan

Prüfkörper

Der in dieser Studie eingesetzte Prüfkörper entspricht den Vorgaben der DIN EN ISO/ASTM 52902 [238] und wurde bereits in Kap. 5.1.2 beschrieben. Die Verwendung des gleichen Prüfkörpers ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus beiden Studien. Der Prüfkörper verfügt über eine Vielfalt an geometrischen Elementen und bietet somit die Voraussetzungen dafür, um auch die Auswirkungen verschiedener Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit zu bewerten.

Messplan und Messsysteme

Der Messplan dieser Untersuchung folgt dem in Kap. 5.1.2 und Tab. 16 etablierten Vorgehen. Es werden alle geometrischen Merkmale des Prüfkörpers gemessen und analysiert, um die Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit zu bewerten. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Auswirkungen der verschiedenen Scanstrategien auf die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität.

Es werden erneut die in Kap. 5.1.4 beschriebenen Messsysteme (CT und KMG) verwendet, um eine umfassende Analyse der geometrischen Eigenschaften zu gewährleisten.

6.1.2 Scanstrategien

Um den Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität zu untersuchen, wurden insgesamt 19 Prüfkörper gefertigt. Diese Prüfkörper unterscheiden sich in ihren Kombinationen aus Scanstrategie, Scanrotation und Fertigungsmethode (Einzel- oder Doppelbelichtung pro Schicht, hier: Laserumschmelzen genannt). Die genauen Angaben zu den verwendeten Parametern und ihrer Umsetzung sind in Tab. 22 aufgeführt.

Für alle Prüfkörper wurde zur Veranschaulichung des Optimierungspotenzials wie in Kap. 5 der im Grundlagenteil ermittelte Bestparameter verwendet. Dieser beinhaltet eine Laserleistung von 350 W, eine Scangeschwindigkeit von 1200 mm/s und einen Spurbstand von 0,14 mm (s. Kap. 4.4 zur Zielgrößenoptimierung).

Tab. 22: Versuchsplan für Maßhaltigkeitsuntersuchungen: Variation von Scanstrategien, Fertigungsmethoden und Schichtrotationen

| Bezeichnung des Prüfkörpers | Scanstrategie | Fertigungsmethode | Drehung pro Schicht [°] |
|-----------------------------|--------------------|---|-------------------------|
| S1 | Streifenbelichtung | Einzelbelichtung | 0 |
| S2 | | | 45 |
| S3 | | | 67 |
| S4 | | | 90 |
| S5 | | Laserumschmelzen | 0 |
| S6 | | | 45 |
| S7 | | | 67 |
| S8 | | | 90 |
| I1 | Inselbelichtung | Einzelbelichtung | 0 |
| I2 | | | 45 |
| I3 | | | 67 |
| I4 | | | 90 |
| I5 | | Laserumschmelzen | 0 |
| I6 | | | 45 |
| I7 | | | 67 |
| I8 | | | 90 |
| K1 | Kreuzbelichtung | Zwei Einzelbelichtungen mit unterschiedlichen Rotationen auf einer Schicht (s. <u>Kreuzbelichtung</u>) | 0 + 90 |
| K2 | | | 45 + 90 |
| K3 | | | 67 + 90 |

Fertigungsmethoden:

Einzelbelichtung

Bei der Einzelbelichtungsmethode wird jede Pulverschicht einmal mit dem Laser belichtet. Um eine gleichmäßige Wärmeverteilung zu erreichen, wird die Scanrichtung nach jeder Schicht rotiert. Bei dieser Methode betragen die Scanrotationen jeweils 0° (keine Rotation), 45° , 67° oder 90° , um ihren Einfluss auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit zu untersuchen (s. Abb. 44). Diese Methode dient als Referenz für den Vergleich mit komplexeren Scanstrategien.

Laserumschmelzen

Beim Laserumschmelzen wird jede Schicht nach dem ersten Scan ein zweites Mal mit dem Laser belichtet, wodurch die erste Schicht vollständig aufgeschmolzen wird. Diese Strategie zielt darauf ab, die Oberflächenqualität zu optimieren. Für beide Belichtungsdurchgänge auf einer Schicht wird die gleiche Scanrichtung verwendet (s. Abb. 44). Auch hier wird die Scanrotation mit jedem neuen Schichtaufbau variiert (0° , 45° , 67° , 90°).

Scanstrategien:

Streifenbelichtung

Die Streifenbelichtung (s. Tab. 22: Prüfkörper S1 – S8) ist eine der am häufigsten angewendeten Scanstrategien. Der Laser bewegt sich dabei in parallelen Linien über das Pulverbett und ermöglicht eine gleichmäßige Schmelzbadausbildung.

Inselbelichtung

Die Inselbelichtung (s. Tab. 22: Prüfkörper I1 – I8) teilt das Pulverbett in kleine Abschnitte von $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, die in zufälliger Reihenfolge belichtet werden. Diese Strategie soll eine gleichmäßigere Wärmeverteilung ermöglichen und dadurch thermische Spannungen reduzieren, indem die Bauteile in kleineren Segmenten aufgebaut werden.

Kreuzbelichtung

Die Kreuzbelichtung (s. Tab. 22: Prüfkörper K1 – K3) stellt eine erweiterte Variante des Laserumschmelzens dar. Dabei wird jede Schicht nach der initialen Belichtung ein zweites Mal gescannt, wobei die Scanrichtung im zweiten Durchgang nicht der ersten Scanrichtung entspricht. Im Gegensatz zum Laserumschmelzen, bei dem die beiden Scanrichtungen auf einer Schicht konstant bleiben, werden bei der Kreuzbelichtung gezielt unterschiedliche Scanrichtungen innerhalb derselben Schicht eingesetzt (s. Abb. 44). Diese Strategie zielt darauf ab, die Energie gleichmäßiger zu verteilen und sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Oberflächenqualität zu erhöhen. In den Tests wurden verschiedene Kombinationen von Scanrotationen für die beiden Belichtungen einer Schicht verwendet, wie 0° (keine Rotation) + 90° , 45° + 90° sowie 67° + 90° .

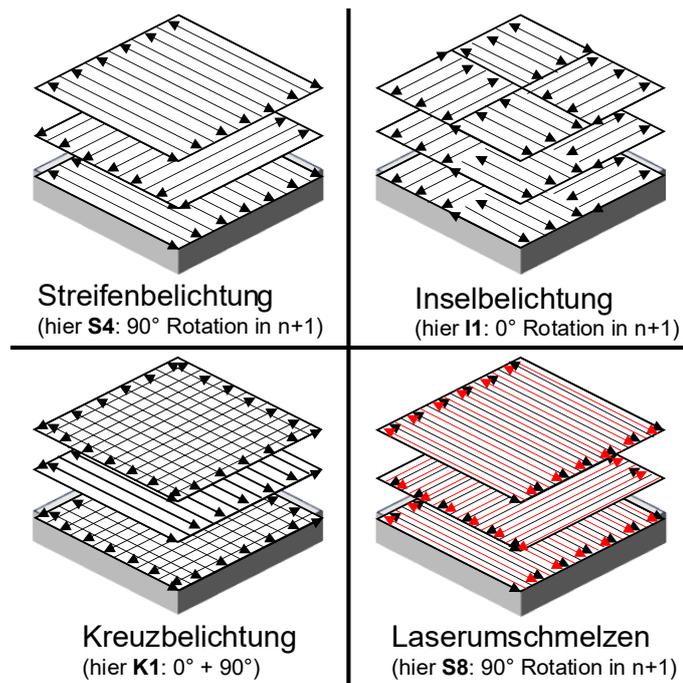


Abb. 44: Untersuchte Scanstrategien für die Maßhaltigkeitsuntersuchungen

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Einfluss von Scanrotation und Laserumschmelzen auf die Maßhaltigkeit

Abb. 45 zeigt, dass weder die Wahl der Scanrotation noch die Anwendung des Laserumschmelzens einen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteile hat. Es wird verdeutlicht, dass die geometrischen Abweichungen bei allen getesteten Drehwinkeln sowie bei der Anwendung des Laserumschmelzens – unabhängig davon, ob die Streifen- oder Inselbelichtung verwendet wurde – nahezu unverändert bleiben.

In Abb. 45(a) sind die Abweichungen der Stift- und Lochdurchmesser (2 mm – 5 mm) für die Streifenbelichtung dargestellt. Die Abweichungen zwischen den Prüfkörpern unterscheiden sich konstant um $\pm 0,04$ mm, unabhängig von der Scanrotation oder der Anwendung des Laserumschmelzens. Ein ähnliches Bild zeigt Abb. 45(b) für die Kreisringe (CA_1 – CA_4), die in sechs verschiedenen Höhen (H1 – H6) gemessen wurden. Auch hier unterscheiden sich die Abweichungen zwischen den Prüfkörpern unabhängig von den gewählten Scanrotationen und der Anwendung des Umschmelzens um $\pm 0,04$ mm.

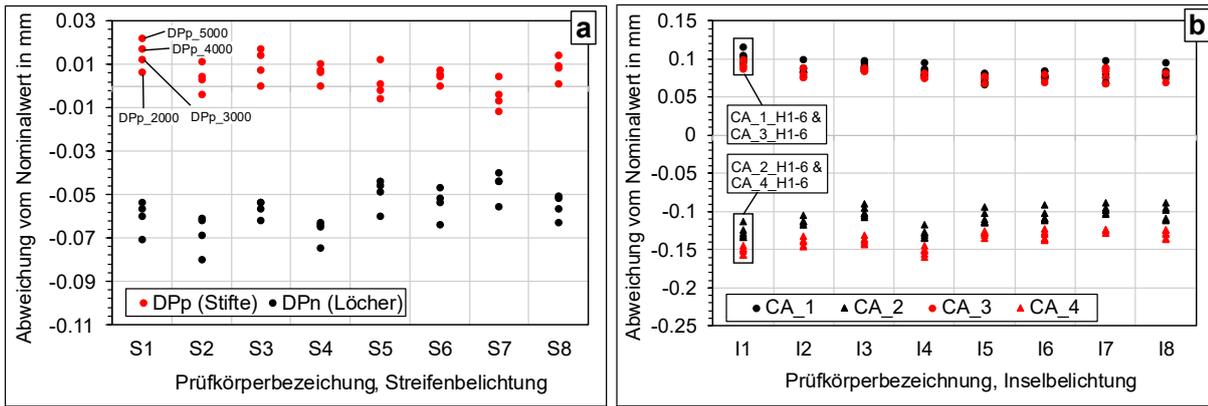


Abb. 45: Einfluss von Scanrotation und Laserumschmelzen auf die Maßhaltigkeit: (a) Stifte (DPp) und Löcher (DPn) bei Streifenbelichtung; (b) Kreisringe (CA) bei Inselbelichtung

Diese Ergebnisse bestätigen frühere Studien, die gezeigt haben, dass der Rotationswinkel keinen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat, wenn eine zusätzliche Konturbelichtung verwendet wird, wie es in der vorliegenden Arbeit der Fall ist [126]. Die Konsistenz der Messergebnisse in dieser Studie deutet darauf hin, dass vor allem andere Faktoren, wie die Prozessparameter (s. Kap. 5.3), einen größeren Einfluss auf die Maßgenauigkeit ausüben [6].

Ein zusätzlicher Faktor, der die Stabilität der Messergebnisse erklären könnte, ist die "Blocked Feed Direction" des PBF-LB/M-Systems, die durch den Maschinenhersteller vorgegeben ist (s. Abb. 46). Diese Funktion beschränkt das Prozessfenster, in dem der Laserstrahl faktisch agieren kann auf 140° (Öffnungswinkel zwischen 20° und 160°), um zu verhindern, dass der Laserstrahl durch aufsteigende Rauch- oder Pulverpartikel gestört wird. Diese Partikel werden durch den Schutzgasstrom entfernt.

In diesem Fall bedeutet dies (s. Abb. 46), dass der Laser bevorzugt in Richtung des Schutzgasstroms arbeiten kann, also von der Gaszufuhrseite zur Absaugseite, jedoch nicht in entgegengesetzter Richtung. Dies liegt daran, dass der Schutzgasstrom von der Einleitungsseite zur Absaugseite geführt wird, wodurch aufsteigende Rauch- und Pulverpartikel effektiv aus dem Prozessbereich entfernt werden (s. Abb. 10 und Abb. 26, Zufuhr und Absaugkanal des Schutzgases). Diese Einschränkung erfordert das Überspringen von Scanrotationen und trägt dazu bei, Risiken wie Pulverentfernung, Rauchfahnen oder Spritzer zu minimieren. Dadurch wird die Prozesssicherheit erhöht und die Qualität der gefertigten Bauteile verbessert [265].

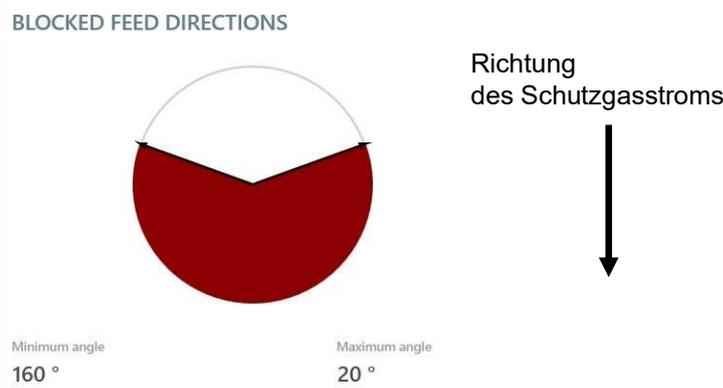


Abb. 46: Verfügbares Prozessfenster von 140° aufgrund „Blocked Feed Direction“

6.2.2 Einfluss der Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit

Abb. 47 zeigt die Maßabweichungen in Abhängigkeit von den verschiedenen Scanstrategien für die Abstandmessungen in X-Richtung (Abb. 47(a)) sowie für die Stifte DPp und Löcher DPn mit unterschiedlichen Durchmessern (Abb. 47(b)). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Wahl der Scanstrategie einen erheblichen Einfluss auf die geometrischen Abweichungen der gefertigten Prüfkörper hat.

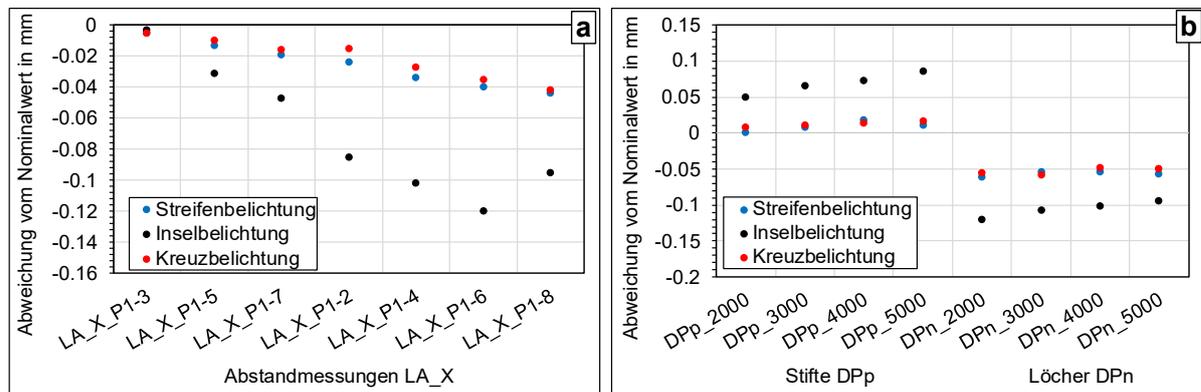


Abb. 47: Einfluss der Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit anhand Abstandsmessungen LA_X (a) und Stiften DPp und Löchern DPn (b)

Abb. 47(a) zeigt, dass die Inselbelichtungsstrategie signifikant größere Abweichungen von den Nominalmaßen aufweist, während Streifenbelichtung und Kreuzbelichtung nahezu identische und weitaus geringere Abweichungen erzielen. Insbesondere bei den Abstandsmessungen in X-Richtung (s. Abb. 47(a)) nehmen die Abweichungen bei der Inselbelichtung mit steigender Distanz deutlich schneller zu als bei der Streifen- und Kreuzbelichtung. Für größere Abstände, wie dem bidirektionalen Abstand von 40 mm (LA_X_A1-A8), verzeichnet die Inselbelichtung eine maximale Abweichung von -0,1 mm, wohingegen die Abweichung bei der Streifenbelichtung -0,04 mm beträgt. Diese Beobachtung unterstreicht die höhere thermische Instabilität der Inselbelichtung, die durch lokale Wärmestauungen in den Inselübergangsbereichen hervorgerufen werden. Im Gegensatz dazu gewährleisten die Streifen- und Kreuzbelichtungsstrategien durch eine gleichmäßigere Wärmeverteilung stabilere Ergebnisse über größere Abstände.

Bei der Analyse der Stifte (DPp) und Löcher (DPn), dargestellt in Abb. 47(b), sind die Abweichungen bei der Inselbelichtung für alle Durchmesser um ca. 0,05 mm größer als für die Streifen- und Kreuzbelichtung. Die erhöhten geometrischen Abweichungen bei der Inselbelichtungsstrategie lassen sich durch ausgeprägte lokale Wärmegradienten erklären, die zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung und Abkühlung führen.

Die Inselstrategie verstärkt thermische Effekte sowohl innerhalb der Inseln als auch an den Übergangsbereichen, wodurch Hotspots entstehen, die zu geometrischen Fehlern und unerwünschten Verformungen führen. Besonders in den Überlappungszonen zwischen benachbarten Inseln kommt es häufig zu Wärmestauungen und ausgeprägten Grenzrändern, was die thermischen Belastungen zusätzlich verstärkt [123]. Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass Laserumschmelzstrategien die Oberflächenqualität erhöhen, indem sie durch das erneute Aufschmelzen zu einer stabileren Schmelzbadausbildung führen. Diese Vorteile

werden vor allem im Vergleich zur Inselbelichtung deutlich, die aufgrund der inhärenten thermischen Instabilität anfälliger für Fehler ist [131].

6.2.3 Einfluss von Scanstrategien und Laserumschmelzen auf die Oberflächeneigenschaften

Die Analyse der Oberflächenrauheit zeigt, dass sowohl die Scanstrategie als auch der Einsatz von Laserumschmelzverfahren einen signifikanten Einfluss auf die resultierenden Oberflächenstrukturen haben. Für diese Studie wurden taktile Rauheitsmessungen für sieben definierte Oberflächenstrukturen SA mit Neigungswinkeln in 15°-Schritten (SA = 0° bis 90°) (s. Abb. 24 und Tab. 16) durchgeführt, um die Wirkung der unterschiedlichen Strategien systematisch zu erfassen. Abb. 48 fasst die Ergebnisse der Messungen zusammen und verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Strategien.

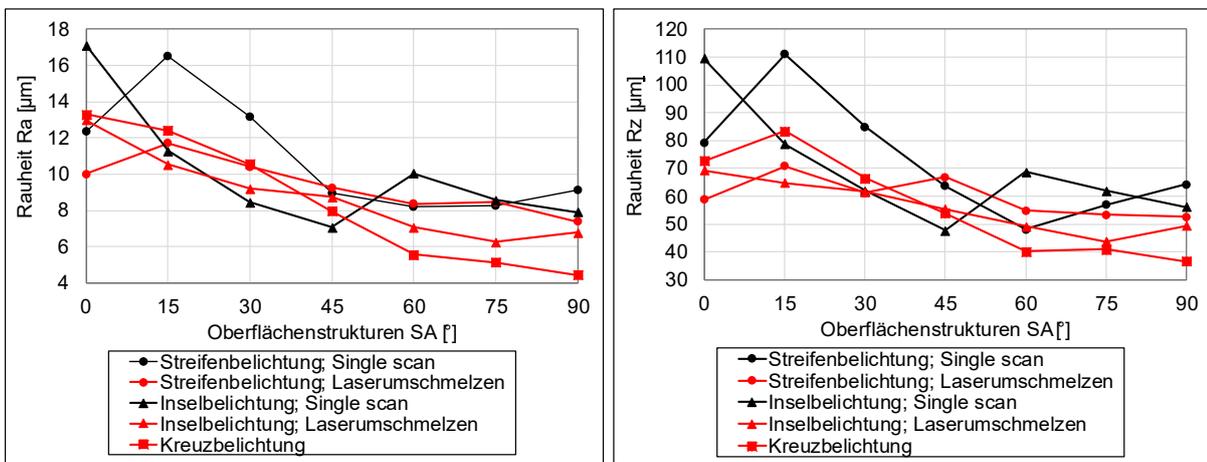


Abb. 48: Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Rauheiten R_a / R_z bei unterschiedlichen Neigungswinkeln

Die Einzelbelichtungsstrategien (schwarze Linien) erzielten die höchsten Rauheitswerte, insbesondere bei flachen Neigungswinkeln (SA = 0° bis 15°). Die Inselbelichtung führte dabei zu den höchsten Werten mit 17 µm R_a und 110 µm R_z . Mit zunehmendem Neigungswinkel nahmen die Rauheitswerte ab und erreichten bei steilen Neigungswinkeln (SA = 90°) etwa 8 µm R_a und 60 µm R_z . Der Einsatz des Laserumschmelzens (rote Linien) führte zu einer signifikanten Reduktion der Rauheitswerte. Die maximalen Rauheitswerte sanken auf 13 µm R_a und 70 µm R_z für beide Scanstrategien. Insbesondere bei Oberflächenneigungen ab 60° wurden deutliche Reduktionen der Rauheitswerte beobachtet, was auf die Glättung der erstarrten Oberfläche durch den zusätzlichen Laserscan zurückzuführen ist.

Die Kreuzbelichtung, bei der zwei Scans pro Schicht mit unterschiedlichen Drehwinkeln durchgeführt werden, zeigte in Bezug auf die Oberflächenrauheit signifikante Ergebnisse. Bei flachen Neigungswinkeln erreichten die Rauheitswerte 13 µm R_a und 70 µm R_z . Besonders auffällig war die Reduktion der Rauheit bei steilen Neigungswinkeln (SA = 60° bis 90°), wo die Werte auf bis zu 4,4 µm R_a und 36,5 µm R_z sanken. Diese Ergebnisse lassen sich durch die homogenere Wärmeverteilung erklären, die durch die variierenden Scanrotationen bei der Kreuzbelichtung erzielt werden.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit früheren Untersuchungen, die zeigen, dass das Laserumschmelzen eine zentrale Rolle bei der Erzielung einer homogeneren Oberflächenstruktur spielt. Die durch das Umschmelzen hervorgerufenen Glättungseffekte minimieren Vertiefungen und Unregelmäßigkeiten, die während des Schmelzprozesses entstehen können, und tragen gleichzeitig zu einer gleichmäßigeren Wärmeverteilung und einer optimierten Partikelfusion des Pulvers bei, wodurch die strukturelle Integrität der Oberfläche verbessert wird. Maßnahmen wie das Vorheizen des Substrats und das Umschmelzen verfestigter Schichten können diese Effekte weiter verstärken, indem sie thermische Verformungen minimieren und die Oberflächenstruktur zusätzlich glätten [124,125] .

Obwohl das Laserumschmelzen die Rauheit der Bauteile beeinflusst, ist die erhebliche Verlängerung der Prozesszeit (ca. doppelte Prozesszeit durch Laserumschmelzen) ein Aspekt, der berücksichtigt werden muss [132].

Abb. 49 zeigt einen visuellen Vergleich zwischen Bauteilen, die mittels Laserumschmelzen sowie Streifenbelichtung und Inselbelichtung gefertigt wurden. Dabei fällt die Oberfläche des mittels Laserumschmelzen gefertigten Prüfkörpers im Vergleich zu den Prüfkörpern auf, die im Einzelbelichtungsverfahren hergestellt wurden.



Abb. 49: Prüfkörper mit verschiedenen Belichtungsstrategien: Laserumschmelzen, Streifenbelichtung (Einzelbelichtung) und Inselbelichtung (Einzelbelichtung)

6.3 Zielgrößenoptimierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Parametersatz 290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit und 0,1 mm Spurbabstand bereits als Bestparameter identifiziert (s. Kap. 5.7.2), da er sowohl eine hohe Maßhaltigkeit sicherstellt als auch die normativen Anforderungen an die Dichte erfüllt. Hinsichtlich der Oberflächenrauheit erzielte dieser Parametersatz jedoch keine signifikanten Optimierungen im Vergleich zu anderen Parametersätzen (s. Tab. 21).

Durch den Einsatz einer Kreuzbelichtung (Laserumschmelzen) anstelle einer einfachen Streifenbelichtung konnte die Rauheit hingegen deutlich reduziert werden, ohne wesentliche

Unterschiede bei der Dichte und Maßhaltigkeit festzustellen. Die folgende Tab. 23 stellt die Ergebnisse mit und ohne Kreuzbelichtung für den Bestparameter (290 W Laserleistung, 1400 mm/s Scangeschwindigkeit, 0,1 mm Spurbabstand) gegenüber.

Tab. 23: Zielgrößenoptimierung durch Anpassen der Belichtungsstrategie

| | Rauheit R_a (90°) [μm] | Rauheit R_z (90°) [μm] | Dichte (%) |
|----------------------|--|--|------------|
| Ohne Kreuzbelichtung | 7,3 | 47,5 | 99,32 |
| Mit Kreuzbelichtung | 6,4 | 42,7 | 99,37 |

Die durchgeführte Zielgrößenoptimierung zeigt, dass der Einsatz der Kreuzbelichtung zu einer Senkung der Oberflächenrauheit führt, während die Maßhaltigkeit und die Dichte unverändert auf ähnlichem Niveau bleiben, vergleichbar wie in Abb. 47(a)-(b). Dies verdeutlicht, dass die Anpassung der Scanstrategie ein weiteres effektives Mittel zur Steigerung der Oberflächenqualität ist, ohne die Maßhaltigkeit oder Dichte negativ zu beeinflussen. Trotz der nachgewiesenen Vorteile der Kreuzbelichtung sollte die etwa doppelte Prozesszeit gegenüber Einzelbelichtungsmethoden berücksichtigt werden, da dies einen wesentlichen Faktor in der Fertigungsplanung darstellt.

6.4 Schlussfolgerungen/Erkenntnisgewinn

Zusammenfassend liefert diese Studie wichtige Erkenntnisse über den Einfluss von Scanstrategien und vom Laserumschmelzen auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit im PBF-LB/M-Prozess.

- **Geringe Auswirkungen der Scanrotation und des Laserumschmelzens auf die Maßhaltigkeit:** Die Ergebnisse zeigen, dass weder unterschiedliche Scanrotationen noch das Laserumschmelzen signifikante Einflüsse auf die Maßhaltigkeit haben. Dies ist auf die Verwendung von Konturbelichtungen sowie auf die aktivierte "Blocked Feed Direction" zurückzuführen.
- **Signifikanter Einfluss der Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit:** Die Wahl der Scanstrategie hat sich als zentraler Faktor für die Maßhaltigkeit herausgestellt. Insbesondere die Inselbelichtungsstrategie führte zu größeren Maßabweichungen, die auf lokale Wärmegradienten und ungleichmäßige Abkühlung zurückzuführen sind. Im Gegensatz dazu zeigten die Streifen- und Kreuzbelichtungsstrategien eine höhere Präzision und Konsistenz, da sie eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und Schmelzbadausbildung ermöglichen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung einer strategischen Auswahl der Scanmuster, um die Maßhaltigkeit der Bauteile zu optimieren.
- **Effekt des Laserumschmelzens auf die Oberflächenqualität:** Das Laserumschmelzen führte zu einer signifikanten Steigerung der Oberflächenqualität durch die Erzeugung einer homogeneren Struktur und einer Verringerung der Rauheitswerte im Vergleich zu

Einzelbelichtungsstrategien. Besonders die Kreuzbelichtung (Parametersatz K3, s. Tab. 22), eine Variation des Laserumschmelzens, bei der die Rotationen der beiden Belichtungen pro Schicht auf 67° und 90° eingestellt wurden, zeigte effektive Ergebnisse. Diese Konfiguration erwies sich als besonders geeignet, da sie eine hohe Maßhaltigkeit sicherstellte und gleichzeitig die Oberflächenbeschaffenheit deutlich erhöhte.

- **Zielgrößenoptimierung:** Die weiterführende Anpassung des in Kap. 5.7.2 ermittelten Bestparameters hat eine zusätzliche Steigerung der Oberflächeneigenschaften durch den Einsatz vom Laserumschmelzen (Kreuzbelichtung) ermöglicht. Dadurch wurden alle in dieser Arbeit entwickelten Methoden zur Qualitätssteigerung an einem finalen Bauteil erfolgreich angewendet. Die Ergebnisse dienen als Grundlage und Leitfaden zur Optimierung der Prozessparameter in der AF und verdeutlichen, wie gezielte Anpassungen sowohl die Oberflächenqualität als auch die Maßhaltigkeit nachhaltig optimieren können. Die erfolgreiche Implementierung aller Ansätze an einem finalen Bauteil unterstreicht die Praxistauglichkeit der entwickelten Strategien und bietet eine wertvolle Basis für zukünftige Untersuchungen und industrielle Anwendungen zur Steigerung der Qualität additiv gefertigter Komponenten.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Schlussfolgerung

Diese Arbeit stellt eine der bisher umfassendsten Untersuchungen zur Prozessparameteroptimierung und Maßhaltigkeit von PBF/LB-M-Bauteilen dar. Mit einem Fokus auf AlSi10Mg beleuchtet die Arbeit tiefgreifend die Wechselwirkungen zwischen zentralen Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die geometrische Präzision und Reproduzierbarkeit der hergestellten Prüfkörper.

Die Grundlagenuntersuchungen bildeten das Fundament dieser Arbeit. Dabei wurden die Materialeigenschaften von AlSi10Mg umfassend analysiert und durch den Einsatz statistischer Methoden wie DoE und ANOVA zentrale Einflussgrößen identifiziert. Diese ersten Schritte verdeutlichten die Bedeutung der Abstimmung von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand für die Schmelzbadstabilität, die Optimierung von Materialeigenschaften, wie z.B. Steigerung der Dichte, und die Optimierung der thermischen Eigenschaften. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen ermöglichten eine individuelle Einstellung der Prozessparameter, um die Bauteilqualität signifikant zu steigern.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen war ein zentrales Thema der Arbeit die Untersuchung der Einflüsse der Prozessparameter und Bauplattformpositionen auf die Maßhaltigkeit sowie die Untersuchung der Reproduzierbarkeit. Dabei wurde erneut deutlich, dass die Prozessparameter einen erheblichen Einfluss auf die Maßgenauigkeit haben. Selbst geringe Unterschiede in der Laserleistung oder Scangeschwindigkeit führten zu merklichen Abweichungen in den finalen Bauteildimensionen. Ebenfalls hervorzuheben ist, dass die Arbeit aufzeigt, wie durch eine abgestimmte Anpassung der Strahlversatz- und Achsenskalierungsparameter eine Steigerung der Maßhaltigkeit möglich ist. Zudem beeinflusst die Positionierung und Umgebung auf der Bauplattform die Geometrie der Bauteile. Dabei zeigte sich, dass Schutzgasströmungen und die damit verbundenen thermischen Bedingungen, die je nach Position auf der Plattform variieren, die geometrische Genauigkeit der Prüfkörper mitbestimmen. Prüfelemente, die entgegen der Strömungsrichtung (X-Richtung) gefertigt wurden, wiesen höhere Maßabweichungen auf als Elemente, die entlang der Strömung (Y-Richtung) hergestellt wurden. Die systematische Analyse zeigte, dass durch eine gezielte Bauteilplatzierung und Anpassung der Prozessparameter die Maßgenauigkeit optimiert und konstant gehalten werden kann. Die zusätzlich durchgeführte Messunsicherheitsbetrachtung spielte dabei eine zentrale Rolle, indem sie die Aussagekraft der Ergebnisse stärkte und Unsicherheiten quantifizierte, die mit Prozessvariationen und der Messtechnik verbunden sind.

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit war ebenso ein zentraler Schwerpunkt der Arbeit und zeigte insgesamt eine hohe Prozessstabilität sowie konsistente Maßgenauigkeiten, insbesondere bei zylindrischen Prüfkörpern sowie Halbkugeln und Kalotten. Bei größeren Messabständen der Längenprüfkörper hingegen traten Abweichungen auf, die auf unvermeidbare Prozessschwankungen zurückzuführen sind. Dennoch liefern die gewonnenen Erkenntnisse wertvolle Ansätze zur weiteren Verfeinerung der Prozessparameter, um die Reproduzierbarkeit weiter zu erhöhen.

Im weiteren Verlauf wurden die Auswirkungen verschiedener Scanstrategien auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität untersucht. Es wurde gezeigt, dass Scanstrategien wie Streifen- und Kreuzbelichtung eine gleichmäßigere Wärmeverteilung im Schmelzbad begünstigen und somit die Präzision erhöhen, während die Inselbelichtung tendenziell zu thermischen Instabilitäten infolge ausgeprägter lokaler Wärmegradienten führt. Zusätzlich wurden Laserumschmelztechniken zur Optimierung der Oberflächenqualität untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das Laserumschmelzen zu einer eindeutigen Reduktion der Oberflächenrauheit führte, ohne negative Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit zu haben. Dies verdeutlicht das Potenzial dieser Technik, Oberflächenbeschaffenheiten signifikant zu optimieren, während die geometrische Präzision beibehalten wird. Insbesondere die Kreuzbelichtungsstrategie zeigte positive Effekte in Bezug auf die Vermeidung lokaler Wärmestauungen und Verzüge.

Zusammenfassend verdeutlicht diese Arbeit, dass durch die umfassende Optimierung der Prozessparameter, Scanstrategien und die Berücksichtigung der Bauplattformpositionen eine hohe Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität erreicht werden kann. Die Forschungsergebnisse liefern nicht nur wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung der PBF-LB/M-Prozesse, sondern bieten auch einen maßgeblichen Beitrag zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit, was für die industrielle Anwendung von zentraler Bedeutung ist. Die Ergebnisse markieren einen bedeutenden Fortschritt in der AF und ebnen den Weg für die Herstellung komplexer, präziser und reproduzierbar herstellbarer Bauteile.

7.2 Reflexion und Bewertung der Erkenntnisse

Diese Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Prozessparameter und zur Optimierung der Maßhaltigkeit bei AF-Bauteilen aus AlSi10Mg. Dennoch gibt es einige Einschränkungen und Herausforderungen, die bei der Umsetzung und Verallgemeinerung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Die erzielten Erkenntnisse basieren auf spezifischen Parametern und einer definierten Anlagentechnologie, was ihre direkte Übertragbarkeit auf andere Systeme oder Materialien limitiert. Insbesondere die Nutzung einer spezifischen Maschine und eines bestimmten Pulvertyps kann die Ergebnisse beeinflussen und erfordert angepasste Validierungsstudien für andere Setups. Kleinste Variationen in der Anlagentechnik oder beim verwendeten Pulver können die Prozessparameter, das Schmelzbadverhalten und die daraus resultierende Bauteilqualität erheblich beeinflussen. Um diese Limitationen zu adressieren, sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen und Pulverarten notwendig, um die allgemeine Anwendbarkeit der Ergebnisse zu stärken.

Des Weiteren wurde zwar eine hohe Reproduzierbarkeit bei Geometrien wie zylindrischen Elementen festgestellt, doch speziell bei größeren Messabständen der Längenprüfkörper in X-Richtung traten deutlichere Abweichungen auf. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass die AF, trotz signifikanter Fortschritte in der Prozesskontrolle, noch immer Herausforderungen bei der Fertigung komplexer Bauteile aufweist. Insbesondere geometrische Merkmale wie filigrane Details oder variierende Wandstärken sind anfällig für lokale Schwankungen in der Temperaturverteilung und der Schmelzbadynamik. Diese Schwankungen können zu einer ungleichmäßigen Abkühlung und damit zu Maßabweichungen führen. Die Implementierung

adaptiver Steuerungstechnologien und weiterer Monitoring-Systeme, wie z. B. in-situ-Thermografien und Prozessüberwachungssysteme, kann dabei helfen, diese Abweichungen zu minimieren und eine gleichbleibende Bauteilqualität sicherzustellen.

7.3 Praktische Bedeutung

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse haben eine unmittelbare Bedeutung für die industrielle Praxis sowie Forschung und Entwicklung in der additiven Fertigung. Durch die detaillierte Analyse der Prozessparameter, der Bauplattformpositionen und der Scanstrategien bietet die Arbeit wertvolle Leitlinien zur Optimierung der Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Herstellung von Bauteilen aus AlSi10Mg. Die vorgestellten Optimierungsstrategien können in Produktionsumgebungen und spezifische Zielgrößenoptimierungen implementiert werden, um die geometrische Präzision und Reproduzierbarkeit zu erhöhen und damit die Qualitätssicherung zu optimieren.

Die praktischen Implikationen sind vielfältig und umfassen eine gezielte und strategische Anpassung der Laserleistung, Scangeschwindigkeit, X-Y-Achsenkalierung und Strahlversatzparameter mithilfe statistischer Methoden, um die Maßhaltigkeit über die gesamte Bauplattform hinweg zu kontrollieren. Die Untersuchung der Schutzgasströmungen und der thermischen Effekte verdeutlicht die Bedeutung einer abgestimmten Positionierung der Bauteile, um unerwünschte thermische Gradienten zu minimieren. Diese Erkenntnisse sind besonders relevant für Branchen, in denen die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität kritische Anforderungen sind.

Zudem bietet die Arbeit durch die Analyse der verschiedenen Scanstrategien, insbesondere der Vorteile der Kreuzbelichtung und Laserumschmelztechniken, wertvolle Hinweise für Anwender, die eine Steigerung der Oberflächenbeschaffenheit anstreben. Die Erhöhung der Oberflächenqualität bei gleichbleibender Maßhaltigkeit ermöglicht es, diese Techniken unmittelbar in den Fertigungsprozess zu implementieren. Dies kann die Abhängigkeit von aufwendigen Nachbearbeitungsverfahren reduzieren und somit die Effizienz der AF steigern.

7.4 Ausblick

Die Erkenntnisse dieser Arbeit eröffnen zahlreiche Ansätze für künftige Weiterentwicklungen und Anwendungen in der AF. Ein bedeutender nächster Schritt könnte darin bestehen, die Übertragbarkeit der erarbeiteten Prozessparameter und Optimierungsstrategien auf unterschiedliche Anlagen zu überprüfen, um ihre breitere Anwendbarkeit zu validieren. Die Anpassung der Methoden an weitere Materialien und Legierungen könnte ebenso neue Herausforderungen aufdecken und innovative Lösungsansätze erfordern.

Zusätzlich könnte die Langzeitstabilität der optimierten Prozesse unter variierenden Umgebungsbedingungen, wie Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen, untersucht werden. Dies ist besonders wichtig für Bauteile, die extremen Bedingungen ausgesetzt sind, wie in der Luft- und Raumfahrttechnik oder bei Anwendungen im Außenbereich. Die Implementierung von Methoden zur kontinuierlichen Überwachung und dynamischen Anpassung der

Prozessparameter könnte eine weitere Steigerung der Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit des Prozesses bewirken.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit fließen darüber hinaus unmittelbar in das Projekt "QI Digital – Additive Fertigung" ein, um die Herstellung von Bauteilen mit hohen Materialeigenschaften und Maßhaltigkeiten weiterzuentwickeln. In diesem Projekt wird das Zusammenspiel von physischem Materialfluss und digitalem Datenfluss erforscht. Die zunehmende Bedeutung digitaler Qualitätsberichte wird im Rahmen der digitalen Transformation der Qualitätsinfrastruktur, wie sie durch die deutsche Initiative "QI Digital" vorangetrieben wird, besonders hervorgehoben. Eine effektive Qualitätssicherung erfordert gemäß DIN EN ISO/ASTM 52908 [266] umfangreiche Prüfungen wie Maßhaltigkeitsuntersuchungen, Rauheits- und Dichtemessungen, Härtemessungen und Zugversuche. Diese Norm stellt sicher, dass eine reproduzierbare und standardisierte Qualitätskontrolle durchgeführt werden kann, was für sicherheitskritische Anwendungen essenziell ist.

Durch die Ergebnisse dieser Arbeit können die Prozessparameter so angepasst werden, dass eine ideale Balance zwischen Maßhaltigkeit und Materialeigenschaften erzielt wird. Dies ermöglicht die Fertigung von Bauteilen, die hohen Qualitätsstandards entsprechen und die Anforderungen vielfältiger Anwendungsbereiche erfüllen. Somit leistet diese Arbeit einen entscheidenden Beitrag zur Weiterentwicklung der additiven Fertigung und zur Implementierung moderner Qualitätsinfrastrukturlösungen.

Literaturverzeichnis

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker (Eds.), *Additive Manufacturing Technologies*, Springer New York, New York, NY, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [2] J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*, *CIRP Annals* 47 (1998) 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- [3] M. Seifi, M. Gorelik, J. Waller, N. Hrabe, N. Shamsaei, S. Daniewicz, J.J. Lewandowski, *Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification*, *JOM* 69 (2017) 439–455. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2265-2>
- [4] K.V. Wong, A. Hernandez, *A Review of Additive Manufacturing*, *ISRN Mechanical Engineering* 2012 (2012) 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- [5] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, *Additive manufacturing of metals*, *Acta Materialia* 117 (2016) 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [6] M. Krasniqi, F. Löffler, *Dimensional accuracy of additively manufactured AlSi10Mg parts: Study of the influence of build platform position, process parameters and repeatability*, *Joint Special Interest Group meeting between euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing* (2023)
- [7] F. Calignano, *Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting*, *Materials & Design* (1980-2015) 64 (2014) 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>
- [8] K. Kamarudin, M.S. Wahab, Z. Shayfull, A. Ahmed, A.A. Raus, *Dimensional Accuracy and Surface Roughness Analysis for AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting (SLM)*, *MATEC Web Conf.* 78 (2016) 1077. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801077>
- [9] H.B. Bagci, B. Sagbas, N. Durakbasa, *Effect of Direct Metal Laser Sintering Process Parameters on Dimensional Accuracy of AlSi10Mg Parts*, in: B. Katalinic (Ed.), *DAAAM International Scientific Book 2020*, DAAAM International Vienna, 2020, pp. 171–180. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2020.13>
- [10] J.K. Veetil, M. Khorasani, A. Ghasemi, B. Rolfe, I. Vrooijink, K. van Beurden, S. Moes, I. Gibson, *Build position-based dimensional deviations of laser powder-bed fusion of stainless steel 316L*, *Precision Engineering* 67 (2021) 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.024>
- [11] M. Schmitt, G. Schlick, J. Schilp, *Repeatability of Dimensional Accuracy and Mechanical Properties in Powder Bed Fusion of 16MnCr5 using a Laser Beam*, *Procedia CIRP* 114 (2022) 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.013>
- [12] K. Zhang, J. Geng, W. Liu, W. Wang, H. Wang, X. Jiang, H. Bian, *Influences of scanning strategy on the quality, accuracy, microstructure and performance of Inconel 625 parts by LAM*, *Journal of Materials Research and Technology* 26 (2023) 1962–1983. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.024>

- [13] Y. Huang, M.C. Leu, J. Mazumder, A. Donmez, Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (2015). <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- [14] A. Gebhardt (Ed.), *Additive Fertigungsverfahren*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2016. <https://doi.org/10.3139/9783446445390>
- [15] S. Bremen, W. Meiners, A. Diatlov, Selective Laser Melting, *LTJ* 9 (2012) 33–38. <https://doi.org/10.1002/latj.201290018>
- [16] L.E. Murr, E. Martinez, K.N. Amato, S.M. Gaytan, J. Hernandez, D.A. Ramirez, P.W. Shindo, F. Medina, R.B. Wicker, Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science, *Journal of Materials Research and Technology* 1 (2012) 42–54. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70009-1](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70009-1)
- [17] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science* 92 (2018) 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [18] K. Kempen, L. Thijs, J. van Humbeeck, J.-P. Kruth, Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Physics Procedia* 39 (2012) 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>
- [19] C. Körner, A. Bauereiß, E. Attar, Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 21 (2013) 85011. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/8/085011>
- [20] M.F. Zäh, S. Lutzmann, Modelling and simulation of electron beam melting, *Prod. Eng. Res. Devel.* 4 (2010) 15–23. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0197-6>
- [21] M. Vaezi, C.K. Chua, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, *Int J Adv Manuf Technol* 53 (2011) 275–284. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2821-1>
- [22] M. Lanzetta, E. Sachs, Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution, *Rapid Prototyping Journal* 9 (2003) 157–166. <https://doi.org/10.1108/13552540310477463>
- [23] E. George, P. Liacouras, F.J. Rybicki, D. Mitsouras, Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models, *Radiographics a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 37 (2017) 1424–1450. <https://doi.org/10.1148/rg.2017160165>
- [24] N. Limbasiya, A. Jain, H. Soni, V. Wankhede, G. Krolczyk, P. Sahlot, A comprehensive review on the effect of process parameters and post-process treatments on microstructure and mechanical properties of selective laser melting of AlSi10Mg, *Journal of Materials Research and Technology* 21 (2022) 1141–1176. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.092>

- [25] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E.P. Ambrosio, M. Lombardi, P. Fino, D. Manfredi, On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties, *Materials* (Basel, Switzerland) 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/ma10010076>
- [26] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, *Additive Manufacturing* 1-4 (2014) 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [27] R. Baitimerov, P. Lykov, D. Zherebtsov, L. Radionova, A. Shultc, K.G. Prashanth, Influence of Powder Characteristics on Processability of AlSi12 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting, *Materials* (Basel, Switzerland) 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11050742>
- [28] M. Schmidt, S. Greco, D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich, Support Structure Impact in Laser-Based Powder Bed Fusion of AlSi10Mg, *Procedia CIRP* 108 (2022) 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.019>
- [29] J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals* 56 (2007) 730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>
- [30] Z. Wang, Y. Zhang, S. Tan, L. Ding, A. Bernard, Support point determination for support structure design in additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 47 (2021) 102341. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102341>
- [31] R.B. Lippert, Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen, Garbsen TEWISS Verlag, 2018. <https://doi.org/10.15488/3489>
- [32] J. Jiang, X. Xu, J. Stringer, Support Structures for Additive Manufacturing: A Review, *JMMP* 2 (2018) 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- [33] R.M. Gouveia, F.J.G. Silva, E. Atzeni, D. Sormaz, J.L. Alves, A.B. Pereira, Effect of Scan Strategies and Use of Support Structures on Surface Quality and Hardness of L-PBF AlSi10Mg Parts, *Materials* (Basel, Switzerland) 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13102248>
- [34] B. Nagarajan, Z. Hu, X. Song, W. Zhai, J. Wei, Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives, *Engineering* 5 (2019) 702–720. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.002>
- [35] C.Y. Yap, C.K. Chua, Z.L. Dong, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, L.E. Loh, S.L. Sing, Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews* 2 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [36] N.T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, R. Hague, 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting, *Progress in Materials Science* 106 (2019) 100578. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>

- [37] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E.P. Ambrosio, E. Atzeni, From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering, *Materials (Basel, Switzerland)* 6 (2013) 856–869. <https://doi.org/10.3390/ma6030856>
- [38] N. Read, W. Wang, K. Essa, M.M. Attallah, Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development, *Materials & Design (1980-2015)* 65 (2015) 417–424. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>
- [39] E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno, A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties, *Progress in Materials Science* 74 (2015) 401–477. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>
- [40] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 3405 - Blatt 2: Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung, <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3405-blatt-2-additive-fertigungsverfahren-strahlschmelzen-metallischer-bauteile-qualifizierung-qualitaetssicherung-und-nachbearbeitung>, accessed 17 October 2024
- [41] A.H. Maamoun, Y.F. Xue, M.A. Elbestawi, S.C. Veldhuis, The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys, *Materials (Basel, Switzerland)* 12 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma12010012>
- [42] S. Bagherifard, N. Beretta, S. Monti, M. Riccio, M. Bandini, M. Guagliano, On the fatigue strength enhancement of additive manufactured AlSi10Mg parts by mechanical and thermal post-processing, *Materials & Design* 145 (2018) 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.055>
- [43] R. Paul, S. Anand, F. Gerner, Effect of Thermal Deformation on Part Errors in Metal Powder Based Additive Manufacturing Processes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (2014). <https://doi.org/10.1115/1.4026524>
- [44] F. Bosio, C. Phutela, N. Ghisi, A. Alhammadi, N.T. Aboulkhair, Tuning the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy via in-situ heat-treatments in laser powder bed fusion, *Materials Science and Engineering: A* 879 (2023) 145268. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145268>
- [45] N. Huang, Q. Luo, D.L. Bartles, T.W. Simpson, A.M. Beese, Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg fabricated using laser powder bed fusion, *Materials Science and Engineering: A* 895 (2024) 146228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146228>

- [46] S.P. Mohapatra, M. DEBATA, P. Sengupta, A. Panigrahi, H.C. Kaushik, D.K. PATTANAYAK, Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Additively- Manufactured Aluminium Alloy Automotive Component, in: S.P. Mohapatra, M. DEBATA, P. Sengupta, A. Panigrahi, H.C. Kaushik, D.K. PATTANAYAK (Eds.), SAE Technical Paper Series, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-28-1301>
- [47] V. Agarwal, S. Jawade, S. Atre, O. Kulkarni, The role of mechanical testing in additive manufacturing: review, *Mater. sci. eng., appl.* 1 (2021) 21–31. <https://doi.org/10.21595/msea.2021.22258>
- [48] I. Akilan, C. Velmurugan, Mechanical Testing of Additive Manufacturing Materials, in: M.A. Khan, J.T.W. Jappes (Eds.), *Innovations in Additive Manufacturing*, Springer International Publishing, Cham, 2022, pp. 239–277. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_11
- [49] S. Senck, M. Happl, M. Reiter, M. Scheerer, M. Kendel, J. Glinz, J. Kastner, Additive manufacturing and non-destructive testing of topology-optimised aluminium components, *Nondestructive Testing and Evaluation* 35 (2020) 315–327. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1774582>
- [50] P.R. Sreeraj, S.K. Mishra, P.K. Singh, A review on non-destructive evaluation and characterization of additively manufactured components, *Prog Addit Manuf* 7 (2022) 225–248. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00227-w>
- [51] E. Atzeni, A. Salmi, Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts, *Int J Adv Manuf Technol* 62 (2012) 1147–1155. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- [52] H. Hyer, Le Zhou, S. Park, G. Gottsfriz, G. Benson, B. Tolentino, B. McWilliams, K. Cho, Y. Sohn, Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 9 (2020) 484–502. <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00659-w>
- [53] R. Casati, M. Hamidi Nasab, M. Coduri, V. Tirelli, M. Vedani, Effects of Platform Pre-Heating and Thermal-Treatment Strategies on Properties of AlSi10Mg Alloy Processed by Selective Laser Melting, *Metals* 8 (2018) 954. <https://doi.org/10.3390/met8110954>
- [54] M. Sos, G. Meyer, K. Durst, C. Mittelstedt, E. Bruder, Microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg lattice structures from single contour exposure, *Materials & Design* 227 (2023) 111796. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111796>
- [55] M. Coşkun, K.C. Dizdar, G. Tarakçı, G. Özer, D. Dispınar, Recycling of additive manufactured AlSi10Mg and its effect on mechanical properties, *Materials Chemistry and Physics* 289 (2022) 126411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126411>
- [56] S. Kleiner, J. Zürcher, O. Bauer, P. Margraf, Heat Treatment Response of Selectively Laser Melted AlSi10Mg, *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 75 (2020) 113–127. <https://doi.org/10.3139/105.110418>

- [57] J. Merino, B. Ruvalcaba, J. Varela, E. Arrieta, L.E. Murr, R.B. Wicker, M. Benedict, F. Medina, Multiple, comparative heat treatment and aging schedules for controlling the microstructures and mechanical properties of laser powder bed fusion fabricated AlSi10Mg alloy, *Journal of Materials Research and Technology* 13 (2021) 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.062>
- [58] F. Sajadi, J.-M. Tiemann, N. Bandari, A. Cheloe Darabi, J. Mola, S. Schmauder, Fatigue Improvement of AlSi10Mg Fabricated by Laser-Based Powder Bed Fusion through Heat Treatment, *Metals* 11 (2021) 683. <https://doi.org/10.3390/met11050683>
- [59] N.E. Uzan, R. Shneck, O. Yeheskel, N. Frage, Fatigue of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing selective laser melting (AM-SLM), *Materials Science and Engineering: A* 704 (2017) 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.027>
- [60] Q. Yan, B. Song, Y. Shi, Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting, *Journal of Materials Science & Technology* 41 (2020) 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.08.049>
- [61] M. Krasniqi, F. Löffler, Comprehensive study on statistical methods for optimization of process parameters and material properties of AlSi10Mg in laser powder bed fusion, *Discov Mechanical Engineering* 3 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44245-024-00073-4>
- [62] M. Muhammad, P.D. Nezhadfar, S. Thompson, A. Saharan, N. Phan, N. Shamsaei, A comparative investigation on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured aluminum alloys, *International Journal of Fatigue* 146 (2021) 106165. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106165>
- [63] D. Lehmhus, T. Rahn, A. Struss, P. Gromzig, T. Wischeropp, H. Becker, High-Temperature Mechanical Properties of Stress-Relieved AlSi10Mg Produced via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing, *Materials (Basel, Switzerland)* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15207386>
- [64] S. Megahed, J. Bühring, T. Duffe, A. Bach, K.-U. Schröder, J.H. Schleifenbaum, Effect of Heat Treatment on Ductility and Precipitation Size of Additively Manufactured AlSi10Mg, *Metals* 12 (2022) 1311. <https://doi.org/10.3390/met12081311>
- [65] K. Schmidtke, Qualification of SLM additive manufacturing for aluminium, 2020. <https://doi.org/10.15480/882.2551>
- [66] N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, M. Kobashi, Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments, *Materials Science and Engineering: A* 704 (2017) 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.029>
- [67] E. Cerri, E. Ghio, G. Bolelli, Effect of the Distance from Build Platform and Post-Heat Treatment of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Single- and Multi-Laser Selective Laser Melting, *J. of Materi Eng and Perform* 30 (2021) 4981–4992. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05577-8>

- [68] M. Galetto, G. Genta, G. Maculotti, E. Verna, Defect Probability Estimation for Hardness-Optimised Parts by Selective Laser Melting, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 21 (2020) 1739–1753. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00381-1>
- [69] A.H. Maamoun, M. Elbestawi, G.K. Dosbaeva, S.C. Veldhuis, Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder, *Additive Manufacturing* 21 (2018) 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.014>
- [70] J. Fite, S. Eswarappa Prameela, J.A. Slotwinski, T.P. Weihs, Evolution of the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg during room temperature holds and low temperature aging, *Additive Manufacturing* 36 (2020) 101429. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101429>
- [71] P. Snopiński, A. Woźniak, M. Pagáč, Microstructural Evolution, Hardness, and Strengthening Mechanisms in SLM AlSi10Mg Alloy Subjected to Equal-Channel Angular Pressing (ECAP), *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14247598>
- [72] A. Serjouei, T. Libura, A. Brodecki, J. Radziejewska, P. Broniszewska, P. Pawłowski, T. Szymczak, M. Bodaghi, Z.L. Kowalewski, Strength-hardness relationship for AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion: An experimental study, *Materials Science and Engineering: A* 861 (2022) 144345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144345>
- [73] L. Girelli, M. Giovagnoli, M. Tocci, A. Pola, A. Fortini, M. Merlin, G.M. La Vecchia, Evaluation of the impact behaviour of AlSi10Mg alloy produced using laser additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A* 748 (2019) 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.078>
- [74] I. Rosenthal, M. Nahmany, A. Stern, N. Frage, Structure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing (SLM-AM), *AMR* 1111 (2015) 62–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.62>
- [75] D. Bhaduri, P. Penchev, S. Dimov, K. Essa, L.N. Carter, C.I. Pruncu, J. Jiang, D. Pullini, On the surface integrity of additive manufactured and post-processed AlSi10Mg parts, *Procedia CIRP* 87 (2020) 339–344. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.093>
- [76] C.D. Clement, J. Masson, A.S. Kabir, Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting Process, *JMMP* 6 (2022) 52. <https://doi.org/10.3390/jmmp6030052>
- [77] Z. Dong, M. Xu, H. Guo, X. Fei, Y. Liu, B. Gong, G. Ju, Microstructural evolution and characterization of AlSi10Mg alloy manufactured by selective laser melting, *Journal of Materials Research and Technology* 17 (2022) 2343–2354. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.129>
- [78] R.K. Shah, P.P. Dey, Process parameter optimization of dmls process to produce AlSi10Mg components, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1240 (2019) 12011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012011>

- [79] L. Wang, X. Jiang, M. Guo, X. Zhu, B. Yan, Characterisation of structural properties for AlSi10Mg alloys fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Technology* 33 (2017) 2274–2282. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1398513>
- [80] L. Wang, X. Jiang, Y. Zhu, Z. Ding, X. Zhu, J. Sun, B. Yan, Investigation of Performance and Residual Stress Generation of AlSi10Mg Processed by Selective Laser Melting, *Advances in Materials Science and Engineering* 2018 (2018) 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/7814039>
- [81] N.T. Aboulkhair, C. Tuck, I. Ashcroft, I. Maskery, N.M. Everitt, On the Precipitation Hardening of Selective Laser Melted AlSi10Mg, *Metall Mater Trans A* 46 (2015) 3337–3341. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2980-7>
- [82] L. Thijs, K. Kempen, J.-P. Kruth, J. van Humbeeck, Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder, *Acta Materialia* 61 (2013) 1809–1819. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.052>
- [83] M. Abedi, D. Moskovskikh, A. Nepapushev, V. Suvorova, H. Wang, V. Romanovski, Advancements in Laser Powder Bed Fusion of Carbon Nanotubes-Reinforced AlSi10Mg Alloy: A Comprehensive Analysis of Microstructure Evolution, Properties, and Future Prospects, *Metals* 13 (2023) 1619. <https://doi.org/10.3390/met13091619>
- [84] H. Wu, Y. Ren, J. Ren, L. Liang, R. Li, Q. Fang, A. Cai, Q. Shan, Y. Tian, I. Baker, Selective laser melted AlSi10Mg alloy under melting mode transition: Microstructure evolution, nanomechanical behaviors and tensile properties, *Journal of Alloys and Compounds* 873 (2021) 159823. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159823>
- [85] Le Zhou, A. Mehta, E. Schulz, B. McWilliams, K. Cho, Y. Sohn, Microstructure, precipitates and hardness of selectively laser melted AlSi10Mg alloy before and after heat treatment, *Materials Characterization* 143 (2018) 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.022>
- [86] D. Buchbinder, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties, *Journal of Laser Applications* 27 (2015). <https://doi.org/10.2351/1.4906389>
- [87] D. Buchbinder, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, J. Schrage, Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting, *Journal of Laser Applications* 26 (2014). <https://doi.org/10.2351/1.4828755>
- [88] X. Liu, C. Zhao, X. Zhou, Z. Shen, W. Liu, Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Materials & Design* 168 (2019) 107677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107677>
- [89] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. Bültmann, High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts, *Physics Procedia* 12 (2011) 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035>

- [90] J. CHEN, W. HOU, X. WANG, S. CHU, Z. YANG, Microstructure, porosity and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg, *Chinese Journal of Aeronautics* 33 (2020) 2043–2054. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.017>
- [91] S. Marola, S. Bosia, A. Veltro, G. Fiore, D. Manfredi, M. Lombardi, G. Amato, M. Baricco, L. Battezzati, Residual stresses in additively manufactured AlSi10Mg: Raman spectroscopy and X-ray diffraction analysis, *Materials & Design* 202 (2021) 109550. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109550>
- [92] L. Pezzato, C. Gennari, M. Franceschi, K. Brunelli, Influence of silicon morphology on direct current plasma electrolytic oxidation process in AlSi10Mg alloy produced with laser powder bed fusion, *Scientific reports* 12 (2022) 14329. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18176-x>
- [93] L. Růžičková, J. Sobotová, L. Beránek, L. Pelikán, J. Šimota, Influence of Stress Relief Annealing Parameters on Mechanical Properties and Decomposition of Eutectic Si Network of L-PBF Additive Manufactured Alloy AlSi10Mg, *Metals* 12 (2022) 1497. <https://doi.org/10.3390/met12091497>
- [94] Y. Geng, H. Tang, J. Xu, Y. Hou, Y. Wang, Z. He, Z. Zhang, H. Ju, L. Yu, Influence of process parameters and aging treatment on the microstructure and mechanical properties of AlSi8Mg3 alloy fabricated by selective laser melting, *Int J Miner Metall Mater* 29 (2022) 1770–1779. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2287-1>
- [95] C. Zhang, H. Zhu, Y. Qi, X. Zeng, The Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melting AlSi10Mg, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 538 (2019) 12023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/538/1/012023>
- [96] Q. Han, Y. Jiao, Effect of heat treatment and laser surface remelting on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting, *Int J Adv Manuf Technol* 102 (2019) 3315–3324. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03272-y>
- [97] A. Carrozza, A. Aversa, F. Mazzucato, E. Bassini, D. Manfredi, S. Biamino, A. Valente, P. Fino, An investigation on the effect of different multi-step heat treatments on the microstructure, texture and mechanical properties of the DED-produced Ti-6Al-4V alloy, *Materials Characterization* 189 (2022) 111958. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111958>
- [98] S.M. Yusuf, M. Hoegden, N. Gao, Effect of sample orientation on the microstructure and microhardness of additively manufactured AlSi10Mg processed by high-pressure torsion, *Int J Adv Manuf Technol* 106 (2020) 4321–4337. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04817-5>
- [99] M. Guo, M. Sun, J. Huang, S. Pang, A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al-10Si-0.5Mg Alloys Prepared under Different Conditions, *Metals* 12 (2022) 142. <https://doi.org/10.3390/met12010142>
- [100] K. Kempen, L. Thijs, E. Yasa, M. Badrossamay, W. Verheecke, J.-P. Kruth, *Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg*, University of Texas at Austin, 2011. <https://doi.org/10.26153/tsw/15310>

- [101] G.N. Levy, R. Schindel, J.P. Kruth, RAPID MANUFACTURING AND RAPID TOOLING WITH LAYER MANUFACTURING (LM) TECHNOLOGIES, STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES, *CIRP Annals* 52 (2003) 589–609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6)
- [102] M.F. Zaeh, G. Branner, Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting, *Prod. Eng. Res. Devel.* 4 (2010) 35–45. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0192-y>
- [103] G. Kasperovich, R. Becker, K. Artzt, P. Barriobero-Vila, G. Requena, J. Haubrich, The effect of build direction and geometric optimization in laser powder bed fusion of Inconel 718 structures with internal channels, *Materials & Design* 207 (2021) 109858. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109858>
- [104] M. Waqas, D. He, H. Elahi, S. Riaz, M. Eugeni, P. Gaudenzi, Study of the Surface and Dimensional Quality of the AlSi10Mg Thin-Wall Components Manufactured by Selective Laser Melting, *J. Compos. Sci.* 5 (2021) 126. <https://doi.org/10.3390/jcs5050126>
- [105] A. Charles, A. Elkasser, L. Thijs, S. Scholz, Effect of build platform location and part orientation on dimensional accuracy of down-facing surfaces in LPBF, *World Congress on Micro and Nano Manufacturing 2021* (2021)
- [106] American Society for Precision Engineering, European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2018 ASPE and euspenn Summer Topical Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing: July 22-25, 2018 proceedings, ASPE - the American Society for Precision Engineering, Raleigh, NC, 2018
- [107] D. Obilanade, C. Dordlofva, P. Törlind, SURFACE ROUGHNESS CONSIDERATIONS IN DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING - A LITERATURE REVIEW, *Proc. Des. Soc.* 1 (2021) 2841–2850. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.545>
- [108] J. Musekamp, T. Reiber, H.C. Hoche, M. Oechsner, M. Weigold, E. Abele, Influence of LPBF-Surface Characteristics on Fatigue Properties of Scalmalloy®, *Metals* 11 (2021) 1961. <https://doi.org/10.3390/met11121961>
- [109] M.A. Balbaa, A. Ghasemi, E. Fereiduni, M.A. Elbestawi, S.D. Jadhav, J.-P. Kruth, Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10mg alloy, *Additive Manufacturing* 37 (2021) 101630. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101630>
- [110] E. Maleki, S. Bagherifard, O. Unal, F. Sabouri, M. Bandini, M. Guagliano, Effects of different mechanical and chemical surface post-treatments on mechanical and surface properties of as-built laser powder bed fusion AlSi10Mg, *Surface and Coatings Technology* 439 (2022) 128391. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128391>
- [111] R. Pal, A. Basak, Linking Powder Properties, Printing Parameters, Post-Processing Methods, and Fatigue Properties in Additive Manufacturing of AlSi10Mg, *Alloys* 1 (2022) 149–179. <https://doi.org/10.3390/alloys1020010>

- [112] L. Cao, J. Li, J. Hu, H. Liu, Y. Wu, Q. Zhou, Optimization of surface roughness and dimensional accuracy in LPBF additive manufacturing, *Optics & Laser Technology* 142 (2021) 107246. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107246>
- [113] A. Morvayova, L. Fabbiano, N. Contuzzi, F. Caiazza, G. Casalino, On the influence of building position on dimensional accuracy and surface quality of aluminum blocks manufactured by L-PBF, *Optics & Laser Technology* 167 (2023) 109830. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109830>
- [114] M.J. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik, P.J. Depond, W.E. King, Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes, *Acta Materialia* 114 (2016) 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.017>
- [115] A.H. Maamoun, Y.F. Xue, M.A. Elbestawi, S.C. Veldhuis, Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy, *Materials (Basel, Switzerland)* 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11122343>
- [116] J. Praneeth, S. Venkatesh, L. Sivarama Krishna, Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM, *Materials Today: Proceedings* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.222>
- [117] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion - AluGenerativ Abschlussbericht ; Projektlaufzeit: Februar 2007 - Januar 2010, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2010. <https://doi.org/10.2314/GBV:667761012>
- [118] X. Shi, C. Yan, W. Feng, Y. Zhang, Z. Leng, Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting, *Optics & Laser Technology* 132 (2020) 106471. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106471>
- [119] P. Ninpetch, P. Chalermkarnnon, P. Kowitwarangkul, Multiphysics Simulation of Thermal-Fluid Behavior in Laser Powder Bed Fusion of H13 Steel: Influence of Layer Thickness and Energy Input, *Met. Mater. Int.* 29 (2023) 536–551. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01239-z>
- [120] C.S. Rakesh, N. Priyanka, R. Jayaganthan, N.J. Vasa, Effect of build atmosphere on the mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 17231–17238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.133>
- [121] B. Diepold, M.S. Palm, A. Wimmer, T. Sebald, H.W. Höppel, S. Neumeier, M. Göken, Rotating Scan Strategy Induced Anisotropic Microstructural and Mechanical Behavior of Selective Laser Melted Materials and Their Reduction by Heat Treatments, *Adv Eng Mater* 23 (2021) 2100622. <https://doi.org/10.1002/adem.202100622>
- [122] E.H. Valente, C. Gundlach, T.L. Christiansen, M.A.J. Somers, Effect of Scanning Strategy During Selective Laser Melting on Surface Topography, Porosity, and Microstructure of Additively Manufactured Ti-6Al-4V, *Applied Sciences* 9 (2019) 5554. <https://doi.org/10.3390/app9245554>

- [123] C. Chen, J. Yin, H. Zhu, Z. Xiao, L. Zhang, X. Zeng, Effect of overlap rate and pattern on residual stress in selective laser melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 145 (2019) 103433. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103433>
- [124] A.G. Demir, B. Previtali, Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction, *Int J Adv Manuf Technol* 93 (2017) 2697–2709. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0697-z>
- [125] T. Bhardwaj, M. Shukla, Effect of laser scanning strategies on texture, physical and mechanical properties of laser sintered maraging steel, *Materials Science and Engineering: A* 734 (2018) 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.089>
- [126] L. Zhang, S. Zhang, H. Zhu, Effect of scanning strategy on geometric accuracy of the circle structure fabricated by selective laser melting, *Journal of Manufacturing Processes* 64 (2021) 907–915. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.015>
- [127] J. Tomas, L. Hitzler, M. Köller, J. von Kobylinski, M. Sedlmajer, E. Werner, M. Merkel, The Dimensional Accuracy of Thin-Walled Parts Manufactured by Laser-Powder Bed Fusion Process, *JMMP* 4 (2020) 91. <https://doi.org/10.3390/jmmp4030091>
- [128] Y.M. Arisoy, L.E. Criales, T. Özel, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez, Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion, *Int J Adv Manuf Technol* 90 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9429-z>
- [129] A. Paraschiv, G. Matache, N. Constantin, M. Vladut, Investigation of Scanning Strategies and Laser Remelting Effects on Top Surface Deformation of Additively Manufactured IN 625, *Materials (Basel, Switzerland)* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15093198>
- [130] J. Han, M. Wu, Y. Ge, A Study on the Dimension Accuracy on the Inner Structure of the 3D Printed Parts Caused by the Scanning Strategy, *Materials (Basel, Switzerland)* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12081333>
- [131] H. Zhang, D. Gu, D. Dai, Laser printing path and its influence on molten pool configuration, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion processed rare earth element modified Al-Mg alloy, *Virtual and Physical Prototyping* 17 (2022) 308–328. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2036530>
- [132] B. Liu, B.-Q. Li, Z. Li, Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg, *Results in Physics* 12 (2019) 982–988. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.018>
- [133] P. Ponnusamy, R.A. Rahman Rashid, S.H. Masood, D. Ruan, S. Palanisamy, Mechanical Properties of SLM-Printed Aluminium Alloys: A Review, *Materials (Basel, Switzerland)* 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13194301>
- [134] J.A.T. Rios, P. Zambrano-Robledo, J.D.T. Taborda, J.A.G. Espinoza, C.J. Isaza, A. Juárez-Hernández, Process parameters effect and porosity reduction on AlSi10Mg parts manufactured by selective laser melting, *Int J Adv Manuf Technol* 129 (2023) 3341–3351. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12521-8>

- [135] M.S. Kumar, C.-H. Yang, M.U. Farooq, V. Kavimani, A.A. Adesoji, Enhanced structural integrity of Laser Powder Bed Fusion based AlSi10Mg parts by attaining defect free melt pool formations, *Scientific reports* 13 (2023) 16672. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43718-2>
- [136] B. Palumbo, F. Del Re, M. Martorelli, A. Lanzotti, P. Corrado, Tensile Properties Characterization of AlSi10Mg Parts Produced by Direct Metal Laser Sintering via Nested Effects Modeling, *Materials (Basel, Switzerland)* 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/ma10020144>
- [137] W. Pan, Z. Ye, Y. Zhang, Y. Liu, B. Liang, Z. Zhai, Research on Microstructure and Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting, *Materials (Basel, Switzerland)* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15072528>
- [138] S. Defanti, C. Cappelletti, A. Gatto, E. Tognoli, F. Fabbri, Boosting Productivity of Laser Powder Bed Fusion for AlSi10Mg, *JMMP* 6 (2022) 112. <https://doi.org/10.3390/jmmp6050112>
- [139] M.L.B. Leal, B. Bermudez-Reyes, P. Del Carmen Zambrano Robledo, O. Lopez-Botello, Parameter optimization of aluminum alloy thin structures obtained by Selective Laser Melting, *MRS Advances* 4 (2019) 2997–3005. <https://doi.org/10.1557/adv.2019.434>
- [140] L. Minkowitz, S. Arneitz, P.S. Effertz, S.T. Amancio-Filho, Laser-powder bed fusion process optimisation of AlSi10Mg using extra trees regression, *Materials & Design* 227 (2023) 111718. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111718>
- [141] Y. Liu, Z. Wu, Q. Wang, L. Zhao, X. Zhang, W. Gao, J. Xu, Y. Song, X. Song, X. Zhang, Optimization of Parameters in Laser Powder Bed Fusion TA15 Titanium Alloy Using Taguchi Method, *Crystals* 12 (2022) 1385. <https://doi.org/10.3390/cryst12101385>
- [142] A. Majeed, A. Ahmed, A. Salam, M.Z. Sheikh, Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 2 (2019) 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.08.001>
- [143] C. Gao, H. Tang, S. Zhang, Z. Ma, Y. Bi, J.-H. Rao, Process Optimization for Up-Facing Surface Finish of AlSi10Mg Alloy Produced by Laser Powder Bed Fusion, *Metals* 12 (2022) 2053. <https://doi.org/10.3390/met12122053>
- [144] H. Miao, F. Yusof, M.S.A. Karim, I.A. Badruddin, M. Hussien, S. Kamangar, H. Zhang, Process parameter optimisation for selective laser melting of AlSi10Mg-316L multi-materials using machine learning method, *Int J Adv Manuf Technol* 129 (2023) 3093–3108. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12489-5>
- [145] A. Du Plessis, I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, S.G. Le Roux, X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing: A Review of the Current Technology and Applications, *3D Printing and Additive Manufacturing* 5 (2018) 227–247. <https://doi.org/10.1089/3dp.2018.0060>

- [146] A. Thompson, I. Maskery, R.K. Leach, X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review, *Meas. Sci. Technol.* 27 (2016) 72001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/7/072001>
- [147] H. Villarraga-Gómez, C. Peitsch, A. Ramsey, S.T. Smith, The Role of Computed Tomography in Additive Manufacturing, 2018 ASPE and euspen Summer Topical Meeting - Advancing Precision in Additive Manufacturing (2018)
- [148] H. Villarraga-Gómez, C. Lee, S.T. Smith, Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures, *Precision Engineering* 51 (2018) 291–307. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.021>
- [149] J.P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. de Chiffre, A. Weckenmann, Computed tomography for dimensional metrology, *CIRP Annals* 60 (2011) 821–842. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.006>
- [150] B.K. Das, Basic Principles of CT Imaging, in: B.K. Das (Ed.), *Positron Emission Tomography*, Springer India, New Delhi, 2015, pp. 181–184. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2098-5_20
- [151] F. Zanini, L. Pagani, E. Savio, S. Carmignato, Characterisation of additively manufactured metal surfaces by means of X-ray computed tomography and generalised surface texture parameters, *CIRP Annals* 68 (2019) 515–518. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.074>
- [152] M. Marxer, C. Bach, C.P. Keferstein, Koordinatenmesstechnik, in: M. Marxer, C. Bach, C.P. Keferstein (Eds.), *Fertigungsmesstechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021, pp. 55–105. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34168-8_4
- [153] L. Schild, A. Kraemer, G. Lanza, Influence of surface roughness on measurement uncertainty in Computed Tomography, *Special Issue of e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)* (2018)
- [154] S. Lou, S.B. Brown, W. Sun, W. Zeng, X. Jiang, P.J. Scott, An investigation of the mechanical filtering effect of tactile CMM in the measurement of additively manufactured parts, *Measurement* 144 (2019) 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.066>
- [155] VDI/VDE, 2630 Blatt 2.1: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren, <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2630-blatt-21-computertomografie-in-der-dimensionellen-messtechnik-bestimmung-der-messunsicherheit-und-der-pruefprozesseignung-von-koordinatenmessgeraeten-mit-ct-sensoren>
- [156] V. Aloisi, S. Carmignato, Influence of surface roughness on X-ray computed tomography dimensional measurements of additive manufactured parts, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation* 6 (2016) 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.csnadt.2016.05.005>

- [157] H. Villarraga-Gómez, S.T. Smith, Effect of geometric magnification on dimensional measurements with a metrology-grade X-ray computed tomography system, *Precision Engineering* 73 (2022) 488–503. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.10.015>
- [158] S. Carmignato, V. Aloisi, F. Medeoosi, F. Zanini, E. Savio, Influence of surface roughness on computed tomography dimensional measurements, *CIRP Annals* 66 (2017) 499–502. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.067>
- [159] H. Schwenke, F. Härtig, U. Neuschaefer-Rube, O. Jusko, *Koordinatenmesstechnik als Schlüsseltechnologie der mechanischen Produktion – Herausforderungen für die PTB*, PTB Mitteilungen (2007)
- [160] W. Everhart, E. Fitzgerald, The effect of location on the structure and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel, *Solid Freeform Fabrication Symposium* (2016)
- [161] A. Guzanová, D. Draganovská, G. Ižaričková, J. Živčák, R. Hudák, J. Brezinová, R. Moro, The Effect of Position of Materials on a Build Platform on the Hardness, Roughness, and Corrosion Resistance of Ti6Al4V Produced by DMLS Technology, *Metals* 9 (2019) 1055. <https://doi.org/10.3390/met9101055>
- [162] Z.C. Oter, M. Coskun, Effect of Building Platform Position on the Surface Quality, Dimensional Accuracy, and Geometrical Precision of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Parts, *SSRN Journal* (2021). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3785856>
- [163] C.-Y. Chien, T.-N. Le, Z.-H. Lin, Y.-L. Lo, Numerical and experimental investigation into gas flow field and spattering phenomena in laser powder bed fusion processing of Inconel 718, *Materials & Design* 210 (2021) 110107. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110107>
- [164] P.R. Gradl, D.C. Tinker, J. Ivester, S.W. Skinner, T. Teasley, J.L. Bili, Geometric feature reproducibility for laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing with Inconel 718, *Additive Manufacturing* 47 (2021) 102305. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102305>
- [165] Ahmed, Majeed, Atta, Guozhu, Dimensional Quality and Distortion Analysis of Thin-Walled Alloy Parts of AlSi10Mg Manufactured by Selective Laser Melting, *JMMP* 3 (2019) 51. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020051>
- [166] W.J. Hwang, G.B. Bang, S.-H. Choa, Effect of a Stress Relief Heat Treatment of AlSi7Mg and AlSi10Mg Alloys on Mechanical and Electrical Properties According to Silicon Precipitation, *Met. Mater. Int.* 29 (2023) 1311–1322. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01304-7>
- [167] X. Han, H. Zhu, X. Nie, G. Wang, X. Zeng, Investigation on Selective Laser Melting AlSi10Mg Cellular Lattice Strut: Molten Pool Morphology, Surface Roughness and Dimensional Accuracy, *Materials* (Basel, Switzerland) 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11030392>

- [168] Y. Cai, T. Lu, G. Ma, W. Li, Y. Pan, H. Ding, Effects of geometrical characteristics on defect distributions in alloy components produced by selective laser melting, *China Foundry* 18 (2021) 369–378. <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1048-0>
- [169] D. Buchbinder, G. Schilling, W. Meiners, N. Pirch, Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM
- [170] C. Hartmann, P. Lechner, B. Himmel, Y. Krieger, T.C. Lueth, W. Volk, Compensation for Geometrical Deviations in Additive Manufacturing, *Technologies* 7 (2019) 83. <https://doi.org/10.3390/technologies7040083>
- [171] C. Ye, C. Zhang, J. Zhao, Y. Dong, Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review, *J. of Materi Eng and Perform* 30 (2021) 6407–6425. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06021-7>
- [172] G. Leuteritz, C. Demminger, H.-J. Maier, R. Lachmayer, Hybride Additive Fertigung: Ansätze zur Kombination von additiven und gießtechnischen Fertigungsverfahren für die Serienfertigung, in: R. Lachmayer, R.B. Lippert, S. Kaierle (Eds.), *Additive Serienfertigung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018, pp. 115–126. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56463-9_8
- [173] A. Avanzini, D. Battini, M. Gelfi, L. Girelli, C. Petrogalli, A. Pola, M. Tocci, Investigation on fatigue strength of sand-blasted DMLS- AlSi10Mg alloy, *Procedia Structural Integrity* 18 (2019) 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.146>
- [174] J. Berglund, J. Holmberg, K. Wärmefjord, R. Söderberg, Detailed evaluation of topographical effects of Hirtisation post-processing on electron beam powder bed fusion (PBF-EB) manufactured Ti-6Al-4V component, *Precision Engineering* 85 (2024) 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.10.007>
- [175] Z. Que, T. Riipinen, P. Ferreirós, S. Goel, K. Sipilä, T. Saario, T. Ikäläinen, A. Toivonen, A. Revuelta, Effects of surface finishes, heat treatments and printing orientations on stress corrosion cracking behavior of laser powder bed fusion 316L stainless steel in high-temperature water, *Corrosion Science* 233 (2024) 112118. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112118>
- [176] V. Sandell, J. Nilsson, T. Hansson, P. Åkerfeldt, M.-L. Antti, Effect of chemical post-processing on surfaces and sub-surface defects in electron beam melted Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 193 (2022) 112281. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112281>
- [177] Ming Tang, Inclusions, Porosity, and Fatigue of AlSi10Mg Parts Produced by Selective Laser Melting, 2017. <https://doi.org/10.1184/R1/6720185.v1>
- [178] V. Lubkowitz, J. Alber, F. Zanger, PBF-LB Process-Induced Regular Cavities for Light-weight AlSi10Mg Structures, *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14216665>

- [179] K.V. Yang, P. Rometsch, T. Jarvis, J. Rao, S. Cao, C. Davies, X. Wu, Porosity formation mechanisms and fatigue response in Al-Si-Mg alloys made by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A* 712 (2018) 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.078>
- [180] W. Wang, J. Ning, S.Y. Liang, Prediction of lack-of-fusion porosity in laser powder-bed fusion considering boundary conditions and sensitivity to laser power absorption, *Int J Adv Manuf Technol* 112 (2021) 61–70. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06224-7>
- [181] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, M.A. Donmez, An Additive Manufacturing Test Artifact, *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology* 119 (2014) 429–459. <https://doi.org/10.6028/jres.119.017>
- [182] A. Giorgetti, F. Ceccanti, N. Baldi, S. Kemble, G. Arcidiacono, P. Citti, Axiomatic Design of a Test Artifact for PBF-LM Machine Capability Monitoring, *Machines* 12 (2024) 199. <https://doi.org/10.3390/machines12030199>
- [183] S. Brenner, V. Nedeljkovic-Groha, Enhancing Dimensional Accuracy in Laser Powder Bed Fusion by Scaling Factor Optimization and 3D Scanner Capability Analysis (2024). https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2024_009
- [184] B. Amir, E. Grinberg, Y. Gale, O. Sadot, S. Samuha, Influences of platform heating and post-processing stress relief treatment on the mechanical properties and microstructure of selective-laser-melted AlSi10Mg alloys, *Materials Science and Engineering: A* 822 (2021) 141612. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141612>
- [185] G. Di Egidio, C. Martini, J. Börjesson, E. Ghassemali, L. Ceschini, A. Morri, Influence of Microstructure on Fracture Mechanisms of the Heat-Treated AlSi10Mg Alloy Produced by Laser-Based Powder Bed Fusion, *Materials (Basel, Switzerland)* 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16052006>
- [186] C. Li, Z.Y. Liu, X.Y. Fang, Y.B. Guo, Residual Stress in Metal Additive Manufacturing, *Procedia CIRP* 71 (2018) 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.039>
- [187] N. Bastola, M.P. Jahan, N. Rangasamy, C.S. Rakurty, A Review of the Residual Stress Generation in Metal Additive Manufacturing: Analysis of Cause, Measurement, Effects, and Prevention, *Micromachines* 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14071480>
- [188] A. Salmi, E. Atzeni, L. Iuliano, M. Galati, Experimental Analysis of Residual Stresses on AlSi10Mg Parts Produced by Means of Selective Laser Melting (SLM), *Procedia CIRP* 62 (2017) 458–463. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.030>
- [189] D. Xie, F. Lv, Y. Yang, L. Shen, Z. Tian, C. Shuai, B. Chen, J. Zhao, A Review on Distortion and Residual Stress in Additive Manufacturing, *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers* 1 (2022) 100039. <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100039>
- [190] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 9th ed., Hanser, München, 2016. <https://doi.org/10.3139/9783446447172>

- [191] A. Huxol, F.-J. Villmer, DoE Methods for Parameter Evaluation in Selective Laser Melting, *IFAC-PapersOnLine* 52 (2019) 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.041>
- [192] E. Franczyk, M. Machno, W. Zębala, Investigation and Optimization of the SLM and WEDM Processes' Parameters for the AlSi10Mg-Sintered Part, *Materials* (Basel, Switzerland) 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14020410>
- [193] M. Ternner, T. Ricordel, J.-H. Cho, J.-S. Lee, The Response Surface Methodology for Optimizing the Process Parameters of Selective Laser Melting, *Journal of Welding and Joining* 37 (2019) 27–39. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.1.4>
- [194] S. Shankar, A. Balaji, A. Pramanik, Optimization of turning parameters for AlSi 10 Mg/SCBA/SiC hybrid metal matrix composite using response surface methodology, *Mater. Res. Express* 6 (2019) 106553. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab393b>
- [195] L. Dowling, J. Kennedy, S. O'Shaughnessy, D. Trimble, A review of critical repeatability and reproducibility issues in powder bed fusion, *Materials & Design* 186 (2020) 108346. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108346>
- [196] E11 Committee, Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods, ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/E0177-20>
- [197] L. Cordova, C. Sithole, E. Macía Rodríguez, I. Gibson, M. Campos, Impact of powder reusability on batch repeatability of Ti6Al4V ELI for PBF-LB industrial production, *Powder Metallurgy* 66 (2023) 129–138. <https://doi.org/10.1080/00325899.2022.2133357>
- [198] D.B. Kim, P. Witherell, Y. Lu, S. Feng, Toward a Digital Thread and Data Package for Metals-Additive Manufacturing, *Smart and sustainable manufacturing systems* 1 (2017) 75–99. <https://doi.org/10.1520/SSMS20160003>
- [199] K. Prashanth, S. Scudino, R. Chatterjee, O. Salman, J. Eckert, Additive Manufacturing: Reproducibility of Metallic Parts, *Technologies* 5 (2017) 8. <https://doi.org/10.3390/technologies5010008>
- [200] M. Schneider, D. Bettge, M. Binder, K. Dollmeier, M. Dreyer, K. Hilgenberg, B. Klöden, T. Schlingmann, J. Schmidt, Reproducibility and Scattering in Additive Manufacturing: Results from a Round Robin on PBF-LB/M AlSi10Mg Alloy, *Practical Metallography* 59 (2022) 580–614. <https://doi.org/10.1515/pm-2022-1018>
- [201] O. Pannitz, J.T. Sehr, Transferability of Process Parameters in Laser Powder Bed Fusion Processes for an Energy and Cost Efficient Manufacturing, *Sustainability* 12 (2020) 1565. <https://doi.org/10.3390/su12041565>
- [202] M. Beal, M.-N. Azzougagh, J. Pourchez, P. Bertrand, E. Cabrol, H. Si-Mohand, F.-X. Keller, Effect of powder reuse on physical, chemical and toxicological properties of 6061-Zr aluminum alloy processed by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), *Matériaux & Techniques* 111 (2023) 103. <https://doi.org/10.1051/mattech/2023013>
- [203] V. Seyda, N. Kaufmann, C. Emmelmann, Investigation of Aging Processes of Ti-6Al-4 V Powder Material in Laser Melting, *Physics Procedia* 39 (2012) 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.057>

- [204] H.P. Tang, M. Qian, N. Liu, X.Z. Zhang, G.Y. Yang, J. Wang, Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting, *JOM* 67 (2015) 555–563. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1300-4>
- [205] M. Megahed, Optimierung der additiven Fertigung durch numerische Simulation, *Light-weight Des* 9 (2016) 74–77. <https://doi.org/10.1007/s35725-016-0033-9>
- [206] E. Macherauch, H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25374-5>
- [207] C. Weller, R. Kleer, F.T. Piller, Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *International Journal of Production Economics* 164 (2015) 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>
- [208] P. Das, R. Chandran, R. Samant, S. Anand, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, *Procedia Manufacturing* 1 (2015) 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>
- [209] S.L. Sing, W.Y. Yeong, Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments, *Virtual and Physical Prototyping* 15 (2020) 359–370. <https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1779999>
- [210] B. Ahuja, A. Schaub, D. Junker, M. Karg, F. Tenner, R. Plettke, M. Merklein, M. Schmidt, A ROUND ROBIN STUDY FOR LASER BEAM MELTING IN METAL POWDER BED, *SAJIE* 27 (2016). <https://doi.org/10.7166/27-2-1201>
- [211] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 3405 - Blatt 2.1: Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenn-datenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg, <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3405-blatt-21-additive-fertigungsverfahren-pulverbettbasiertes-schmelzen-von-metall-mittels-laserstrahl-pbf-lbm-materialkenn-datenblatt-aluminiumlegierung-alsi10mg>, accessed 17 October 2024
- [212] Heraeus Additive Manufacturing GmbH, Metal powder: AlSi10Mg, 2024, https://www.heraeus.com/media/media/group/doc_group/products_1/additivemanufacturing/datasheets_en/AlSi10Mg.pdf, accessed 20 September 2024
- [213] DIN EN 1706:2021-10, Aluminium und Aluminiumlegierungen_ - Gussstücke_ - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN_1706:2020+A1:2021, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3283422>
- [214] K.G. Prashanth, S. Scudino, T. Maity, J. Das, J. Eckert, Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?, *Materials Research Letters* 5 (2017) 386–390. <https://doi.org/10.1080/21663831.2017.1299808>
- [215] U. Scipioni Bertoli, A.J. Wolfer, M.J. Matthews, J.-P.R. Delplanque, J.M. Schoenung, On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting, *Materials & Design* 113 (2017) 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.037>

- [216] DIN 50125:2022-08, Prüfung metallischer Werkstoffe_ - Zugproben, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3337825>
- [217] DIN EN ISO 6507-1:2024-01, Metallische Werkstoffe_ - Härteprüfung nach Vickers_ - Teil_1: Prüfverfahren (ISO_6507-1:2023); Deutsche Fassung EN_ISO_6507-1:2023, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3503781>
- [218] DIN EN ISO 6892-1:2020-06, Metallische Werkstoffe_ - Zugversuch_ - Teil_1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO_6892-1:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_6892-1:2019, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3132591>
- [219] DIN EN ISO/ASTM 52921:2017-01, Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung_ - Koordinatensysteme und Prüfmethodologien (ISO/ASTM 52921:2013); Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52921:2016, Beuth Verlag GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/2580022>
- [220] W. Li, S. Li, J. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, Q. Wei, C. Yan, Y. Shi, Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism, *Materials Science and Engineering: A* 663 (2016) 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088>
- [221] S. Xu, Q. Lu, Y. Ou, P. Zhang, H. Yan, T. Sun, S. Ma, Z. Luo, Y. Tian, Effect of Heat Treatment on the Anisotropic Mechanical Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting, *J. of Materi Eng and Perform* 33 (2024) 10401–10414. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08669-9>
- [222] I. Rosenthal, R. Shneck, A. Stern, Heat treatment effect on the mechanical properties and fracture mechanism in AlSi10Mg fabricated by additive manufacturing selective laser melting process, *Materials Science and Engineering: A* 729 (2018) 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.074>
- [223] A. Boschetto, L. Bottini, D. Pilone, Effect of laser remelting on surface roughness and microstructure of AlSi10Mg selective laser melting manufactured parts, *Int J Adv Manuf Technol* 113 (2021) 2739–2759. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06775-3>
- [224] X. Wang, L. Li, J. Qu, W. Tao, Microstructure and mechanical properties of laser metal deposited AlSi10Mg alloys, *Materials Science and Technology* 35 (2019) 2284–2293. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1674022>
- [225] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews* 57 (2012) 133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- [226] J.J. Lewandowski, M. Seifi, Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, *Annu. Rev. Mater. Res.* 46 (2016) 151–186. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>

- [227] N.O. Larrosa, W. Wang, N. Read, M.H. Loretto, C. Evans, J. Carr, U. Tradowsky, M.M. Attallah, P.J. Withers, Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 98 (2018) 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.09.011>
- [228] M. Saravana Kumar, E. Mohan, S. Robinson, D. Thivya Prasad, Comparative Study on Morphological, Physical and Mechanical Characteristics of L-PBF Based AlSi10Mg Parts with Conventional Stir Casted Al-10 %SiC Composites, *Silicon* 14 (2022) 2695–2706. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01065-9>
- [229] N.T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N.M. Everitt, The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment, *Materials Science and Engineering: A* 667 (2016) 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.092>
- [230] Y. Xiao, Y. Yang, S. Wu, J. Chen, Di Wang, C. Song, Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion Under Nitrogen and Argon Atmosphere, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 35 (2022) 486–500. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01354-7>
- [231] R. A.A, W. M.S, I. M., K. K., A. Ahmed, S. S, Mechanical and Physical Properties of AlSi10Mg Processed through Selective Laser Melting, *IJET* 8 (2016) 2612–2618. <https://doi.org/10.21817/ijet/2016/v8i6/160806217>
- [232] W.H. Kan, L.N.S. Chiu, C.V.S. Lim, Y. Zhu, Y. Tian, D. Jiang, A. Huang, A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion, *J Mater Sci* 57 (2022) 9818–9865. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-06990-7>
- [233] T. Yang, T. Liu, W. Liao, E. MacDonald, H. Wei, C. Zhang, X. Chen, K. Zhang, Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds* 849 (2020) 156300. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156300>
- [234] H.C. Taylor, E.A. Garibay, R.B. Wicker, Toward a common laser powder bed fusion qualification test artifact, *Additive Manufacturing* 39 (2021) 101803. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101803>
- [235] M. Mahesh, Y.S. Wong, J. Fuh, H.T. Loh, Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes, *Rapid Prototyping Journal* 10 (2004) 123–135. <https://doi.org/10.1108/13552540410526999>
- [236] V.M. Rivas Santos, A. Thompson, D. Sims-Waterhouse, I. Maskery, P. Woolliams, R. Leach, Design and characterisation of an additive manufacturing benchmarking artefact following a design-for-metrology approach, *Additive Manufacturing* 32 (2020) 100964. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100964>
- [237] M.-A. de Pastre, S.-C. Toguem Tagne, N. Anwer, Test artefacts for additive manufacturing: A design methodology review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 31 (2020) 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.008>

- [238] DIN EN ISO/ASTM 52902:2023-12, Additive Fertigung_ - Testkörper_ - Geometrische Leistungsbewertung additiver Fertigungssysteme (ISO/ASTM 52902:2023); Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52902:2023, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3490353>
- [239] K. Abdel Ghany, S.F. Moustafa, Comparison between the products of four RPM systems for metals, *Rapid Prototyping Journal* 12 (2006) 86–94. <https://doi.org/10.1108/13552540610652429>
- [240] T. Brajlilh, B. Valentan, J. Balic, I. Drstvensek, Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines, *Rapid Prototyping Journal* 17 (2011) 64–75. <https://doi.org/10.1108/13552541111098644>
- [241] D. Dimitrov, W. van Wijck, K. Schreve, N. de Beer, J. Meljer, An Investigation of the Capability Profile of the Three Dimensional Printing Process with an Emphasis on the Achievable Accuracy, *CIRP Annals* 52 (2003) 189–192. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60562-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60562-9)
- [242] A.J. Lopes, M.A. Perez, D. Espalin, R.B. Wicker, Comparison of ranking models to evaluate desktop 3D printers in a growing market, *Additive Manufacturing* 35 (2020) 101291. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101291>
- [243] L. Rebaioli, I. Fassi, A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes, *Int J Adv Manuf Technol* 93 (2017) 2571–2598. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0570-0>
- [244] D. Scaravetti, P. Dubois, R. Duchamp, Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part, *Int J Adv Manuf Technol* 38 (2008) 683–690. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1129-2>
- [245] J.P. Kruth, Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, *CIRP Annals* 40 (1991) 603–614. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6)
- [246] M. Bartscher, O. Sato, F. Härtig, U. Neuschaefer-Rube, Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography, *Meas. Sci. Technol.* 25 (2014) 64013. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/064013>
- [247] VDI/VDE, VDI/VDE 2630 Blatt 1.3:2011-12: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren, <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdi-vde-2617-blatt-13-vdi-vde-2630-blatt-1-3/143044428>, accessed 6 October 2024
- [248] DIN 2769:2023-04, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_ - Allgmeintoleranzen_ - Tabellenwerte für geometrische Toleranzen und Toleranzen für Längen- und Winkelgrößenmaße ohne individuelle Toleranzangabe, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3416574>
- [249] A.K. Mishra, A. Kumar, Effect of Process Parameters on Melt Pool Characteristics and Solidification Process During Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, *Lasers Manuf. Mater. Process.* 11 (2024) 260–283. <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00243-4>

- [250] J. Wang, R. Zhu, Y. Liu, L. Zhang, Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single- and multi-track melt pools for process optimization, *Advanced Powder Materials* 2 (2023) 100137. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100137>
- [251] L. Mugwagwa, I. Yadroitsev, S. Matope, Effect of Process Parameters on Residual Stresses, Distortions, and Porosity in Selective Laser Melting of Maraging Steel 300, *Metals* 9 (2019) 1042. <https://doi.org/10.3390/met9101042>
- [252] M. Guo, Y. Ye, X. Jiang, L. Wang, Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of Selective Laser Melted AlSi10Mg, *J. of Materi Eng and Perform* 28 (2019) 6753–6760. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04423-2>
- [253] A. Charles, A. Elkaseer, L. Thijs, V. Hagenmeyer, S. Scholz, Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting, *Applied Sciences* 9 (2019) 1256. <https://doi.org/10.3390/app9061256>
- [254] M.A. Daoud, M. Hayani Mechkouri, Y. Chairri, K.B. Haouari, K. Reklouli, Impact of build location on dimensional accuracy of 316L parts using SLM, *Archives of Materials Science and Engineering* 124 (2024). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4683>
- [255] C.-Y. Lee, C.-Y. Liu, The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication, *Additive Manufacturing* 25 (2019) 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.012>
- [256] S. Ly, A.M. Rubenchik, S.A. Khairallah, G. Guss, M.J. Matthews, Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Scientific reports* 7 (2017) 4085. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04237-z>
- [257] F. Zongo, A. Tahan, A. Aidibe, V. Brailovski, Intra- and Inter-Repeatability of Profile Deviations of an AlSi10Mg Tooling Component Manufactured by Laser Powder Bed Fusion, *JMMP* 2 (2018) 56. <https://doi.org/10.3390/jmmp2030056>
- [258] J. Berez, E. Dushaj, E. Jost, C. Saldaña, K. Fu, Measurement of focal plane error in laser powder bed fusion machines, *Additive Manufacturing Letters* 9 (2024) 100196. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100196>
- [259] P. GAUTAM, J. HAJNYS, J. MESICEK, A. NAG, Q.-P. MA, J. PETRU, EFFECT OF BUILD POSITION ON SURFACE ROUGHNESS OF SLM PRINTED INCONEL 718, *MM SJ* 2024 (2024). https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_10_2024064
- [260] I. Caravella, D. Cortis, L. Di Angelo, D. Orlandi, Experimental Data Collection of Surface Quality Analysis of CuCrZr Specimens Manufactured with SLM Technology: Analysis of the Effects of Process Parameters, *Materials (Basel, Switzerland)* 16 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma16010098>
- [261] R. Douglas, N. Barnard, N. Lavery, J. Sullivan, T. Jones, R. Lancaster, The effect of powder recycling on the mechanical performance of laser powder bed fused stainless steel 316L, *Additive Manufacturing* 88 (2024) 104245. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104245>

- [262] R. Douglas, R. Lancaster, T. Jones, N. Barnard, J. Adams, The Influence of Powder Reuse on the Properties of Laser Powder Bed-Fused Stainless Steel 316L: A Review, *Adv Eng Mater* 24 (2022). <https://doi.org/10.1002/adem.202200596>
- [263] T. Delacroix, F. Lomello, F. Schuster, H. Maskrot, J.-P. Garandet, Influence of powder recycling on 316L stainless steel feedstocks and printed parts in laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing* 50 (2022) 102553. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102553>
- [264] M. Krasniqi, F. Löffler, R. Tutsch, Influence of scanning strategies on dimensional accuracy in laser powder bed fusion, *Measurement: Sensors* (2025) 101840. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2025.101840>
- [265] J. Liu, P. Wen, Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process, *Materials & Design* 215 (2022) 110505. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110505>
- [266] DIN EN ISO/ASTM 52908:2024-03, Additive Fertigung von Metallen_- Eigenschaften von Fertigteilen_- Nachbearbeitung, Inspektion und Prüfung von Bauteilen hergestellt mittels pulverbettbasiertem Schmelzen (ISO/ASTM 52908:2023); Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52908:2023, DIN Media GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/3509214>

Anhang A

Tab. A1: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan mit den drei Bereichen Würfel, Stern und Zentrum

| Nr. | Spurabstand [mm] | Scangeschw. [mm/s] | Laserleistung [W] | Bauorientierung [°] | Beschreibung |
|-----|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
| 1 | 0,1 | 700 | 250 | 0 | "Würfel" vollfaktoriell |
| 2 | 0,18 | 700 | 250 | 0 | |
| 3 | 0,1 | 1300 | 250 | 0 | |
| 4 | 0,18 | 1300 | 250 | 0 | |
| 5 | 0,1 | 700 | 350 | 0 | |
| 6 | 0,18 | 700 | 350 | 0 | |
| 7 | 0,1 | 1300 | 350 | 0 | |
| 8 | 0,18 | 1300 | 350 | 0 | |
| 9 | 0,1 | 700 | 250 | 90 | |
| 10 | 0,18 | 700 | 250 | 90 | |
| 11 | 0,1 | 1300 | 250 | 90 | |
| 12 | 0,18 | 1300 | 250 | 90 | |
| 13 | 0,1 | 700 | 350 | 90 | |
| 14 | 0,18 | 700 | 350 | 90 | |
| 15 | 0,1 | 1300 | 350 | 90 | |
| 16 | 0,18 | 1300 | 350 | 90 | |
| 17 | 0,22 | 1000 | 300 | 45 | "Stern" jeder Faktor einzeln |
| 18 | 0,06 | 1000 | 300 | 45 | |
| 19 | 0,14 | 1600 | 300 | 45 | |
| 20 | 0,14 | 400 | 300 | 45 | |
| 21 | 0,14 | 1000 | 400 | 45 | |
| 22 | 0,14 | 1000 | 200 | 45 | |
| 23 | 0,14 | 1000 | 300 | 135 (45) | |
| 24 | 0,14 | 1000 | 300 | -45 (45) | |
| 25 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | "Zentrum" |
| 26 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | |
| 27 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | |
| 28 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | |

Tab. A2: Ergebnisse der experimentellen Dichtemessungen

| Nr. | Spurabstand [mm] | Scangeschwindigkeit [mm/s] | Laserleistung [W] | Dichte [%] |
|-----|------------------|----------------------------|-------------------|------------|
| 1 | 0,1 | 700 | 250 | 99,26 % |
| 2 | 0,18 | 700 | 250 | 99,63 % |
| 3 | 0,1 | 1300 | 250 | 99,14 % |
| 4 | 0,18 | 1300 | 250 | 95,94 % |
| 5 | 0,1 | 700 | 350 | 99,56 % |
| 6 | 0,18 | 700 | 350 | 99,21 % |
| 7 | 0,1 | 1300 | 350 | 99,78 % |
| 8 | 0,18 | 1300 | 350 | 99,48 % |
| 9 | 0,22 | 1000 | 300 | 98,95 % |
| 10 | 0,06 | 1000 | 300 | 98,07 % |
| 11 | 0,14 | 1600 | 300 | 98,61 % |
| 12 | 0,14 | 400 | 300 | 98,60 % |
| 13 | 0,14 | 1000 | 400 | 99,36 % |
| 14 | 0,14 | 1000 | 200 | 96,55 % |
| 15 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,82 % |
| 16 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,83 % |
| 17 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,86 % |
| 18 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,82 % |
| 19 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,76 % |
| 20 | 0,14 | 1000 | 300 | 99,83 % |

Tab. A3: Ergebnisse der experimentellen Rauheitsmessungen R_a

| Nr. | Spurabstand [mm] | Scangeschwindigkeit [mm/s] | Laserleistung [W] | R_a [μm] | |
|-----|------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------|-----------|
| | | | | parallel | senkrecht |
| 1 | 0,1 | 700 | 250 | 3,0 ± 0,4 | 3,6 ± 0,4 |
| 2 | 0,18 | 700 | 250 | 2,6 ± 0,3 | 3,6 ± 0,4 |
| 3 | 0,1 | 1300 | 250 | 4,0 ± 0,4 | 4,7 ± 0,5 |
| 4 | 0,18 | 1300 | 250 | 4,9 ± 0,5 | 4,8 ± 0,4 |
| 5 | 0,1 | 700 | 350 | 2,3 ± 0,3 | 2,4 ± 0,3 |
| 6 | 0,18 | 700 | 350 | 2,0 ± 0,2 | 2,7 ± 0,3 |
| 7 | 0,1 | 1300 | 350 | 3,5 ± 0,4 | 3,3 ± 0,4 |
| 8 | 0,18 | 1300 | 350 | 2,1 ± 0,2 | 2,7 ± 0,3 |
| 9 | 0,22 | 1000 | 300 | 2,3 ± 0,2 | 3,2 ± 0,3 |
| 10 | 0,06 | 1000 | 300 | 3,1 ± 0,3 | 5,0 ± 0,5 |
| 11 | 0,14 | 1600 | 300 | 3,2 ± 0,3 | 5,0 ± 0,4 |
| 12 | 0,14 | 400 | 300 | 2,7 ± 0,3 | 2,6 ± 0,3 |
| 13 | 0,14 | 1000 | 400 | 3,4 ± 0,3 | 3,2 ± 0,3 |
| 14 | 0,14 | 1000 | 200 | 5,4 ± 0,5 | 8,6 ± 0,9 |
| 15 | 0,14 | 1000 | 300 | 2,2 ± 0,2 | 2,5 ± 0,2 |
| 16 | 0,14 | 1000 | 300 | 3,0 ± 0,3 | 2,4 ± 0,3 |
| 17 | 0,14 | 1000 | 300 | 2,3 ± 0,3 | 2,8 ± 0,3 |
| 18 | 0,14 | 1000 | 300 | 3,2 ± 0,3 | 3,2 ± 0,3 |
| 19 | 0,14 | 1000 | 300 | 2,6 ± 0,3 | 3,8 ± 0,4 |
| 20 | 0,14 | 1000 | 300 | 2,5 ± 0,2 | 3,4 ± 0,3 |

Tab. A4: Ergebnisse der experimentellen Härtemessungen

| Nr. | Spurabstand [mm] | Scangeschwindigkeit [mm/s] | Laserleistung [W] | Härte [HV 1] | |
|-----|---------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|-------|
| | | | | NWB | WB |
| 1 | 0,1 | 700 | 250 | 137,1 | 124,2 |
| 2 | 0,18 | 700 | 250 | 141,6 | 115,2 |
| 3 | 0,1 | 1300 | 250 | 137,5 | 117,4 |
| 4 | 0,18 | 1300 | 250 | 131,3 | 123,2 |
| 5 | 0,1 | 700 | 350 | 129,9 | 89,4 |
| 6 | 0,18 | 700 | 350 | 128,9 | 101,5 |
| 7 | 0,1 | 1300 | 350 | 142,3 | 123,1 |
| 8 | 0,18 | 1300 | 350 | 145,6 | 120,9 |
| 9 | 0,22 | 1000 | 300 | 133,2 | 127,6 |
| 10 | 0,06 | 1000 | 300 | 131,1 | 126,1 |
| 11 | 0,14 | 1600 | 300 | 141,1 | 121,9 |
| 12 | 0,14 | 400 | 300 | 121,2 | 111,6 |
| 13 | 0,14 | 1000 | 400 | 133,6 | 118,6 |
| 14 | 0,14 | 1000 | 200 | 141,8 | 124,5 |
| 15 | 0,14 | 1000 | 300 | 137,0 | 126,2 |
| 16 | 0,14 | 1000 | 300 | 138,3 | 125,5 |
| 17 | 0,14 | 1000 | 300 | 135,2 | 126,1 |
| 18 | 0,14 | 1000 | 300 | 136,2 | 123,6 |
| 19 | 0,14 | 1000 | 300 | 138,0 | 128,1 |
| 20 | 0,14 | 1000 | 300 | 136,5 | 124,2 |

Tab. A5: Ergebnisse der experimentellen Zugversuche

| Nr. | Spur- abstand [mm] | Scan- geschw. [mm/s] | Laser- leistung [W] | Bauorien- tierung [°] | Zugfestigkeit R _m [MPa] | | Bruchdehnung A ₈₀ [%] | |
|-----|--------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------|-------------------------------------|------|
| | | | | | NWB | WB | NWB | WB |
| 1 | 0,1 | 700 | 250 | 0 | 395 | 283 | 2,6 | 5,8 |
| 2 | 0,18 | 700 | 250 | 0 | 459 | 289 | 5,1 | 10,7 |
| 3 | 0,1 | 1300 | 250 | 0 | 427 | 287 | 3,3 | 8,7 |
| 4 | 0,18 | 1300 | 250 | 0 | 333 | 266 | 3,1 | 5,1 |
| 5 | 0,1 | 700 | 350 | 0 | 408 | 302 | 8 | 16 |
| 6 | 0,18 | 700 | 350 | 0 | 418 | 296 | 7,1 | 13,4 |
| 7 | 0,1 | 1300 | 350 | 0 | 453 | 308 | 7,9 | 16,3 |
| 8 | 0,18 | 1300 | 350 | 0 | 462 | 272 | 5 | 11,9 |
| 9 | 0,1 | 700 | 250 | 90 | 421 | 312 | 4,9 | 10,9 |
| 10 | 0,18 | 700 | 250 | 90 | 459 | 296 | 4,2 | 9,4 |
| 11 | 0,1 | 1300 | 250 | 90 | 419 | 291 | 2,6 | 6 |
| 12 | 0,18 | 1300 | 250 | 90 | 231 | 237 | 0,3 | 2,2 |
| 13 | 0,1 | 700 | 350 | 90 | 408 | 302 | 4,8 | 7,9 |
| 14 | 0,18 | 700 | 350 | 90 | 459 | 316 | 7,2 | 13,9 |
| 15 | 0,1 | 1300 | 350 | 90 | 486 | 289 | 5,9 | 9 |
| 16 | 0,18 | 1300 | 350 | 90 | 450 | 294 | 3,6 | 8,3 |
| 17 | 0,22 | 1000 | 300 | 45 | 421 | 282 | 2,8 | 7,8 |
| 18 | 0,06 | 1000 | 300 | 45 | 373 | 303 | 1,7 | 6,1 |
| 19 | 0,14 | 1600 | 300 | 45 | 376 | 267 | 1,4 | 5 |
| 20 | 0,14 | 400 | 300 | 45 | 455 | 319 | 5,6 | 10,5 |
| 21 | 0,14 | 1000 | 400 | 45 | 464 | 318 | 7,1 | 13,8 |
| 22 | 0,14 | 1000 | 200 | 45 | 320 | 295 | 0,7 | 6,9 |
| 23 | 0,14 | 1000 | 300 | 135 (45) | 473 | 307 | 5,5 | 10,8 |
| 24 | 0,14 | 1000 | 300 | -45 (45) | 457 | 306 | 4,8 | 13,5 |
| 25 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | 480 | 305 | 5,3 | 13,3 |
| 26 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | 459 | 306 | 4,9 | 11,3 |
| 27 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | 482 | 296 | 6 | 12,9 |
| 28 | 0,14 | 1000 | 300 | 45 | 484 | 321 | 5,7 | 15,8 |
| | | | | Ø | 425,8 | 295,2 | 4,5 | 10,1 |

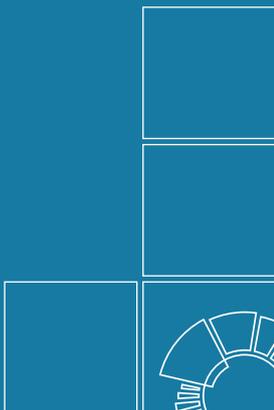
Tab. A6: Mit verschiedenen Maschinen und Prozessparametern ermittelte Materialeigenschaften für AISi10Mg

| Verwendete Maschine | Optimierte / gewählte Parameter | | | | Strahl-durch-messer d _r (mm) | Wärme-behand-lungsmethode [° C/ h] | Dichte (%) | Härte (HV) | Zugfes-tigkeit (MPa) | Bruchdeh-nung (%) | Ref. |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---|------------------------------------|------------|------------|----------------------|-------------------|--------------|
| | PL (W) | v _s (mm/s) | h _s (mm) | d _s (mm) | | | | | | | |
| DMG Laser-tec 30 2nd Gen. | 350 | 1200 | 0,14 | 0,04 | 0,08 | As-built (RT) | 99,94 | 138 | 476 | 7,6 | Diese Arbeit |
| | | | | | | 200 + 300/2h | | 125,8 | 307 | 16,6 | |
| Concept Laser M1 ** | 200 | 1400 | 0,105 | 0,05 | 0,15 | RT | 99,4 | | | | [100] |
| Concept Laser M1 | 200 | 1400 | 0,105 | 0,05 | 0,15 | RT | 98,5 | 127 | 391 | 5,55 | [18] |
| Concept Laser M1 | 200 | 1400 | 0,105 | 0,05 | 0,15 | RT | 99 | | | | [82] |
| | | | | | | | 98,9 | | | | |
| | | | | | | | 99,4 | | | | |
| Concept Laser M2 | 400 | 1600 | 0,2 | 0,02 | 0,06 | RT | | 145 | | | [98] |
| Concept Laser M2 | 175 | 1025 | 0,1 | 0,03 | 0,06 | RT | | | 400 | 1,5 | [227] |
| Concept Laser M2 ** | 175 | 1025 | 0,15 | 0,05 | 0,06 | | 99,71 | | | | [38] |
| EOS M270 | 195 | 800 | 0,17 | 0,03 | 0,1 | | 99,3 | 108 | 330 | 6,2 | [37] |
| EOS M280 ** | 330 | 1200 | 0,15 | 0,03 | 0,1 | 165 | 99,63 | | 335 | 6,2 | [78] |
| EOS M280 ** | 370 | 1300 | 0,06-0,1 | 0,03 | 0,1 | RT | 99,9 | | | | Diss. Walzl |
| EOS M280 | 300 | 1200 | 0,14 | 0,03 | 0,1 | RT | | | 445 | 8,68 | [60] |
| EOS M280 | 400 | 1000 | 0,2 | 0,03 | 0,1 | RT | | | 410 | 6 | [59] |
| EOS M280 | 380 | | 0,1 | 0,03 | 0,1 | RT | | 132 | 476 | 5,5 | [66] |
| | | | | | | 200/2h | | 88 | 290 | 14,2 | |
| EOS M280 | 275 | 1000 | 0,08 | 0,03 | 0,1 | 80 | | | 382 | 4 | [99] |
| EOS M280 | 370 | 1300 | 0,19 | 0,03 | 0,1 | as-built/30 | ca. 97,5 | 105 | 421,67 | 5,176 | [228] |
| EOS M290 | 370 | 2000 | 0,09 | 0,06 | 0,1 | 200 | | | 298,02 | 8,4 | [63] |
| | | | | | | 200 + 250/2h | | | ca. 170 | ca. 17 | |
| EOS M290 ** | 340 | 1538 | 0,19 | | 0,1 | | | 126 | | | [68] |
| EOS M290 | 370 | 1300 | 0,19 | 0,03 | 0,1 | RT | | 130 | | | [69] |
| EOS M290 ** | | | | | 0,1 | 200 | up to 99 | 105 | | | [109] |
| EOS M290 | 370 | 1300 | 0,13 | 0,03 | 0,1 | 300/2h | | | 302 | 19 | [62] |
| EOS M290 | 300 | 1000 | 0,13 | 0,04 | 0,1 | RT | | 137 | 463 | 7,6 | [57] |
| | | | | | | 285/2h | | 89 | 249 | 21,3 | |
| EOS M290 | 340 | 1300 | 0,2 | 0,03 | 0,1 | RT | | | 471 | 6 | [53] |
| | | | | | | 160 | | | 386 | 8,6 | |
| Renishaw AM250 | 200 | 570 | 0,13 | 0,025 | 0,08 | RT | | 125 | 333 | 1,4 | [229] |
| Renishaw AM400 | 200 | | 0,08 | 0,025 | 0,08 | RT | 97 | 117,7 | | | [132] |
| SLM 125 HL | 350 | 1650 | 0,13 | 0,03 | 0,08 | 150 | 99,1 | 149 | 412 | 6,34 | [231] |
| SLM 125 HL ** | 250 | 1600 | 0,13 | 0,03 | 0,07 | 100 | 99,1 | | | | [52] |

Tab. A6 fortgesetzt

| Verwendete Maschine | Optimierte / gewählte Parameter | | | | Strahl-durchmesser d_f (mm) | Wärme-behand-lungsme-thode [$^{\circ}$ C/ h] | Dichte (%) | Härte (HV) | Zugfes-tigkeit (MPa) | Bruchdeh-nung (%) | Ref. |
|----------------------------|---------------------------------|--------------|--------|------------|-------------------------------|---|------------|------------|----------------------|-------------------|-------|
| | P_L (W) | v_s (mm/s) | h (mm) | d_s (mm) | | | | | | | |
| SLM 280 HL ** | 320 | 600 | 0,08 | | 0,08 | RT | | | | | [142] |
| SLM 280 HL | 350 | 1150 | 0,1 | 0,05 | 0,08 | 200 | | | 395 | 8,4 | [56] |
| | | | | | | 200 + 300/2h | | | 260 | 15 | |
| EOS M290 | 370 | 1250 | 0,17 | 0,03 | 0,1 | 50 | | | 460 | 3,4 | [56] |
| | | | | | | 50 + 300/2h | | | 270 | 7,1 | |
| SLM 500 HL | 350 | 1150 | 0,17 | 0,05 | 0,08 | 150 | ca. 99 | ca. 13 | 393 | 2,5 | [42] |
| SLM 500 HL | 350 | 1500 | 0,17 | 0,05 | 0,08 | RT | | ca. 125 | 415 | 7,2 | [67] |
| Trumpf Trumaform LF 250 ** | | | | | 0,2 | 30/200/300 | > 99,5 | 145 | 350 | 7 | [117] |
| Trumpf TruPrint 3000 | 420 | 1300 | 0,21 | 0,06 | 0,1 | 200 | 99,2 | 115 | 347 | 4,5 | [58] |
| | | | | | | 200 + 300/2h | | ca. 82 | 305 | 6 | |
| DiMetal-100 | 220 | 1100 | 0,08 | 0,03 | 0,07 | RT | 98,59 | 119,1 | 444,85 | 2,55 | [230] |
| EP-M250 (Eplus 3D) ** | 370 | 1454 | 0,16 | 0,03 | 0,07 | RT | 99,92 | | 496 | 6,3 | [137] |
| | | | | | | 275/2h | | | 310,8 | 13,7 | |
| SPI+ SCAN-LAB L-PBF | 215 | 500 | | 0,025 | 0,07 | 120 | > 97 | | 396 | 7,7 | [79] |
| IPG prototye ** | | | | | 0,1 | RT | 99,8 | 145 | 420 | 4,3 | [89] |
| IPG prototye | 240 | 500 | | 0,05 | 0,1 | | | | ca. 420 | ca. 5,95 | [86] |
| Space M200 System | 400 | 500 | 0,15 | 0,03 | | 160 | 97 | | 303,1 | 4,2 | [80] |
| Custom-made (LSNF-2) | 490 | 2000 | 0,1 | 0,04 | 0,1 | RT | | 132 | 475 | 3,9 | [95] |
| | | | | | | 300/2h | | 100 | 248 | 14,5 | |

** Durchführung einer parametrischen Studie in dieser Arbeit



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de