
MASTERARBEIT

Frau B.Sc.
Laura Römer

**Prozessvergleich zur Nutzung
von kurz gepulster und konti-
nuierlicher Bestrahlung im
Mikro-SLM**

Mittweida, 2022

Fakultät Ingenieurwissenschaften

MASTERARBEIT

Prozessvergleich zur Nutzung von kurz gepulster und konti- nuierlicher Bestrahlung im Mikro-SLM

Autor:
Frau B.Sc.

Laura Römer

Studiengang:
Lasertechnik

Seminargruppe:
LT20w1-M

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. André Streek

Zweitprüfer:
Martin Eler, M.Sc.

Einreichung:
Mittweida, 09.12.2022

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2022

MASTER THESIS

**Process comparison between
the application of short pul-
sed and continuous wave la-
ser emission in micro-SLM**

author:

Ms. B.Sc.

Laura Römer

course of studies:

Laser Technology

seminar group:

LT20w1-M

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. André Streek

second examiner:

Martin Erlen, M.Sc.

submission:

Mittweida, 09.12.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Römer, Laura:

Prozessvergleich zur Nutzung von kurz gepulster und kontinuierlicher Bestrahlung im Mikro-SLM - 2022 - 12, 91, 3 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2022

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem umfassenden Vergleich der Verwendung von kurz gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung im Mikro-SLM. Nach Charakterisierung der genutzten Bestrahlungsregime werden in Einzelspuruntersuchungen Unterschiede und deren Ursachen hinsichtlich der Schmelzspurbildung zwischen gepulster und kontinuierlicher Bestrahlung betrachtet und diskutiert. Der Bereich geeigneter Prozessparameter wird in Mehrspuruntersuchungen ergänzt. Des Weiteren wird der Einfluss verschiedener Bestrahlungsregime auf die Bauteileigenschaften von Volumenkörpern untersucht.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Formelverzeichnis.....	XI
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Verfahrensgrundlagen	3
2.1 <i>Selektives Laserstrahlschmelzen</i>	3
2.2 <i>Mikro-Verfahren.....</i>	3
3 Theoretische Grundlagen	7
3.1 <i>Prozessparameter und zusammengesetzte Größen.....</i>	7
3.2 <i>Einflüsse auf die Ausbildung von Schmelzspuren: wirkende Mechanismen und auftretende Effekte</i>	11
3.2.1 <i>Schmelzbadcharakteristiken.....</i>	11
3.2.2 <i>Balling-Effekt und Plateau-Rayleigh-Instabilität</i>	12
3.2.3 <i>Marangoni-Konvektion.....</i>	13
3.2.4 <i>Pulveraufschub</i>	14
3.3 <i>Bauteileigenschaften: Dichte, Rauheit, Eigenspannungen.....</i>	15
4 Stand der Technik	19
5 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen.....	25
6 Anlagentechnik und Pulvermaterial.....	27
7 Analysemethoden	35
8 Einzelspuruntersuchungen	37
8.1 <i>Versuchsdurchführung</i>	37
8.2 <i>Ergebnisse und Diskussion</i>	39

8.2.1	Einfluss verringerter Pulspausen als Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung bei variierender Streckenenergie.....	39
8.2.2	Einfluss von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Bestrahlungsregimen	48
9	Mehrspuruntersuchungen.....	57
9.1	<i>Versuchsdurchführung.....</i>	<i>57</i>
9.2	<i>Ergebnisse und Diskussion.....</i>	<i>58</i>
10	Aufbau von Volumenkörpern	65
10.1	<i>Dichte</i>	<i>65</i>
10.1.1	Versuchsdurchführung.....	65
10.1.2	Ergebnisse und Diskussion.....	67
10.1.2.1	Einfluss von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch.....	67
10.1.2.2	Archimedische Dichtemessung	70
10.1.2.3	Einfluss der Schichtdicke	75
10.2	<i>Deckflächenrauheit</i>	<i>78</i>
10.2.1	Versuchsdurchführung.....	78
10.2.2	Ergebnisse und Diskussion.....	79
10.3	<i>Eigenspannungen.....</i>	<i>82</i>
10.3.1	Versuchsdurchführung.....	82
10.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	83
11	Strukturauflösung.....	85
11.1	<i>Versuchsdurchführung.....</i>	<i>85</i>
11.2	<i>Ergebnisse und Diskussion.....</i>	<i>86</i>
12	Zusammenfassung und Ausblick.....	89
12.1	<i>Zusammenfassung</i>	<i>89</i>
12.2	<i>Ausblick</i>	<i>91</i>
Literatur		93
Anlagen		99
Anlagen, A.1 Hatchuntersuchungen.....		A-I
Anlagen, A.2 Dichteuntersuchungen.....		A-II
Selbstständigkeitserklärung		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des LMS-Prozess.	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bestrahlung einer Pulverschicht mit den Prozessparametern Schichtdicke (l_z) und Hatch (h_s).	7
Abbildung 3: Schematische Darstellung der zeitlichen Kenngrößen τ_H , t_{off} , f_P für die gepulste Bestrahlung und räumlicher Pulsabstand, sowie Fokusdurchmesser.	9
Abbildung 4: Einfluss des räumlichen Pulsabstandes auf die Anzahl der Pulse, welche einen Punkt im Pulverbett treffen..	10
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Relevanz der Kontaktfläche zwischen Schmelzbad und Substrat für den Balling-Effekt.....	13
Abbildung 6: Einflussgrößen auf die Form des Schmelzbades.....	13
Abbildung 7: Starker Pulveraufschub bei gepulster Bestrahlung mit hohen Intensitäten..	14
Abbildung 8: Bestrahlungsstrategie zur Verringerung der Oberflächenrauheit.....	16
Abbildung 9: REM-Aufnahmen von Schmelzspuren hergestellt mit unterschiedlichen Bestrahlungsregimen	21
Abbildung 10: Bestrahlte Wolfram-Pulveroberflächen, erzeugt mit ähnlichen Prozessparametern.....	22
Abbildung 11: Räumliche Intensitätsverteilung des Laserstrahls im Fokus	28
Abbildung 12: Mittlere Laserleistung am Bearbeitungsort in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung.....	28
Abbildung 13: Bauraum der Forschungsanlage.....	29
Abbildung 14: Abhängigkeit der Pulsenergie von der Pulswiederholfrequenz.....	30
Abbildung 15: Zeitlicher Pulsverlauf für ausgewählte Pulsformen und Pulswiederholfrequenzen mit sinkender t_{off}	31

Abbildung 16: Pulvermaterial	33
Abbildung 17: Korngrößenverteilung für unbenutztes und 2-fach gesiebttes Pulver im Vergleich.....	33
Abbildung 18: Einteilung der Einzelspuren in vier Kategorien für die Bestrahlung einer einzelnen Pulverschicht.	39
Abbildung 19: Charakterisierung der erzeugten Einzelspuren mit Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung durch verringerte Pulspausen in Abhängigkeit der Streckenenergie.....	40
Abbildung 20: Vergleich von Schmelzspuren erzeugt mit gepulsten Bestrahlungsregimen mit unterschiedlichen Pulspausen bei variierender Streckenenergie	42
Abbildung 21: Schmelzspuren erzeugt mit kontinuierlicher Bestrahlung bei variierender Streckenenergie ($v_s = 2,8$ m/s).....	43
Abbildung 22: REM-Aufnahmen von Einzelspuren bei variierender Streckenenergie.....	44
Abbildung 23: Charakterisierung der Schmelzspuren in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit für drei verschiedene Bestrahlungsregime	48
Abbildung 24: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Schmelzspuren bei annähernd gleicher Streckenenergie.....	50
Abbildung 25: Ausbildung der Schmelzspuren in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanter mittlerer Laserleistung	51
Abbildung 26: Vergleich der Schmelzspurausbildung für gepulste und kontinuierliche Bestrahlung bei Scangeschwindigkeiten von 1 m/s und 4 m/s bei geringer mittlerer Leistung.	53
Abbildung 27: Ausbildung der Schmelzspuren in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit für die kontinuierliche Bestrahlung bei konstanter mittlerer Laserleistung.....	54
Abbildung 28: Charakterisierung der Strukturen in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit für drei verschiedene Bestrahlungsregime	55
Abbildung 29: Strukturen nach Bestrahlung von 10 Schichten unter Verwendung verschiedener Scangeschwindigkeiten	56

Abbildung 30: Einfluss von mittlerer Laserleistung (oben) und Scangeschwindigkeit (unten) auf die Wahl des Hatches.....	58
Abbildung 31: Querschliffaufnahmen zur Hatchuntersuchung für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanten Prozessparametern.....	60
Abbildung 32: REM-Aufnahmen der mit variierendem Hatch erzeugten Strukturen für verschiedene Bestrahlungsregime	61
Abbildung 33: Einfluss der mittleren Laserleistung auf die Anhaftung von Pulverpartikeln an Seitenwänden für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung	62
Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Generierung von Volumenkörpern für die bildanalytische Dichtemessung.	66
Abbildung 35: Abhängigkeit der relativen Dichte von mittlerer Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung	67
Abbildung 36: Vergleich von Querschliffaufnahmen mit unterschiedlicher Vergrößerung für einen mit kontinuierlicher Bestrahlung erzeugten Volumenkörper.	70
Abbildung 37: Mangelhafter Pulveraufzug bei kontinuierlicher Bestrahlung mit geringem Hatch aufgrund glatter Oberflächen.....	71
Abbildung 38: Ergebnisse der archimedischen Dichtemessung für die fünf verschiedenen Bestrahlungsregime	72
Abbildung 39: Vergleich der Schmelzspuren für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung für zwei Parametersätze, welche im Rahmen der archimedischen Dichtemessung betrachtet wurden.	73
Abbildung 40: Prozessbilder zum Vergleich des auftretenden Pulveraufschubs bei verschiedenen Bestrahlungsregimen und Prozessparametern.....	75
Abbildung 41: Relative Bauteildichte in Abhängigkeit der VED und Schichtdicke für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung.	76
Abbildung 42: Ergebnisse der Rauheitsmessung (Deckflächenrauheit).....	79
Abbildung 43: Deckflächen bei Bestrahlung einer Schicht für verschiedene Bestrahlungsregime und Prozessparameter.....	80

Abbildung 44: Einfluss von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit auf die Deckflächenrauheit.	81
Abbildung 45: Einfluss der Schichtdicke auf die Deckflächenrauheit (cw)	81
Abbildung 46: Einfluss der Schichtdicke auf die Deckflächenrauheit (gepulst)	81
Abbildung 47: Maße der Probenkörper für den Cantilever-Test zur Untersuchung der Eigenspannungen.....	82
Abbildung 48: Probenkörper für den Cantilever-Test nach Trennen der Stützstrukturen vom Substrat.	83
Abbildung 49: Anordnung der Cantilever-Proben auf dem Substrat	83
Abbildung 50: Ergebnisse des Cantilever-Tests. Auslenkung der Probenkörper an verschiedenen Messpunkten. Messung mittels Lasertriangulation.	84
Abbildung 51: REM-Aufnahmen von Einzelwänden. Einfluss der mittleren Laserleistung auf die Strukturbreite.....	86
Abbildung 52: REM-Aufnahmen von Einzelwänden. Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Strukturbreite.....	87
Abbildung 53: Vergleich der Wandstärken für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanten Prozessparametern	88
Abbildung 54: Querschliffaufnahmen entsprechend Tabelle 15 bei gleichen Prozessparametern.....	A-III

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich erreichter Dichten, Auflösungen und Rauheiten für verschiedene Verfahren und Bestrahlungsregime. Angaben aus der Literatur.	23
Tabelle 2: In vorangegangenen Untersuchungen erreichte maximale Dichten in Abhängigkeit von Pulsdauer und Frequenz	26
Tabelle 3: Herstellerangaben der wichtigsten Kennwerte des verwendeten Faserlasers.	27
Tabelle 4: Vergleich realer und theoretischer Pulsspitzenleistungen und -intensitäten für die untersuchten Pulsformen mit sinkender Pulspause	32
Tabelle 5: Konstante und variierte Prozessparameter für die Einzelspuruntersuchungen zur Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung.....	38
Tabelle 6: Konstante und variierte Prozessparameter für die Einzelspuruntersuchungen zum Einfluss von mittlerer Laserleistung P_{av} und Scangeschwindigkeit v_s	38
Tabelle 7: Vergleich der Bestrahlungsdauer eines Punktes im Pulverbett für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanter Scangeschwindigkeit	52
Tabelle 8: Genutzte Parameter für die Untersuchungen zum Einfluss vom Hatch bei verschiedenen mittleren Leistungen und Scangeschwindigkeiten.	57
Tabelle 9: Zur Generierung dichter Bauteile geeigneter Hatch für verschiedene Scangeschwindigkeiten bei einer mittleren Laserleistung von 40 W.	59
Tabelle 10: Berechnung der zur Bestrahlung einer definierten Fläche (5x5 mm) benötigten Zeit in Abhängigkeit des Hatches und der Scangeschwindigkeit.	63
Tabelle 11: Verwendete Prozessparameter für den Aufbau von Volumenkörpern für die bildanalytische Dichtemessung.	65
Tabelle 12: Parameter für die Erzeugung von Volumenkörpern für die archimedische Dichtemessung.	66

Tabelle 13: Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Schichtdicke auf die Bauteildichte.	67
Tabelle 14: Maximale relative Dichten der bildanalytischen Dichtemessung für die verschiedenen Bestrahlungsregime.	69
Tabelle 15: Vergleich der gemessenen Dichten für zwei Bestrahlungsregime bei gleichen Prozessparametern.....	73
Tabelle 16: Erste Rauheitsuntersuchung - verwendete Prozessparameter und Bestrahlungsregime.	78
Tabelle 17: Zweite Rauheitsuntersuchung - verwendete Prozessparameter. Zusätzlich zur vorangegangenen Untersuchung wurde die Schichtdicke betrachtet.	78
Tabelle 18: Prozessparameter für den Aufbau der Probenkörper für den Cantilever-Test zur Untersuchung der Eigenspannungen.	82
Tabelle 19: Prozessparameter für den Aufbau von Einzelwänden zur Untersuchung des Einflusses von mittlere Laserleistung und Scangeschwindigkeit auf die Strukturbreite....	85
Tabelle 20: Prozessparameter für den Aufbau von Einzelwänden zur Untersuchung der Auflösung für verschiedene Bestrahlungsregime.	86
Tabelle 21: Vollständige Ergebnisse der Hatchuntersuchungen.....	A-I
Tabelle 22: Ergebnisse der bildanalytischen Dichtemessung (Treppenstufen-Proben). .	A-II

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
SLM	Selektives Laserstrahlschmelzen (<i>“Selective Laser Melting”</i>)
LMS	Lasermikrosintern
μ SLM	Selektives Lasermikroschmelzen (Mikro-SLM)
cw	kontinuierliche Strahlung (<i>“continuous wave”</i>)
VED	Volumenenergiedichte
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (<i>“Energy Dispersive X-ray Spectroscopy”</i>)
REM	Rasterelektronenmikroskop
PRF ₀	Pulswiederholffrequenz mit maximaler Pulsenergie
WEZ	Wärmeeinflusszone

Formelverzeichnis

Formelzeichen	SI-Einheit	Beschreibung
P_{av}	W	mittlere Laserleistung
v_s	m/s	Scangeschwindigkeit
E_s	J/m	Streckenenergie
h_s	m	Hatch / Linienabstand
l_z	m	Schichtdicke
E_V	J/m ³	Volumenenergiedichte
V_{th}	m ³ /s	Theoretische Aufbaurrate
t_v	s	Verweildauer
w_0	m	Fokusradius
τ_H	s	Pulsdauer
f_p	Hz	Pulswiederholfrequenz
t_{off}	s	Pulspause
δ	-	Arbeitszyklus („ <i>duty cycle</i> “)
d_p	m	Räumlicher Pulsabstand
O_p	-	Pulsüberlapp
Q_p	J	Pulsenergie
τ_{solid}	s	Erstarrungszeit
a	m	Radius
α	m ² /s	Thermischer Diffusionskoeffizient

T_0	K	Ausgangstemperatur
T_f	K	Liquidustemperatur
T_t	K	Substrattemperatur
γ	kg/s ²	Oberflächenspannung
M^2	-	Beugungsmaßzahl
P_{max}	W	Pulsspitzenleistung
I_0	W/m ²	Pulsspitzenintensität
δ_{th}	m	Thermische Diffusionslänge
κ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
Sa	m	Rauheit (mittlere arithmetische Höhe)

1 Einleitung und Motivation

Die additive Fertigung, auch als 3D-Druck bekannt, hat zur Herstellung komplexer dreidimensionaler Bauteile in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, welche die Verarbeitung zahlreicher Materialien, von Polymeren, Keramiken, Metallen, Legierungen, Verbundwerkstoffen bis hin zu Biomaterialien, ermöglichen. Insbesondere bei der Herstellung metallischer Bauteile kommen Laser als Energiequelle zum Einsatz.

Zu den am schnellsten wachsenden Technologien zählen hierbei die Pulverbett-Verfahren, wie das selektive Laserstrahlschmelzen (SLM). Gegenwärtig sind mehr als 60 Anbieter für SLM-Anlagen am Markt [1]. Mit zunehmender Beliebtheit der additiven Fertigung in der Industrie steigen jedoch auch die Anforderungen an die Bauteileigenschaften. Um den Anwendungsbereich der gefertigten Bauteile zu vergrößern, ist eine stetige Weiterentwicklung der Verfahren notwendig.

Mit dem Bestreben die laserbasierte additive Fertigung auch im Mikro-Maßstab umsetzen zu können, wurden Verfahren wie das Lasermikrosintern (LMS) und das Mikro-SLM (μ SLM) entwickelt. Diese ermöglichen die Herstellung von Bauteilen mit sehr hohen Auflösungen und Oberflächenqualitäten.

Als Strahlquelle kommen vorwiegend kontinuierliche Laser zum Einsatz. Aber auch kurz gepulste Laser mit Pulsdauern im Bereich einiger 100 ns werden aufgrund ihrer Möglichkeit zur Erzeugung hoher Intensitäten bei moderaten mittleren Laserleistungen verwendet. Durch die zahlreichen Parameter, mit welchen ein Laserpuls charakterisiert wird, bieten sich im Vergleich zur kontinuierlichen Strahlung mehr Optionen, den Energieeintrag im Prozess zu beeinflussen. Vergleichende Untersuchungen zu beiden Bestrahlungsregimen und deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften fanden bisher vorwiegend für die Makro-Verfahren statt. Im Bereich der Mikro-Additiven Fertigung gibt es bisher nur vereinzelte Publikationen zu diesem Thema. Da eine Übertragbarkeit der Kenntnisse aus dem Makro- in den Mikro-Bereich durch veränderte Prozessbedingungen nicht gewährleistet werden kann, sind individuelle Untersuchungen zur Nutzung von gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung im Mikro-Additiven erforderlich.

In dieser Arbeit soll die Wirkung von gepulster und kontinuierlicher Bestrahlung auf die Bauteileigenschaften im Mikro-SLM betrachtet werden. Hierfür wurde ein Vergleich verschiedener gepulster Bestrahlungsregime mit Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung durch Verringerung der Pulspause durchgeführt. Die Wirkung der verschiedenen Bestrahlungsregime bei variierenden Prozessparametern wurde zunächst in Einzelspuruntersuchungen betrachtet. Nach Ermittlung geeigneter Prozessparameter erfolgte die Untersuchung generierbarer Bauteileigenschaften, wie Bauteildichte und Strukturauflösung. Auftretende

Problematiken, wie Prozessfehler aufgrund sehr geringer Deckflächenrauheiten oder Pulveraufschub, wurden näher betrachtet. In zusätzlichen Versuchen wurden im Bauteil entstehende Eigenspannungen bei Verwendung verschiedener Bestrahlungsregime untersucht.

2 Verfahrensgrundlagen

2.1 Selektives Laserstrahlschmelzen

Laserbasierte additive Fertigungsverfahren werden bereits seit 1990 zur Herstellung dreidimensionaler Bauteile eingesetzt [2]. Sie ermöglichen die Herstellung von komplexen Bauteilen, welche mit konventionellen Methoden, wie Gießen oder Fräsen, nicht generierbar sind. Die mechanischen Eigenschaften sind dabei vergleichbar mit denen konventionell hergestellter Bauteile. Durch die hohe Gestaltungsfreiheit finden laserbasierte additive Fertigungsverfahren zahlreiche Anwendungen, beispielsweise im Prototypenbau, in der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik.

Ein häufig genutztes und bereits umfassend untersuchtes Verfahren stellt das selektive Laserstrahlschmelzen dar. Hierbei handelt es sich um ein pulverbettbasiertes Verfahren, bei dem ein schichtweiser Aufbau eines Bauteils, vorwiegend aus Metallpulver, erfolgt. Der grundlegende Prozessablauf kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. Aufbringen einer Pulverschicht auf eine Bauplattform
2. Selektives Bestrahlen und Aufschmelzen des Pulvermaterials durch einen Laserstrahl
3. Absenken der Bauplattform
4. Erneuter Schichtauftrag und Wiederholung der Prozessschritte bis zum Vollenden des Bauteils

Die Bestrahlung des Pulvermaterials erfolgt im SLM vorwiegend mit kontinuierlicher (cw) Laserstrahlung. Üblicherweise werden Korngrößen im Bereich von 20 - 50 μm und Schichtdicken von 20 - 100 μm verwendet. Um eine Oxidation des erhitzten Pulvermaterials zu vermeiden, findet der Prozess unter Schutzgasatmosphäre statt. Durch stetige Weiterentwicklung des Verfahrens ist neben der Verarbeitung einer Vielzahl metallischer Werkstoffe auch die Verarbeitung von Keramiken und Verbundwerkstoffen möglich. Die erzielten Bauteildichten reichen dabei bis 99,9 % bei Mittenrauwerten $R_a < 20 \mu\text{m}$ [3].

2.2 Mikro-Verfahren

Mit dem Bestreben höhere Auflösungen zu erzielen und laserbasierte additive Fertigungsverfahren auch im Mikro-Maßstab anwenden zu können wurden neue Verfahren, wie das Lasermikrosintern und das Mikro-SLM entwickelt. In Abgrenzung zu den Makro-Verfahren zeichnen sich diese durch Nutzung von Fokusdurchmessern $< 40 \mu\text{m}$, Pulverkorngrößen $< 10 \mu\text{m}$ und Pulverschichtdicken $< 10 \mu\text{m}$ aus [4].

Das Lasermikrosintern wurde im Jahr 2003 von Mitarbeitern des Laserinstitut Mittelsachsen e.V. entwickelt [5]. Neben der Verwendung von feinkörnigem Pulvermaterial, zeichnet sich das Verfahren durch Nutzung gepulster Laser mit üblichen Pulsdauern im Bereich von 200 ns aus. Der Aufbau der Bauteile erfolgt wie im SLM schichtweise.

Der grundlegende Verfahrensablauf ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

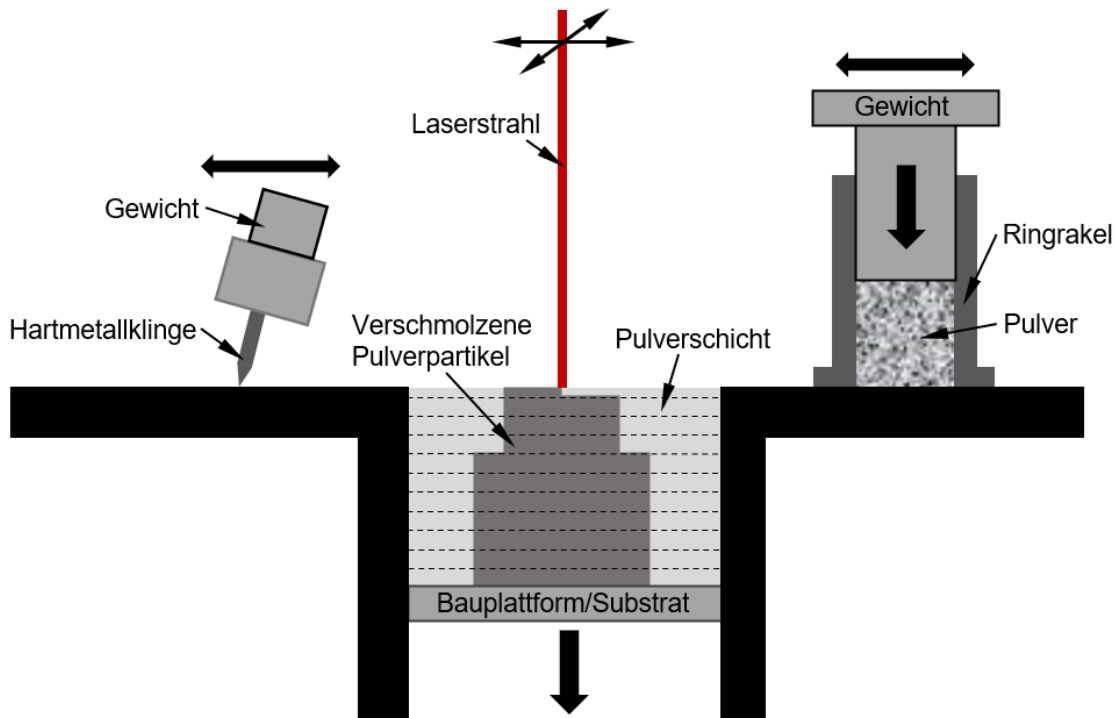


Abbildung 1: Schematische Darstellung des LMS-Prozess.

Eine Rakel trägt eine Schicht Pulvermaterial auf das angeraute Substrat auf. Um eine homogene Pulverschicht zu erzeugen, wird das aufgebrachte Pulver anschließend nochmals mit einer Hartmetallklinge abgezogen. Anschließend erfolgt die Bestrahlung des Pulvers mit dem Laserstrahl. Hierbei wird durch Aufschmelzen und rasches Abkühlen eine stoffschlüssige Verbindung erzeugt. Die Bauplattform wird darauf um einen definierten Betrag, entsprechend der gewünschten Schichtdicke, abgesenkt und der Pulveraufzug wird wiederholt.

Der Prozess kann dabei sowohl unter Schutzgas- als auch unter Normalatmosphäre stattfinden. Während der Bestrahlung des Pulvermaterials mit dem Laserstrahl wird das aufgeschmolzene Material durch entstehendes Plasma und Dampf von der Umgebungsluft abgeschirmt. Man spricht von einem Reaktions-Schildeffekt [6]. Die Abschirmung verhindert eine Oxidation der Schmelze und ermöglicht somit die Bearbeitung unter Normalatmosphäre. Untersuchungen zeigten jedoch bessere Bearbeitungsergebnisse bei der Verwendung eines inerten Schutzgases. Die Mittenrauwerte R_a konnten beispielsweise im Vergleich zur Bearbeitung unter Normalatmosphäre von 8,5 - 10 μm auf 5,5 - 8,5 μm verringert werden [7].

Das Verfahren des μ SLM entwickelte sich durch Anpassung von Prozessparametern aus dem Makro-SLM. Der grundlegende Prozessablauf ist identisch zu dem des LMS (siehe Abbildung 1) Der wesentliche Unterschied besteht in der Verwendung kontinuierlicher Laserstrahlung.

Bei beiden Verfahren, sowohl beim LMS als auch beim μ SLM, stellt die Verwendung des feinkörnigen Pulvermaterials mit Korngrößen kleiner $10\ \mu\text{m}$ eine besondere Herausforderung dar. Im Gegensatz zu dem im SLM verwendeten grobkörnigeren Pulver, neigen die feineren Pulver zur Agglomeration und besitzen eine geringe Fließfähigkeit. Grund hierfür ist das große Verhältnis von Oberfläche zum Volumen der kleinen Partikel und die daraus resultierende hohe Oberflächenenergie [8]. Ein homogener Pulveraufzug wird damit erschwert. Es ist notwendig, das Pulver für den Prozess zu verdichten, wofür verschiedene Praktiken angewandt werden. Eine Möglichkeit stellt die Nutzung zusätzlicher Gewichte auf dem Pulverreservoir (Vgl. Abbildung 1) dar.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Prozessparameter und zusammengesetzte Größen

Um qualitativ hochwertige Bauteile mit definierten Dichten, Rauheiten und Abmessungen zu erzeugen, ist es erforderlich, den Einfluss der Prozessparameter möglichst genau zu kennen. Den größten Einfluss besitzen, nach Di et al., Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke, Hatch, Fokusbereich, Scanstrategie, Materialeigenschaften und Prozessatmosphäre (Sauerstoffgehalt) [9].

Grundlage für den Aufbau von Volumenkörpern stellen einzelne Schmelzspuren dar. Für die Ausbildung einzelner Schmelzspuren sind vor allem die mittlere Laserleistung P_{av} und die Scangeschwindigkeit v_s relevant. Beide Parameter können zur Streckenenergie E_s zusammengefasst werden.

$$E_s = \frac{P_{av}}{v_s} \quad (3.1)$$

Um eine gleichmäßige, dichte Schicht im späteren Bauteil zu erzeugen, werden mehrere Einzelspuren mit einem definierten Abstand zueinander (Hatch h_s) bestrahlt. Hierbei ist der Linienüberlapp zwischen benachbarten Scanlinien von Relevanz. Die Wahl des geeigneten Hatches ist entscheidend für die Generierung dichter Bauteile. Ein zu großer Hatch bewirkt durch geringen Linienüberlapp das Entstehen von Rinnen zwischen den Schmelzspuren. An diesen Stellen können im späteren Bauteil Poren zurückbleiben. Abbildung 2 stellt den Bestrahlungsprozess schematisch dar.

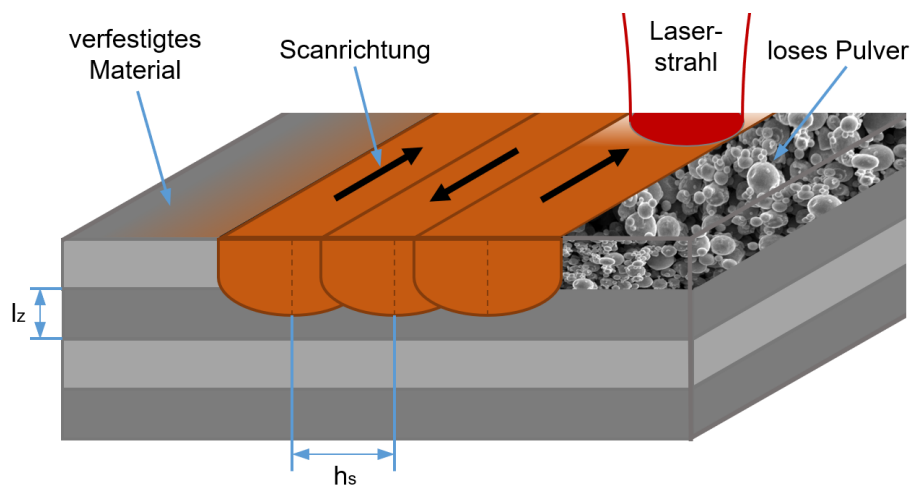


Abbildung 2: Schematische Darstellung der bidirektionalen Bestrahlung einer Pulverschicht mit den Prozessparametern Schichtdicke (l_z) und Hatch (h_s).

Der Aufbau eines Volumenkörpers erfolgt schließlich aus einer Vielzahl an Schichten mit der Schichtdicke l_z . Hierfür ist eine gute Anbindung der neuen Schicht zur unterliegenden Schicht essenziell. Erfolgt die Anbindung nur mangelhaft, so kommt es zur Bildung von Poren bis hin zur Delamination.

Als Vergleichsgröße kommt beim Aufbau von Volumenkörpern häufig die Volumenenergie-dichte (VED) zum Einsatz.

$$E_V = \frac{P_{av}}{v_s \cdot h_s \cdot l_z} \quad (3.2)$$

Verschiedene Scanstrategien besitzen ebenfalls einen Einfluss auf die finale Bauteilqualität. Durch Drehung der Scanlinien um einen definierten Winkel nach jeder Schicht, können Unebenheiten in einzelnen Schichten ausgeglichen und eventuell entstandene Rillen aufgefüllt werden. Dies trägt zu einer höheren Bauteildichte bei. Die Drehung der Scanvektoren zeigt außerdem eine Wirkung auf die mechanischen Bauteileigenschaften. So besitzen die Bauteile bessere Zugeigenschaften und ein feineres Gefüge aufgrund eines gleichmäßigeren Temperaturgradienten. Auch die Verzerrung der Bauteile kann durch Drehung der Scanlinien reduziert werden [10].

Einen wichtigen Punkt beim Vergleich verschiedener additiver Fertigungsverfahren stellt die Prozesseffizienz dar. Um eine hohe Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu ermöglichen, werden hohe Aufbauraten angestrebt. Die theoretische Aufbaurrate berechnet sich nach Gleichung (3.3).

$$V_{th} = v_s \cdot h_s \cdot l_z \quad (3.3)$$

Hohe Aufbauraten sind demnach mit höheren Scangeschwindigkeiten, großem Hatch und großer Schichtdicke möglich. Hierbei muss jedoch immer die geforderte Bauteilqualität beachtet werden. So ist beispielsweise für die Generierung hoher Bauteildichten ein geringer Hatch notwendig.

Bestrahlungsregime

Der Energieeintrag in das Material hängt neben der mittleren Laserleistung und der Scangeschwindigkeit auch maßgeblich vom verwendeten Bestrahlungsregime ab. Die Bestrahlung kann sowohl kontinuierlich als auch gepulst erfolgen, wodurch eine Variation des zeitlichen Energieeintrags gegeben ist.

Im Falle der cw-Strahlung wird die Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Material maßgeblich von der Scangeschwindigkeit bestimmt. Zusammen mit dem Fokusdurchmesser lässt sich die Verweildauer berechnen.

$$t_V = \frac{2 \cdot w_0}{v_s} \quad (3.4)$$

Bei gepulster Bestrahlung wird die Wechselwirkungszeit dagegen von Pulsdauer τ_H , Puls-wiederholfrequenz f_P und zeitlichem Pulsabstand bestimmt. In Abbildung 3 ist die gepulste Bestrahlung und deren zeitliche Kenngrößen schematisch für Rechteckpulse dargestellt. Real weicht der zeitliche Pulsverlauf ab. Durch Verringern der Dauer der Pulspause (t_{off}) kann man eine Annäherung der gepulsten Bestrahlung an die cw-Bestrahlung ($t_{off,cw} = 0$) erreichen. Die Berechnung von t_{off} erfolgt aus Pulsdauer und Puls-wiederholfrequenz entsprechend nachfolgender Gleichung.

$$t_{off} = \frac{1}{f_P} - \tau_H \quad (3.5)$$

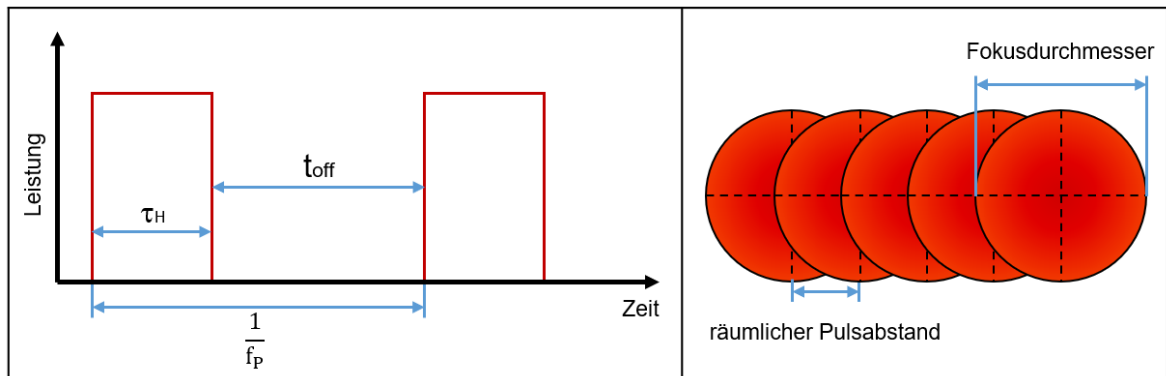


Abbildung 3: Schematische Darstellung der zeitlichen Kenngrößen τ_H , t_{off} , f_P für die gepulste Bestrahlung (Rechteckpuls) (links) und räumlicher Pulsabstand, sowie Fokusbereich (rechts).

In der Literatur wird häufig der Begriff des Arbeitszyklus („duty cycle“) verwendet, welcher sich wie folgt berechnet:

$$\delta = t_{on} \cdot f_P \quad (3.6)$$

Die Größe t_{on} entspricht hierbei der Pulsdauer. Ein größerer Wert für δ bedeutet wiederum eine Annäherung an die cw-Bestrahlung ($\delta = 1$). Eine Annäherung kann folglich durch längere Pulsdauern und höhere Puls-wiederholfrequenzen erreicht werden.

Mit Erhöhen der Frequenz bei gleichbleibender Scangeschwindigkeit sinkt der räumliche Pulsabstand d_P (Gl. 3.7). Aus diesem lässt sich mithilfe des Fokusradius ω_0 der Pulsüberlapp O_P (Gl. 3.8) berechnen.

$$d_P = \frac{v_s}{f_P} \quad (3.7)$$

$$O_P = \frac{(2 \cdot \omega_0) - d_P}{(2 \cdot \omega_0)} \quad (3.8)$$

Beide Größen besitzen eine große Relevanz für die Ausbildung des Schmelzbades. Je geringer der Pulsabstand, desto mehr Pulse treffen auf einen Punkt im Pulverbett. Pulverpartikel werden demzufolge von mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen getroffen und es kommt zur Wärmeakkumulation. Dies ermöglicht ein Aufschmelzen von Pulverpartikeln auch bei geringem Energieeintrag pro Puls. Abbildung 4 verdeutlicht diese Thematik für die Pulswiederhol frequenzen 0,5 MHz und 2 MHz bei einer Scangeschwindigkeit von 3 m/s.

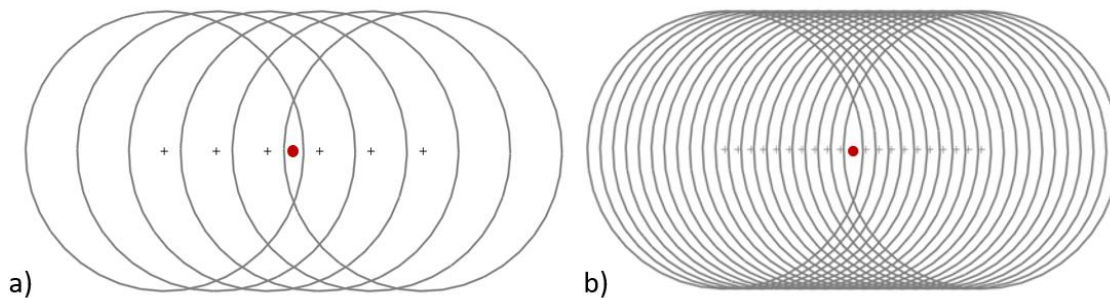


Abbildung 4: Einfluss des räumlichen Pulsabstandes auf die Anzahl der Pulse, welche einen Punkt im Pulverbett treffen. a) 6 Pulse ($f_P = 0,5$ MHz, $d_P = 6$ µm). b) 21 Pulse ($f_P = 2$ MHz, $d_P = 1,5$ µm). $v_s = 3$ m/s, $w_0 = 16,15$ µm.

Bei schnell aufeinanderfolgenden Pulsen kann es vorkommen, dass die Zeit zwischen den Pulsen nicht ausreicht, um ein vollständiges Erstarren der Schmelze zu bewirken. Ist nun der räumliche Pulsabstand zusätzlich sehr gering, so kann ein Folgepuls in das noch flüssige Schmelzbad treffen und ein Aufspritzen der Schmelze bewirken.

Eine weitere wichtige Größe zur Bestimmung des Energieeintrags bei gepulster Bestrahlung stellt die Pulsenergie dar.

$$Q_P = \frac{P_{av}}{f_P} \quad (3.9)$$

3.2 Einflüsse auf die Ausbildung von Schmelzspuren: wirkende Mechanismen und auftretende Effekte

3.2.1 Schmelzbadcharakteristiken

Bei der Ausbildung von Schmelzspuren aus aufgeschmolzenem Pulvermaterial sind zahlreiche Prozessparameter und resultierende Mechanismen beteiligt. Zu den relevanten Größen zählen insbesondere die eingebrachte Energie und die Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Pulvermaterial. Beide Größen werden durch die Prozessparameter mittlere Laserleistung und Scangeschwindigkeit bestimmt. Im Falle der gepulsten Bestrahlung sind zusätzlich Pulsdauer und Pulswiederholfrequenz entscheidend.

Die innerhalb einer bestimmten Zeit in das Material eingebrachte Energie ist ausschlaggebend für die Menge an aufgeschmolzenem Pulvermaterial, sowie für die Temperatur der Schmelze. Letztere besitzt maßgeblichen Einfluss auf die Dauer der schmelzflüssigen Phase, Fließfähigkeit und Oberflächenspannung der Schmelze und bestimmt damit die Fähigkeit des Schmelzbades, sich zu einer Schmelzspur auszubreiten und eine ausreichende Benetzung des Untergrundes zu erzeugen.

Bei geringen mittleren Laserleistung und geringen Wechselwirkungszeiten kann aufgrund des geringen Energieeintrags nur ein kleines Schmelzvolumen erzeugt werden. Häufig besitzt das erzeugte Schmelzbad in diesem Fall lediglich eine kleine Kontaktfläche zur unterliegenden Schicht und es findet keine ausreichende Benetzung statt. Zusätzlich ist die Temperatur der Schmelze vergleichsweise gering, womit eine kürzer bestehende schmelzflüssige Phase und eine geringe Fließfähigkeit einhergehen. Die Zeit bis zum Erstarren der Schmelze reicht folglich nicht aus, um eine gleichmäßige, kontinuierliche Schmelzspur zu bilden. Durch Erhöhen der mittleren Laserleistung oder das Verringern der Scangeschwindigkeit kann ein ausreichend hoher Energieeintrag zur Generierung kontinuierlicher Schmelzspuren erreicht werden. Sind die applizierten Laserleistungen dabei zunächst noch relativ gering, so entstehen zwar kontinuierliche, aber noch recht unregelmäßige Schmelzspuren mit einem wellenartigen Erscheinungsbild. Die Fließfähigkeit der Schmelze ist noch gering, woraus die geringe Oberflächenqualität der Schmelzspuren resultiert [11]. Durch weiteres Erhöhen der eingebrachten Energie steigt die Temperatur der Schmelze und die Dauer der schmelzflüssigen Phase des Schmelzbades nimmt weiter zu, wodurch kontinuierliche und gleichmäßige Schmelzspuren entstehen können.

Ein weiteres Steigern des Energieeintrags führt anschließend wieder zur Verringerung der Spurqualität und die Schmelzspuren entstehen zunehmend diskontinuierlich. Ist die eingebrachte Energie zu hoch, so kann die Temperatur der Schmelze den Siedepunkt übersteigen. Es kommt zum Aufspritzen der Schmelze und das Schmelzbad wird zunehmend instabil [12]. Außerdem wird vermehrt Pulvermaterial verdampft. Der schnell expandierende Metaldampf wirkt einen Druck auf die Schmelze aus, wodurch diese über die Nullebene hinausgedrückt werden kann. Ein hoher Energieeintrag bewirkt zudem einen schnellen

Anstieg der Temperatur an der Oberfläche der Schmelze. Damit entstehen große Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und Zentrum des Schmelzbades. Hierdurch kommt es innerhalb der Schmelze aufgrund einer verstärkten Marangoni-Konvektion zu Turbulenzen, womit die Instabilität des Schmelzbades steigt [13].

Wie bereits erwähnt stellt die Benetzung des Untergrundes einen wichtigen Bestandteil der Spurbildung dar. Hierfür ist besonders die Zeit, welche die Schmelze zum Erstarren benötigt, relevant. Ein schnelles Erstarren geht häufig mit einer schlechten Benetzung einher. Demnach ist für die Ausbildung kontinuierlicher, gleichmäßiger Schmelzspuren eine längere Erstarrungszeit von Vorteil.

Nach Gao et al. lässt sich die Erstarrungszeit eines Schmelztropfens wie folgt berechnen [14].

$$\tau_{solid} = 2 \left(\frac{\alpha^2}{3\alpha} \right) \ln \left(\frac{T_0 - T_t}{T_f - T_t} \right) \quad (3.10)$$

Dabei bezeichnet α den Radius des Tropfens, α den thermischen Diffusionskoeffizienten des Materials, T_0 die Temperatur des Tropfens, T_f die Liquidustemperatur des Materials und T_t die Temperatur des Substrates. Die Erstarrungszeit ist folglich umso länger, je größer der Schmelztropfen und je höher dessen Temperatur ist. Mit einem größeren Energieeintrag lässt sich somit eine längere Erstarrungszeit und damit eine verbesserte Benetzung erzeugen.

3.2.2 Balling-Effekt und Plateau-Rayleigh-Instabilität

Balling beschreibt ein Phänomen, bei welchem eine Schmelzspur in einzelne Schmelztropfen zerfällt. Grund hierfür ist das Bestreben der Schmelze, den energetisch günstigsten Zustand mit geringster Oberflächenenergie zu erreichen.

Das Auftreten des Balling-Effekts kann mithilfe der Plateau-Rayleigh-Instabilität erklärt werden. Diese beschreibt das Aufbrechen eines Halbzylinders in einzelne Kugeln, bei Überschreiten eines bestimmten Länge-zu-Breite-Verhältnis des Zylinders [15]. Je geringer der Radius des Halbzylinders, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für den Balling-Effekt. Folglich ist ein breiteres Schmelzbad weniger anfällig und damit stabiler.

Entscheidend für das Vorkommen von Balling ist außerdem die Größe der Kontaktfläche der Schmelze mit der unterliegenden festen Schicht oder dem Substrat. Ist die Kontaktfläche nur sehr gering, so besitzt die Schmelze nahezu nur eine Flüssig-Gas-Grenzfläche, welche aufgrund hoher Oberflächenspannungen das Auftreten des Balling-Effekts und die Entstehung diskontinuierlicher Schmelzspuren begünstigt (Abbildung 5). Wird die Pulverschicht und das Substrat ausreichend aufgeschmolzen, so besitzt die Schmelze aufgrund der größeren Kontaktfläche nun auch eine größere Fest-Flüssig-Grenzfläche. Diese wirkt

dem Balling-Effekt entgegen, wodurch eine gute Benetzung des Untergrundes und kontinuierliche Schmelzspuren ermöglicht werden [13].

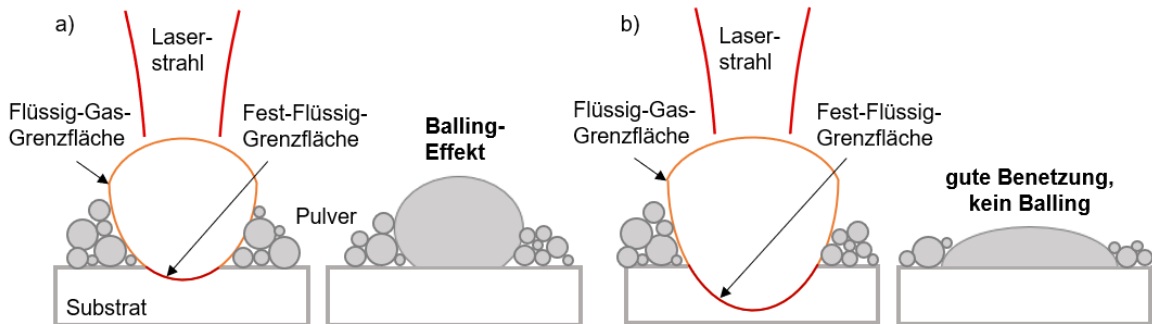


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Relevanz der Kontaktfläche zwischen Schmelzbad und Substrat für den Balling-Effekt. a) kleine Kontaktfläche und resultierendes Balling. b) ausreichend große Kontaktfläche und resultierende gute Benetzung.

3.2.3 Marangoni-Konvektion

Die Form des Schmelzbades wird maßgeblich durch die Scangeschwindigkeit und die innerhalb der Schmelze auftretende Marangoni-Konvektion bestimmt. Der Einfluss beider Größen auf das Schmelzbad ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Mit steigender Scangeschwindigkeit entsteht ein schmaleres, in Scanrichtung längliches Schmelzbad. Material am hinteren Ende des Schmelzbades ist bei hoher Ablenkgeschwindigkeit noch nicht vollständig erstarrt, während bereits weiteres Pulvermaterial in Scanrichtung aufgeschmolzen wird. Das Länge-zu-Breite-Verhältnis nimmt zu. Hiermit steigt, entsprechend der Theorie der Plateau-Rayleigh-Instabilität, wiederum die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Balling.

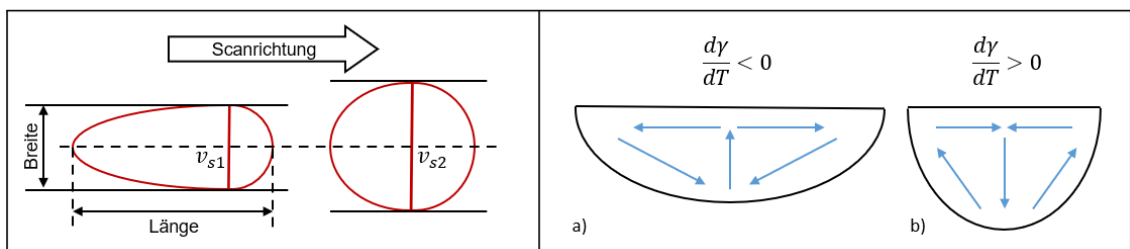


Abbildung 6: Einflussgrößen auf die Form des Schmelzbades. Links: Scangeschwindigkeit ($v_{s1} > v_{s2}$). Rechts: Schmelzfluss im Schmelzbad durch die Marangoni-Konvektion. a) negativer Temperaturkoeffizient der Oberflächenspannung. b) positiver Temperaturkoeffizient der Oberflächenspannung.

Die Strömung des flüssigen Metalls im Schmelzbad wird hauptsächlich durch die Marangoni-Konvektion bestimmt. Sie entsteht durch Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und Zentrum der Schmelze und den daraus resultierenden Gradienten der Oberflächenspannung. Die Schmelze wird aus Gebieten mit geringerer Oberflächenspannung zu Gebieten höherer Oberflächenspannung transportiert [16]. Die Oberflächenspannung von Legierungen ist abhängig von deren Temperatur und deren chemischer Zusammensetzung.

Ist der Temperaturkoeffizient der Oberflächenspannung negativ, d.h. die Oberflächenspannung sinkt mit steigender Temperatur, so erfolgt ein Transport von Schmelze vom Zentrum des Schmelzbades zum Randbereich. Das Schmelzbad wird damit flach und breiter (Abbildung 6, a)). Ein positiver Temperaturkoeffizient der Oberflächenspannung bewirkt dagegen einen Wärmetransport im Zentrum der Schmelze nach unten. Es entsteht ein tiefes und schmales Schmelzbad. Entscheidend für die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung können oberflächenaktive Elemente, wie beispielsweise Sauerstoff, Schwefel oder Stickstoff, sein. Diese bewirken häufig einen positiven Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung [17].

3.2.4 Pulveraufschub

Werden hohe Intensitäten für die Bestrahlung des Pulvermaterials verwendet, was insbesondere bei der Verwendung gepulster Strahlung mit hohen Pulsspitzenintensitäten vorkommt, so kann die Problematik des Pulveraufschubs den Prozess beeinflussen. Durch das Einwirken übermäßig hoher Intensitäten steigt der Anteil an verdampften Pulvermaterial. Der dabei entstehende Druck führt dazu, dass loses Pulver vor dem Laserstrahl in Scanrichtung aufgeworfen wird. Abbildung 7 zeigt die Problematik anhand eines Prozessbildes. Der Pulveraufschub bedeutet eine Schwankung der Schichtdicke durch verdrängtes Pulver. Nach Bestrahlung und Verfestigung des Materials verbleibt eine inhomogene Schicht, welche im nachfolgenden Prozess einen wiederum inhomogenen Pulveraufzug provozieren kann. Sinkende Bauteilqualitäten und zunehmende Baufehler sind die Folge.

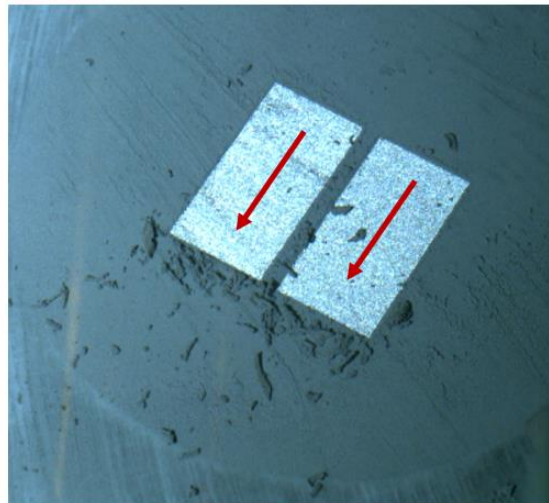


Abbildung 7: Starker Pulveraufschub bei gepulster Bestrahlung mit hohen Intensitäten. Rot markiert ist die Scanrichtung des Laserstrahls.

Übersteigt der Pulveraufschub einen kritischen Wert, so kann es vorkommen, dass aufgeworfenes loses Pulvermaterial auf der zu bestrahlenden Fläche liegen bleibt. An dieser Stelle übersteigt die reale Schichtdicke die Größe der gewünschten Schichtdicke um ein Vielfaches. Die Folge ist ein ungleichmäßiges Aufschmelzen der Pulverschicht, woraus Baufehler resultieren. Ein im Prozess auftretender Pulveraufschub sollte daher, durch Anpassung der applizierten Intensität, möglichst gering gehalten werden.

3.3 Bauteileigenschaften: Dichte, Rauheit, Eigenspannungen

Dichte

Die Dichte der mittels SLM bzw. μ SLM hergestellten Bauteile kann von einer definierten Porosität bis nahezu 100 % Bauteildichte reichen. Sie ist dabei stets abhängig von der Schmelzspurgeometrie und damit von den Prozessparametern Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Zusammen mit dem Hatch und der Schichtdicke, können die Parameter zur Volumenenergiedichte zusammengefasst werden. Bei geringen VED kommt es durch mangelnde Verschmelzung der Pulverpartikel zur Ausbildung geringer Dichten. Übermäßig hohe VED können dagegen durch starkes Verdampfen von Pulvermaterial oder durch einen Übergang zum Keyhole-Schmelzen die Bauteilqualität mindern und geringe Dichten durch eingeschlossene Gasblasen bewirken.

Vom Keyhole-Schmelzen spricht man bei Ausbildung eines Schmelzbades, dessen Tiefe deutlich größer als die Schmelzbadbreite ist [18]. Bei ausreichend hohen Temperaturen wirkt durch verdampfendes Material ein Druck auf die Schmelzoberfläche und es bildet sich eine Dampfkapillare. Diese ermöglicht eine verbesserte Absorption des Lasers, womit die Eindringtiefe steigt und ein tieferes Schmelzbad entsteht [19].

Eine ungünstige Wahl von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit kann, durch Auftreten des Balling-Effekts, die Bauteildichte deutlich mindern [20].

Durch Nutzen eines geringen Hatches wird ein größerer Linienüberlapp generiert. Hierdurch kann wiederum ein größeres Parameterfenster für Laserleistung und Scangeschwindigkeit genutzt werden, ohne ungeschmolzenes Pulvermaterial zwischen den einzelnen Scanlinien zu riskieren. Ein zu großer Linienüberlapp kann sich dagegen ebenso negativ auf die Bauteildichte auswirken. In den überlappenden Bereichen kann mehr Energie absorbiert werden, wodurch die Eindringtiefe und damit die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Keyholes steigt [21].

Die Schichtdicke besitzt ebenso wesentlichen Einfluss auf die Bauteildichte. Mit zunehmender Schichtdicke sind abnehmende Dichten zu erwarten. Die begrenzte Eindringtiefe des Laserstrahls führt bei zu großen Schichtdicken zu einem unzureichenden Aufschmelzen der Pulverschicht sowie der unterliegenden festen Schicht, womit eine schlechte Anbindung und ungeschmolzene Pulverpartikel im Bauteil einhergehen [22].

Rauheit

Die Oberflächenrauheit stellt für viele Anwendungsbereiche eine ausschlaggebende Bauteileigenschaft dar. Für High-End-Anwendungen sind Rauheiten $< 1 \mu\text{m}$ gefragt [17].

Bei Betrachten der Rauheit besteht eine Unterscheidung hinsichtlich der Orientierung der Bauteilflächen. Man differenziert zwischen der Rauheit der obersten horizontalen Flächen (im folgenden Deckflächenrauheit) und der Rauheit sonstig orientierter Flächen.

Die Deckflächenrauheit hängt insbesondere von der Schmelzspurgeometrie und dem Hatch ab. Die Entstehung gleichmäßiger Schmelzspuren, ohne auftretenden Balling-Effekt, ist für geringe Deckflächenrauheiten ausschlaggebend. Eine hohe Dauer der schmelzflüssigen Phase ist hierfür förderlich, da das Schmelzbad vor dem Erstarren Zeit besitzt, um sich auszubreiten und zu glätten. Im Falle der gepulsten Bestrahlung, ermöglicht ein höherer räumlicher Pulsüberlapp die Entstehung geringer Deckflächenrauheiten [23].

Ein ungeeigneter Hatch bewirkt die Entstehung von Rillen zwischen den Schmelzspuren, wodurch die Deckflächenrauheit steigt [24]. Auch der Rakelprozess kann sich, durch inhomogenen Pulveraufzug, auf die Rauheit der Deckflächen auswirken [25]. Im Laufe des Bauprozesses sinkt häufig die Oberflächenqualität des Bauteils. Grund hierfür ist das Schrumpfen des Schmelzbades beim Erstarren. Die Schichtdicke nimmt damit schrittweise zu und trägt zur Instabilität des Schmelzbades bei [9].

Die Oberflächenrauheit vertikaler oder schräg orientierter Bauteilflächen ist abhängig von partiell aufgeschmolzenen Pulverpartikeln, welche an der Fläche anhaften. Loses Pulver am Rande des Schmelzbades wird in die Schmelze gezogen. Bei unzureichender Energiezufuhr können diese Partikel jedoch nur teilweise aufgeschmolzen werden und bewirken final eine höhere Oberflächenrauheit. Um die Oberflächenrauheit zu senken, werden verschiedene Bestrahlungsstrategien angewandt. Eine mögliche Strategie, die Konturbestrahlung, ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

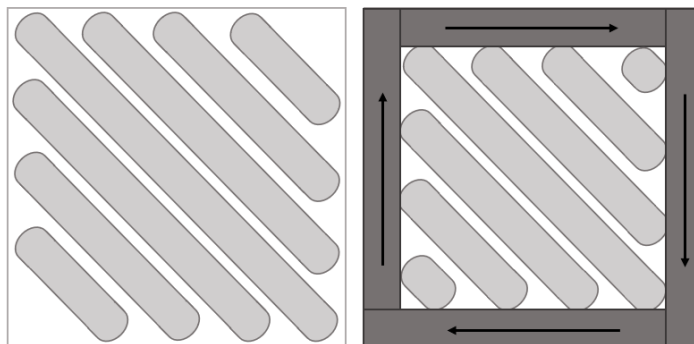


Abbildung 8: Bestrahlungsstrategie zur Verringerung der Oberflächenrauheit. Links: ohne Konturbestrahlung, hohe Oberflächenrauheit. Rechts: mit Konturbestrahlung, geringere Oberflächenrauheit.

Durch die Konturbestrahlung werden Unregelmäßigkeiten der einzelnen Schmelzspuren an den Rändern der zu bestrahlenden Fläche ausgeglichen, womit die Oberflächenrauheit sinkt.

Im μ SLM wurden minimale vertikale Mittenrauwerte von $1,69 \mu\text{m}$ gemessen. Diese bereits geringen Rauheiten reichen jedoch nicht an die erreichbaren Rauheiten ($R_a < 0,6 \mu\text{m}$) anderer Herstellungsverfahren, wie dem Fräsen oder Metall-Spritzgießen, heran [24].

Eigenspannungen

Im Bauprozess induzierte Eigenspannungen können zu Rissen oder zum Verziehen von Bauteilen führen. Im Falle sehr hoher Spannungen kann es zum Ablösen der Teile vom Substrat kommen. Passiert dies während des Bauprozesses, so kann es zur Kollision mit dem Rakelsystem und zur Beschädigung dieses führen. Die Minimierung entstehender Eigenspannungen ist demnach für hohe Bauteilqualitäten förderlich.

Die Bearbeitung des Pulvermaterials mit dem Laserstrahl erzeugt hohe Temperaturgradienten, welche zu einer hohen thermischen Belastung des Materials führen. Bei den Eigenspannungen handelt es sich um verbleibende thermische Spannungen, welche durch inhomogene Ausdehnung und Kontraktion des Materials entstehen [26]. Durch den Laserstrahl erhitztes Material dehnt sich aus, wird dabei jedoch von dem umgebenden Material eingeschränkt. Es entstehen Druckspannungen. Nach Interaktion mit dem Laserstrahl kühlt das Material ab, erstarrt und schrumpft dabei. Die Volumenabnahme der Schmelze wird wiederum von bereits verfestigtem Material behindert. Es entstehen Zugspannungen. Gleichzeitig bewirkt das Schrumpfen des aufgeschmolzenen Materials durch den schichtweisen Aufbau im SLM/ μ SLM Druckspannungen in unterliegenden Schichten. Im laufenden Bauprozess staut sich Wärme in bereits verfestigten Schichten an, wodurch der Temperaturgradient im Bauteil sinkt und Druckspannungen von unten nach oben reduziert werden [27]. Entlang der Scanrichtung bestehen aufgrund großer Temperaturgradienten größere Eigenspannungen als senkrecht dazu.

In zahlreichen Untersuchungen wurden mit zunehmender Streckenenergie wachsende Eigenspannungen festgestellt [27, 28, 29]. Dies kann mit einem größeren aufgeschmolzenen Volumen und einer damit einhergehenden größeren Volumenabnahme beim Erstarren erklärt werden.

Weiterhin besteht eine Abhängigkeit der Eigenspannung in Bauteilen von der Bauteildichte. An Bauteilen mit höherer Dichte wurden höhere Eigenspannungen festgestellt. Grund hierfür ist der Mangel an Poren, welche als leere Stellen im Material keine Kräfte übertragen und damit die Eigenspannungen reduzieren. Narvan et al. stellten fest, dass mit Bauteildichten größer 97 % schließlich keine Abhängigkeit der Eigenspannungen von der Bauteildichte mehr besteht [29].

4 Stand der Technik

Nach jahrelanger Forschung und Weiterentwicklung findet das Verfahren des SLM großes Interesse in der Industrie. Zahlreiche Firmen bieten vollautomatisierte SLM-Anlagen für die Herstellung komplexer Bauteile an. Mit zunehmenden Anwendungsbereichen, steigen auch stetig die Anforderungen an die Bauteilqualität. Unter anderem werden höhere Dichten, verbesserte mechanische Eigenschaften, höhere Auflösungen und geringere Oberflächenrauheiten gefordert [30].

Die Optimierung der Prozessparameter zum Erreichen maximaler Bauteilqualitäten stellt den Schwerpunkt zahlreicher Untersuchungen zum SLM-Verfahren, sowohl im Makro- als auch im Mikro-Bereich dar. Im Rahmen dieser wurde unter anderem der Einfluss von Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und Prozessatmosphäre auf die Ausbildung von Schmelzspuren und davon ausgehend auf die Bauteileigenschaften bereits umfassend untersucht [11, 31, 32].

Einen weiteren nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Bauteilqualität besitzt, neben den bisher genannten Parametern, die verwendeten Bestrahlungsregime. Die Mehrheit der Hersteller, darunter EOS GmbH, Trumpf GmbH, Concept Laser GmbH und SLM Solutions GmbH, bevorzugen die kontinuierliche Bestrahlung. Andere Systeme, z.B. Anlagen des Herstellers Renishaw plc., setzen dagegen gepulste Strahlung ein [33].

Der zeitliche Verlauf des Energieeintrags stellt eine relevante Größe für den Bauprozess dar. Durch Verwendung von gepulster Strahlung kann der Wärmeeintrag in das Material flexibler angepasst werden.

Untersuchungen zum Einfluss von kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung beschränken sich bisher vorwiegend auf das Makro-SLM.

Demir et al. untersuchten den Einfluss von zeitlichem und räumlichem Pulsüberlapp auf die Bauteildichte und Maßhaltigkeit der erzeugten Teile [30]. Bei konstanter Fluenz erfolgte eine Variation der Bestrahlungszeit (Pulsdauern: 70 μs , 90 μs) und des Pulsüberlapps. Die Dauer der Bestrahlungszeit zeigte einen deutlichen Einfluss auf die Bauteilqualität. Mit zunehmender Bestrahlungszeit und größerem Pulsüberlapp wurden höhere Bauteildichten erreicht. Gleichzeitig wirkten sich längere Bestrahlungszeiten durch Erzeugung eines breiteren Schmelzbades negativ auf die Maßhaltigkeit der Bauteile aus. Die Verwendung gepulster Bestrahlung mit kürzerer Bestrahlungszeit erwies sich somit vorteilhaft für die Erzeugung feiner Strukturen.

2018 verglichen Caprio et al. die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung im SLM [34]. Die Erzeugung der Pulse mit Pulsdauern im Bereich von 100 μs - 200 μs erfolgte mittels

Leistungsmodulation. Die Variation des zeitlichen Energieeintrags zeigte einen deutlichen Effekt auf die Größe und das Verhalten des Schmelzbades. Bei gepulster Bestrahlung wurde ein intermittierendes Verhalten der Schmelzbaddynamik beobachtet. Durch Annäherung der gepulsten Bestrahlung an den cw-Prozess, wurde eine Zunahme der Stabilität und Breite des Schmelzbades festgestellt. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den Bestrahlungsregimen bestand in der Wirkung auf lose Pulverpartikel in der Nähe des Schmelzbades. Bei cw-Bestrahlung wurden umliegende Partikel in die Schmelze gezogen, sodass um die Schmelzspur ein pulverfreier Bereich entstand. Unter Verwendung von gepulster Strahlung ist dieser Effekt wesentlich schwächer ausgeprägt. Genau wie Demir et al. zuvor konnten auch Caprio et al. einen Vorteil der gepulsten Bestrahlung zur Erreichung höherer Auflösungen nachweisen.

Mithilfe eines analytischen Modells betrachteten Caprio et al. den Einfluss des Bestrahlungsregimes auf die Schmelzleistung [35]. Mit zunehmender Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung durch Erhöhen des Arbeitszyklus konnte eine rasche Zunahme der Schmelzleistung festgestellt werden. Damit einhergehend ist das aufgeschmolzene Volumen mit cw-Bestrahlung 2- bis 3-fach größer als mit gepulster Bestrahlung. Die Breite einzelner Schmelzspuren konnte dagegen unter Verwendung von gepulster Strahlung von 350 μm auf 200 μm verringert werden, was für eine höhere Auflösung mit gepulster Bestrahlung spricht. Als wichtigster Einflussfaktor wird die optische Kopplung zwischen Laserstrahl und Schmelzbad genannt. Es wird vermutet, dass bei Verwendung kontinuierlicher Strahlung ein stabileres Schmelzbad entsteht, was die Absorption der Strahlung verbessert und damit ein größeres Schmelzbad ermöglicht.

Biffi et al. untersuchten den Einfluss von cw - und gepulster Bestrahlung auf die Materialeigenschaften hergestellter Bauteile unter Verwendung von AlSi10Mg - Pulver [33]. Als wesentlicher Grund für sich unterschiedlich ausbildende Materialeigenschaften wurden verschiedene Abkühlraten der Bestrahlungsregime beschrieben. Eine gepulste Bestrahlung führt zu deutlich höheren Abkühlraten als die cw-Bestrahlung. Dies führte unter anderem zu einer größeren Anzahl an Gitterdefekten in den mittels gepulster Bestrahlung erzeugten Proben.

Bei den bisher genannten Untersuchungen kamen lange Pulse mit Pulsdauern im Bereich von 100 μs zum Einsatz. Für den Vergleich von cw-Strahlung und gepulster Bestrahlung mit Pulsdauern im ns-Bereich ist bisher nur wenig Literatur zu finden. Auch Untersuchungen zum Verhalten von cw- und gepulster Strahlung im Mikro-Additiven sind im Vergleich zu den Veröffentlichungen im Makro-Bereich deutlich reduziert.

Im Bereich des Lasermikrosinterns fanden bereits erste Untersuchungen zum Vergleich von kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung statt. Ke et al. nutzten in Versuchen mit Nickelpulver einen gütegeschalteten Nd:YAG-Laser mit Pulsdauern im Bereich von 200 ns – 400 ns [36]. Erzeugte Schmelzspuren wiesen in Abhängigkeit von Pulsspitzenleistung und Bestrahlungsregime eine unterschiedliche Morphologie auf. Mittels cw-Strahlung erzeugte Schmelzspuren zeigten die Form eines Halbzylinders mit großem

Benetzungswinkel. Schmelzspuren hergestellt mit der kurz gepulsten Strahlung waren wesentlich flacher, wiesen jedoch eine wellige Struktur auf (Abbildung 9). Als wesentlichen Einflussfaktor benannten Ke et al. das im Prozess entstandene Plasma. Ein, durch kurze Laserpulse mit moderaten Pulsspitzenleistungen, erzeugtes schwaches Plasma kann sich positiv auf die Fähigkeit der Schmelze zur Benetzung der Unterfläche auswirken. Hohe Pulsspitzenleistungen dagegen induzieren ein starkes Plasma, welches durch rasche Expansion Pulverpartikel aus dem Wechselwirkungsbereich verdrängt und grabenähnliche Schmelzspuren hinterlässt. Bei der Bestrahlung mit cw wurde lediglich ein sehr schwaches Plasma ohne Einfluss auf die Ausbildung der Schmelzspur beobachtet.

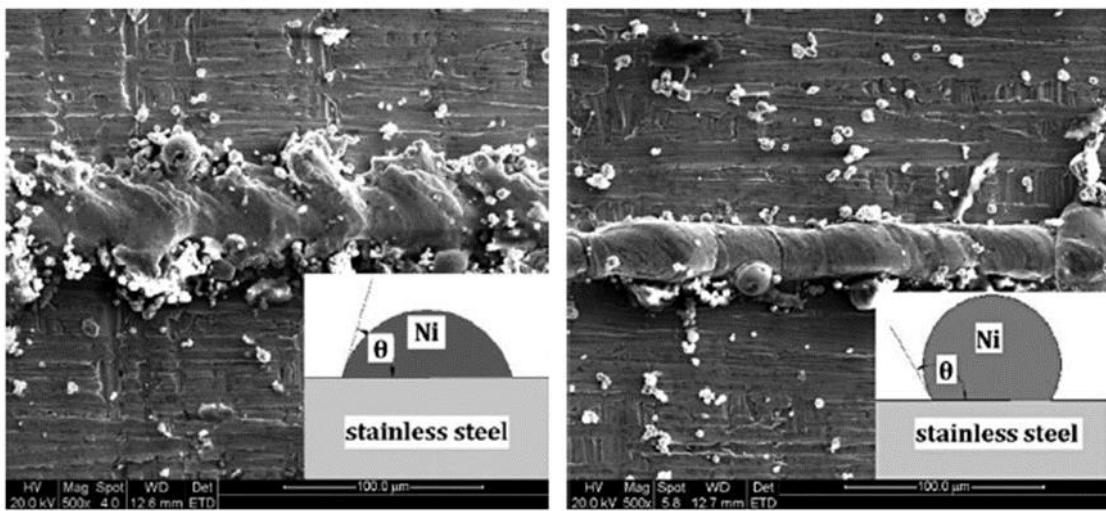


Abbildung 9: REM-Aufnahmen von Schmelzspuren hergestellt mit unterschiedlichen Bestrahlungsregimen. Links: gütegeschalteter Laser mit einer Pulsdauer von einigen hundert ns. Rechts: cw-Strahlung. Quelle: [36]

In Einzelpurexperimenten untersuchten Fischer et al. die Stabilität des Schmelzbades bei kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung [4]. Mit einer Pulsdauer von 250 ns und Pulswiederhol frequenzen von 10 kHz – 390 kHz konnten, unabhängig vom räumlichen Pulsabstand, keine kontinuierlichen Schmelzspuren erzeugt werden. Im Bereich geringer Pulsenergien entstanden lediglich unregelmäßige Spuren mit Defekten und starkem Balling. Hohe Pulsenergien führten dagegen durch exzessiven Energieeintrag zum Abtrag des Substrates. Im Vergleich dazu wurden mit cw-Strahlung Schmelzspuren bei verschiedenen Streckenenergien erzeugt. Mit hohen Streckenenergien größer 1 J/cm wiesen die erzeugten Spuren erhöhte Partien auf, welche über die Schichtdicke herausragten. Für Streckenenergien von 0,1 J/cm bis 0,6 J/cm wurden homogene, kontinuierliche Schmelzspuren beobachtet. Mit sinkender Streckenenergie wurde eine Zunahme von Defekten und dem Balling-Effekt vermerkt. Ab Streckenenergien kleiner 0,06 J/cm entstand kein erkennbares Schmelzbad. Zusammenfassend ließ sich die mittels ns-Pulsen erreichte Schmelzbadstabilität nicht mit der deutlich besseren Stabilität der cw-Spuren vergleichen, weshalb sich Fischer et al. in folgenden Untersuchungen für die Nutzung von kontinuierlicher Laserstrahlung entschieden.

Im Jahr 2013 erbrachten Ebert et al. einen Vergleich zur Bestrahlung von Wolframpulver mit kontinuierlicher und ultrakurz gepulster Laserstrahlung [37]. Hierfür kam ein Femtosekunden-Laser mit einer Pulsdauer von 180 fs zum Einsatz. Bei Verwendung der gleichen mittleren Laserleistung wurden ähnliche Schmelzstrukturen für beide Bestrahlungsregime beobachtet. Kleinere Abweichungen bestanden in einer stärkeren Vernetzung zwischen einzelnen Schmelzspuren und einer geringeren Spurbreite bei Verwendung der ultrakurzen Pulse. Für die cw-Bestrahlung wurde dagegen eine höhere Tendenz zur Bildung von Schmelzperlen festgestellt. Deutliche Unterschiede zwischen beiden Bestrahlungsregimen traten erst im Bereich geringer Streckenenergien auf.

Während die Streckenenergie zur Erzeugung von Schmelzstrukturen bei Verwendung von cw-Strahlung einen Wert von 0,02 J/cm nicht unterschreiten darf, wurden mit ultrakurz gepulster Strahlung bereits ab einer Streckenenergie von 0,004 J/cm Schmelzstrukturen beobachtet. Bei gleicher mittlerer Leistung und Scangeschwindigkeit entstanden Schmelzstrukturen unter Verwendung der fs-Strahlung zudem deutlich feiner und auch in tieferen Bereichen des Pulverbettes. Im Vergleich dazu bildeten sich die Strukturen unter cw-Strahlung vorwiegend an der Oberfläche des Pulverbettes aus (Abbildung 10).

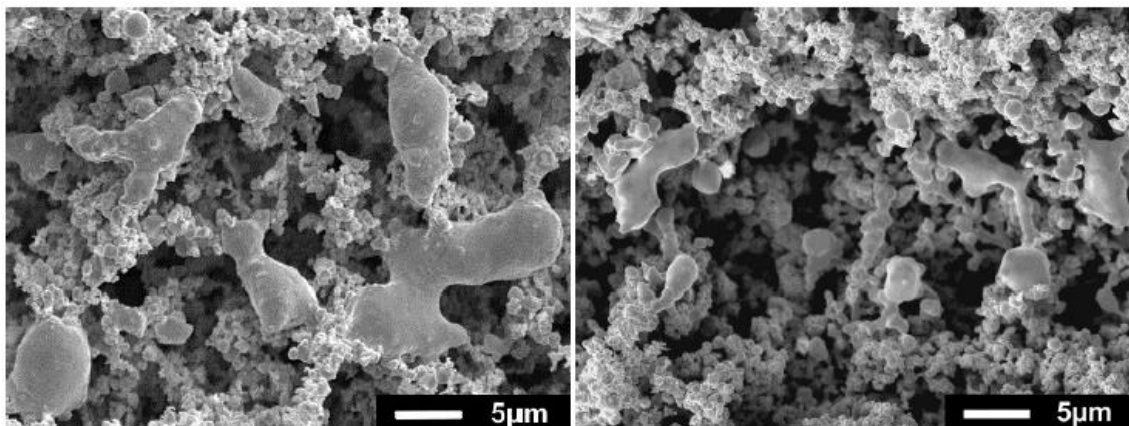


Abbildung 10: Bestrahlte Wolfram-Pulveroberflächen, erzeugt mit ähnlichen Prozessparametern ($P_{av} = 4,2 \text{ W}$, $v = 5 \text{ m/s}$). Links: cw-Laser mit $I_0 = 6,67 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. Rechts: fs-Laser, $f_p = 1 \text{ MHz}$, $I_0 = 4,04 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$. Quelle: [37]

Die Anwendung ultrakurzer Laserpulse im LPBF-Prozess wirkt sich ebenfalls auf die Dichte der erzeugten Bauteile aus. Ullsperger et al. verglichen Bauteildichten für Probekörper hergestellt mit konstanter VED und Pulsdauern von 800 ps, 20 ps und 500 fs, sowie cw-Bestrahlung [38]. Bei einer Pulswiederholfrequenz von 20 MHz wurden ähnliche Dichten im Bereich von 84 % - 86 % für alle Bestrahlungsregime beobachtet. Mit Verringerung der Frequenz auf 10 MHz wurden mit kürzerer Pulsdauer höhere Dichten bis 95 % erreicht. Bei konstanter mittlerer Laserleistung bewirken geringere Frequenzen oder kürzere Pulsdauern einen Anstieg in der Pulsspitzenintensität. Das Einbringen sehr hoher Pulsspitzenintensitäten größer $5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$ führt zum sogenannten Keyhole-Schmelzen, welches ein tieferes Eindringen in das Schmelzbad, sowie eine verbesserte Energieeinkopplung durch Mehrfachreflexion ermöglicht. Die Wirkung des Keyhole-Schmelzens begünstigt in diesem Fall die höheren Bauteildichten.

Es zeigt sich, dass sowohl die kontinuierliche als auch die gepulste Bestrahlung Anwendung in der laserbasierten additiven Fertigung finden und beide Bestrahlungsregime unterschiedliche Vorteile hinsichtlich möglicher Bauteileigenschaften besitzen. Tabelle 1 gibt einen Vergleich für in der Literatur erreichte Bauteileigenschaften unter Verwendung von gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung.

Tabelle 1: Vergleich erreichter Dichten, Auflösungen und Rauheiten für verschiedene Verfahren und Bestrahlungsregime. Angaben aus der Literatur.

Quelle	[4]	[39] [40]	[12]	[41]
Verfahren	μSLM	LMS	μSLM	μSLM
Bestrahlung	cw	gepulst ($\tau_H = 180 \text{ ns}$)	cw	cw / gepulst ($\tau_H = 200 \text{ }\mu\text{s}$)
Material	316L ($d_{50} = 3,5 \text{ }\mu\text{m}$)	Molybdän, Silber, Kupfer, 316L	316L	316L
Fokusbereich	30 μm	25 μm	25 μm	20 μm
Schichtdicke	7 μm	1 - 10 μm	20 μm	1 μm
Dichte	99,32 %	97 %	99,79 \pm 0,1 %	-
Auflösung	57 μm	< 30 μm	-	55 μm (cw) 42,7 μm (gepulst)
Rauheit	Ra = 7,29 – 9,43 μm	Ra = 3,5 μm	Ra = 2,53 \pm 0,3 μm	Ra = 4,2 μm (cw) Ra = 1,47 μm (gepulst)

5 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsmoduls wurden bereits erste Untersuchungen zur Annäherung des gepulsten LMS-Prozesses an den cw-Prozess durchgeführt. Hierfür wurde der Einfluss längerer Pulsdauern und höherer Pulswiederholffrequenzen auf die Bauteildichte betrachtet. Es wurden quaderförmige Probekörper mit unterschiedlichen gepulsten Bestrahlungsregimen hergestellt. Als Pulvermaterial kam Edelstahl 316L ($D_{90} < 10 \mu\text{m}$) zum Einsatz. Der Prozess fand unter Schutzgasatmosphäre statt. Scangeschwindigkeit, Hatch und Schichtdicke wurden konstant gehalten, um lediglich den Einfluss der Pulsdauer und Pulswiederholffrequenz bei verschiedenen mittleren Laserleistungen zu eruieren.

Untersuchungen zur Nutzung längerer Pulsdauern bei einer im LMS üblichen Pulswiederholffrequenz von 0,5 MHz zeigten einen positiven Effekt der längeren Pulse auf das Bearbeitungsergebnis. Durch das Erhöhen der Pulsdauer von 229 ns auf 457 ns konnte die Bauteildichte von 90,64 % auf 98,75 % erhöht werden. Die Dichtemessung erfolgte hierbei archimedisch. Als Grund für die höhere Dichte wurde ein größerer Wärmetransport in die Tiefe, aufgrund der mit Pulsdauer zunehmenden thermischen Diffusionslänge, vermutet. Das damit einhergehende größere Schmelzbad begünstigte die Entstehung dichter Bauteile.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Nutzung einer höheren Pulswiederholffrequenz bei konstanter Pulsdauer von 229 ns untersucht. Mit Erhöhen der Frequenz von 0,5 MHz auf 1 MHz ging eine Dichtezunahme von 90,64 % auf 99,07 % einher. Mit größerer Pulswiederholffrequenz nähert sich der Prozess durch Verringern der Pulspause zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen dem cw-Prozess an. Die entstehende Schmelze kühlt zwischen den einzelnen Pulsen weniger stark ab, wodurch eine Ausbildung gleichmäßiger Schmelzspuren und eine damit einhergehende hohe Bauteildichte begünstigt wird. Die Ergebnisse zeigten außerdem, dass der gewählte Hatch für diese Pulsdauer und Pulswiederholffrequenz nicht optimal ist. Es werden höhere Dichten durch Reduktion des Hatches ($< 28 \mu\text{m}$) bei 229 ns und 1 MHz vermutet.

Beide Untersuchungen zeigten, dass eine Annäherung des gepulsten LMS-Prozesses an eine kontinuierliche Bestrahlung Potential für die Optimierung bestimmter Bauteileigenschaften, v.a. der Bauteildichte, besitzt. In der Tabelle 2 sind nochmals die erreichten Dichtewerte aufgeführt. Inwiefern sich die Verkürzung der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen auf weitere Eigenschaften, wie Auflösung und Oberflächenrauheit, auswirkt, wurde bisher nicht betrachtet.

Die in den Untersuchungen ermittelten Prozessparameter bieten die Grundlage für die folgenden Betrachtungen.

Tabelle 2: In vorangegangenen Untersuchungen erreichte maximale Dichten in Abhängigkeit von Pulsdauer und Frequenz mit Angabe der konstanten Prozessparameter. Untersucht wurde der Einfluss längerer Pulsdauern und höherer Pulswiederhol frequenzen auf die erreichbaren Bauteildichten.

Pulsdauer (ns)	Frequenz (MHz)	Maximale relative Dichte (%)	Konstante Parameter	
229	0,5	90,64	Scangeschwindigkeit (m/s)	2,8
457	0,5	98,75	Hatch (µm)	28
229	1	99,07	Schichtdicke (µm)	4

6 Anlagentechnik und Pulvermaterial

Für die nachfolgenden Untersuchungen stand eine Forschungsanlage mit einem 100 W Faserlaser der Firma Trumpf (TruPulse nano 2010) mit einer Wellenlänge von 1064 nm zur Verfügung. Der Laser bietet neben der kontinuierlichen Bestrahlung auch die Möglichkeit kurze Pulse zu erzeugen. Dabei stehen für die Bearbeitung 40 verschiedene Pulsformen mit Pulsdauern im Bereich von 6 ns bis 2020 ns zur Verfügung. Pulswiederholfrquenzen reichen, in Abhängigkeit der gewählten Pulsform, von 1 kHz bis 4 MHz. Tabelle 3 fasst die wichtigsten Daten des Lasers laut Hersteller zusammen.

Tabelle 3: Herstellerangaben der wichtigsten Kennwerte des verwendeten Faserlasers [42].

TruPulse nano 2010 (TP-100P-A-EP-Z-B-Y)	
Maximale mittlere Leistung	100 W
Wellenlänge	1064 nm
M²	< 1,6
Frequenzbereich	1 kHz - 4166 kHz
Bereich der Pulsdauern	6 ns - 2020 ns
Maximale Pulsenergie	1,3 mJ

Die Strahlableitung erfolgt über einen Galvanometerscanner der Firma Scanlab (excelliSCAN 14). Dieser ermöglicht Ablenkgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s. Eine Besonderheit des Scanners besteht in der Nutzung einer speziellen Regelungstechnik, wodurch die Scannerachsen, unabhängig von der Scangeschwindigkeit, stets maximal beschleunigen. Dadurch sind Beschleunigungs- und Abbremszeiten an Start- und Endpunkten von Scanvektoren minimiert und Prozesszeiten werden verringert. Außerdem erfolgt die Strahlableitung ohne Schleppverzug, wodurch höhere Prozessgenauigkeiten, beispielsweise durch lediglich geringe Abrundungen von Ecken oder ein präzises Bestrahlen von Kreisconturen, erreicht werden können. Als Fokussieroptik wird eine F-Theta-Optik der Firma Sill (S4LFT0163/126) mit einer Brennweite von 163 mm verwendet.

Um eine Aussage über die räumlichen Strahleigenschaften treffen zu können erfolgte eine Strahlvermessung mit dem Microspotmonitor der Firma Primes. Die räumliche Intensitätsverteilung entspricht im Fokus einer Gaußverteilung (Abbildung 11). Das gemessene M² beträgt 1,35. Der Fokusbereich beträgt 32,3 µm.

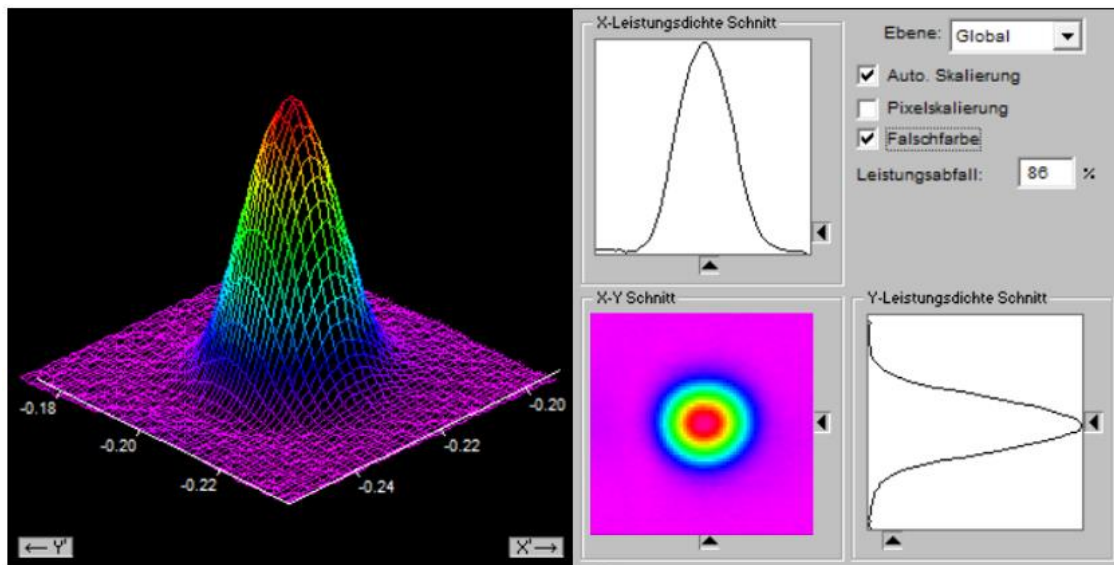


Abbildung 11: Räumliche Intensitätsverteilung des Laserstrahls im Fokus. Gemessen bei einer Leistungsvorgabe von 30 % und einer Pulsfrequenz von 1 MHz.

Um die am Bearbeitungsort zur Verfügung stehende mittlere Laserleistung zu ermitteln, erfolgte eine Leistungsmessung. Hierfür wurde ein 300 W - Messkopf verwendet. Die Messung erfolgte sowohl für die kontinuierliche als auch für die gepulste Bestrahlung ($f_p = 1$ MHz). Durch optische Komponenten im Strahlengang wird die mittlere Laserleistung um 7 % abgeschwächt (Abbildung 12).

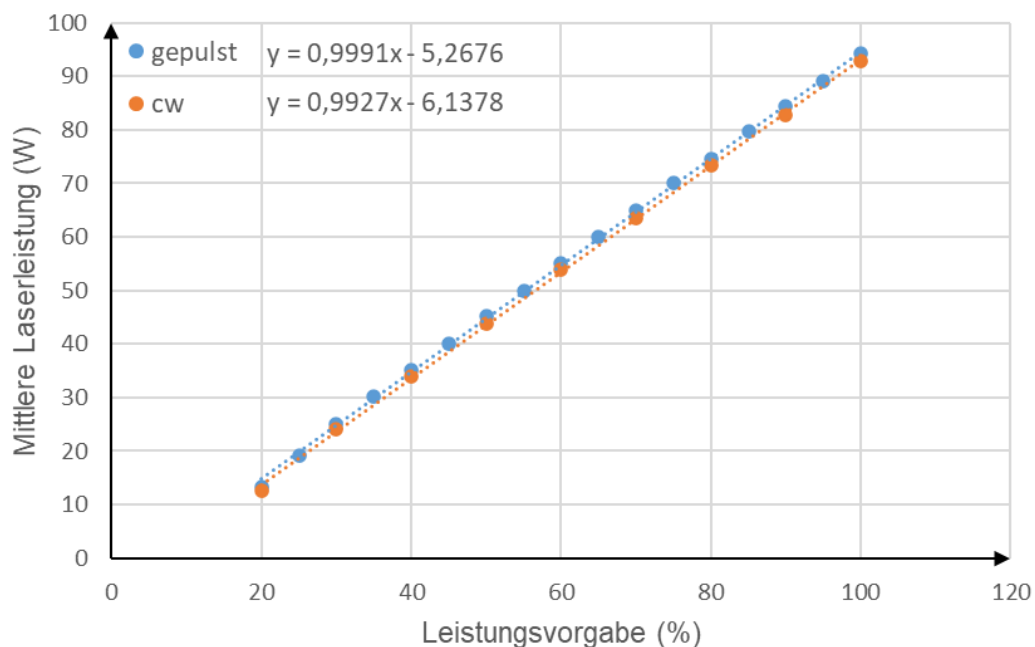


Abbildung 12: Mittlere Laserleistung am Bearbeitungsort in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung.

Die Leistungsmessung dient als Grundlage zur Berechnung der Leistungsvorgabe für entsprechende mittlere Laserleistungen für die folgenden Versuche.

Der Bauraum der Anlage ist in Abbildung 13 zu sehen. Für den Pulveraufzug stehen zwei 360° drehbare Rakelarme zur Verfügung. Diese ermöglichen ein sogenanntes Kreuzrakeln, wodurch Pulveraufzug und Abzug der Pulverschicht mit der Hartmetallklinge aus unterschiedlichen Richtungen erfolgen. Um die Rakelbarkeit des feinkörnigen Pulvermaterials zu ermöglichen, erfolgt eine Verdichtung des Pulvers über ein zusätzliches Gewicht auf dem Pulverreservoir. Als Bauplattform kommen zylindrische Edelstahlsubstrate mit einem Durchmesser von 35 mm zum Einsatz. Die Zustellung der Substratachse erfolgt mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Die Prozesskammer kann für Untersuchungen unter Schutzgasatmosphäre luftdicht verschlossen werden. Eine Gasumwälzung erzeugt den notwendigen Schutzgasstrom in der Kammer. Als Schutzgas wird Argon verwendet.

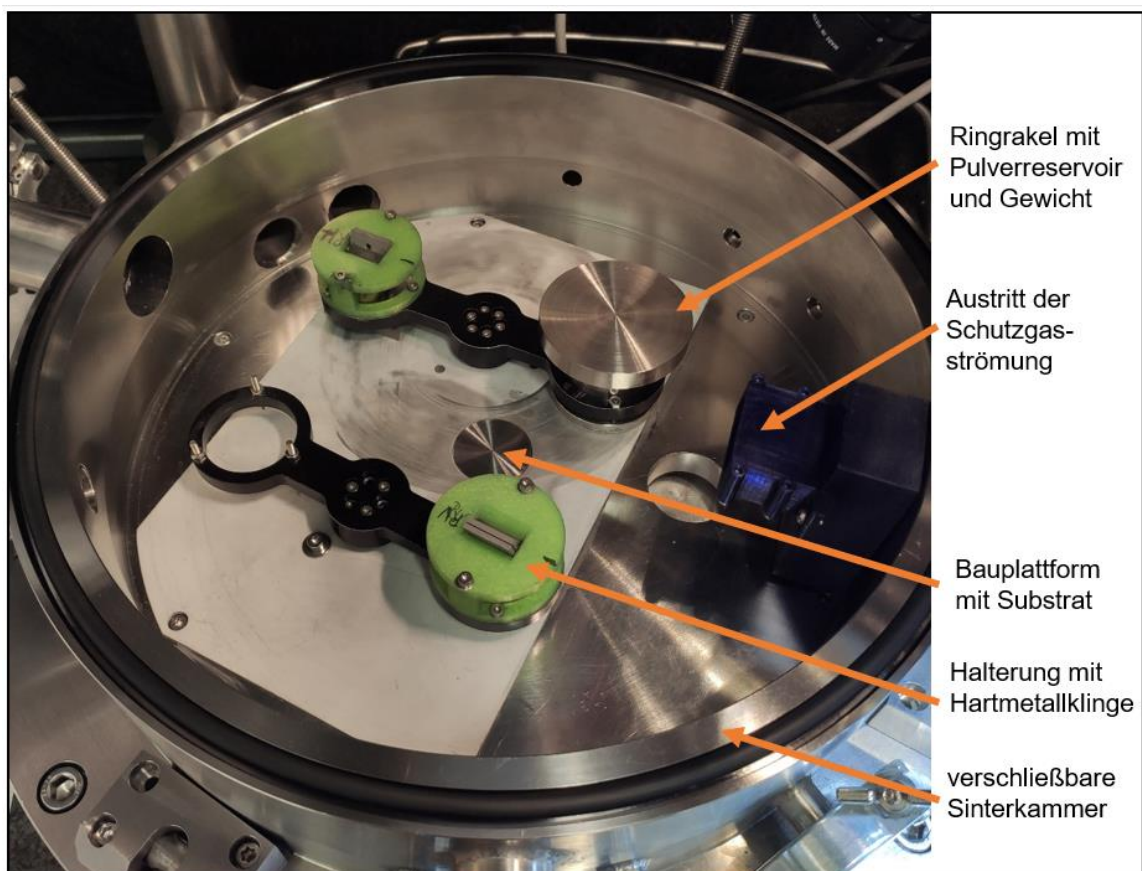


Abbildung 13: Bauraum der Forschungsanlage. Zu sehen ist das Rakelsystem mit zwei Rakelarmen mit Pulverreservoir und Klingenhalterung, sowie die Bauplattform mit einem Durchmesser von 35 mm.

Charakterisierung der gepulsten Bestrahlungsregime

Wie bereits zu Beginn des Kapitels genannt, können verschiedene Pulsformen für den Bearbeitungsprozess gewählt werden. Die maximale Pulswiederholfrequenz ist dabei von der Pulsdauer abhängig. Mit sinkender Pulsdauer sind höhere Frequenzen möglich.

Die maximale Pulsenergie wird je nach Pulsform bei einer spezifischen Pulswiederholfrequenz PRF_0 erreicht. Um eine Beschädigung des Lasers durch hochenergetische Pulse zu vermeiden, erfolgt bei Pulswiederholfrequenzen kleiner PRF_0 eine Modulation der Laserdioden, sodass die Pulsenergie nicht weiter über den Maximalwert steigt. Für Frequenzen größer PRF_0 sinken Pulsenergie und Pulsspitzenleistung mit steigender Frequenz (Abbildung 14).

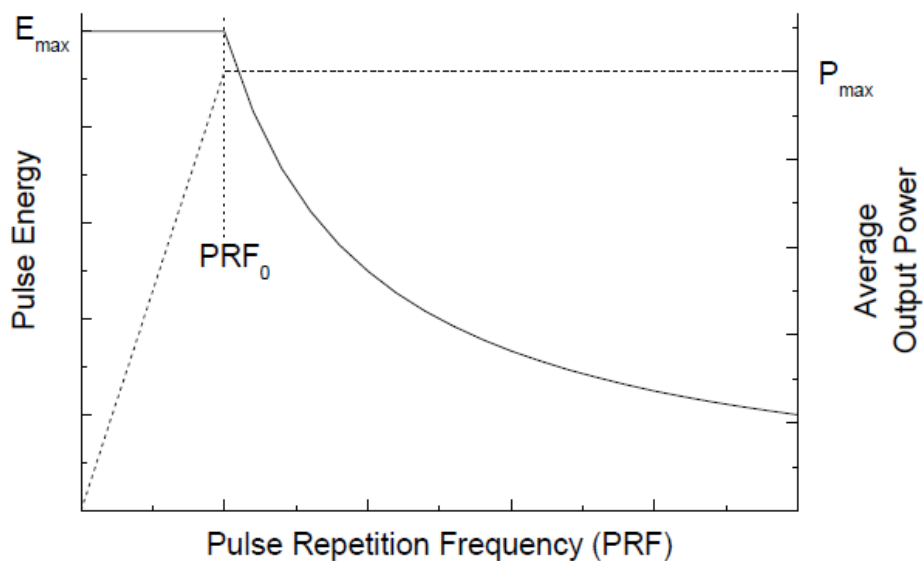


Abbildung 14: Abhängigkeit der Pulsenergie von der Pulswiederholfrequenz. Quelle: [44]

Zur Charakterisierung der Pulsformen wurde der zeitliche Pulsverlauf für eine Auswahl an Pulsformen gemessen. Die Messung erfolgte mit einer schnellen Photodiode mit einer Anstiegszeit < 300 ps. Das Signal wurde mithilfe eines Oszilloskops dargestellt und ausgewertet. Von Interesse war der zeitliche Pulsverlauf für verschiedene Kombinationen aus Pulsdauer und Pulswiederholfrequenz mit abnehmender Pulspause t_{off} . Die Verringerung von t_{off} wurde durch eine Steigerung der Pulswiederholfrequenzen erreicht. Als Pulsform wurde jene ausgewählt, welche bei gewünschter Frequenz die längste Pulsdauer besitzt. Abbildung 15 zeigt den zeitlichen Verlauf ausgewählter Pulsformen grafisch.

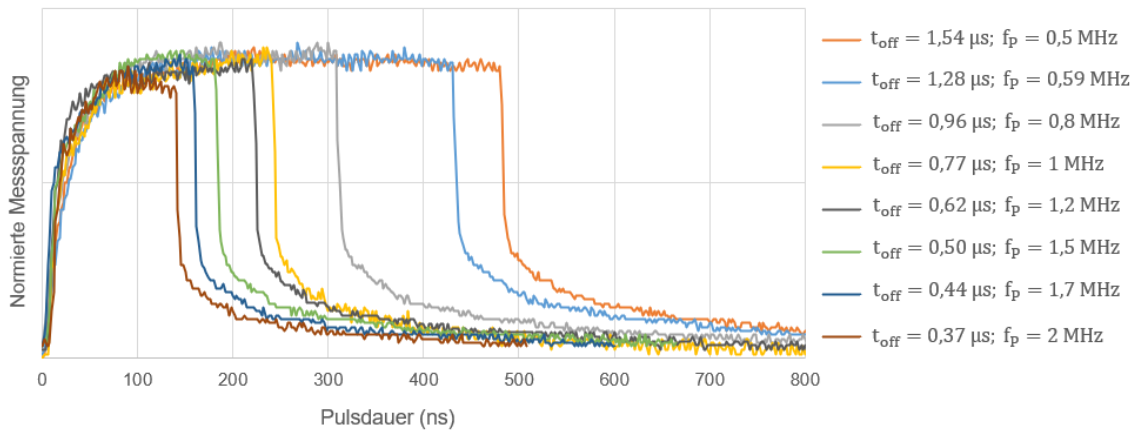


Abbildung 15: Zeitlicher Pulsverlauf für ausgewählte Pulsformen und Pulswiederholraten mit sinkender t_{off} . (Leistungsvorgabe: 40 %)

Der zeitliche Pulsverlauf weicht für alle Pulsformen von einer Gaußverteilung ab. Formeln zur Berechnung der Pulsspitzenleistung (Gl. 6.1) und Pulsspitzenintensität (Gl. 6.2) sind für einen zeitlich und räumlich gaußverteilten Puls definiert.

Pulsspitzenleistung für gaußverteilten Puls:

$$P_{\text{max}} = \frac{Q_P}{1,064 \cdot \tau_H} \quad (6.1)$$

Pulsspitzenintensität für gaußverteilten Puls:

$$I_0 = \frac{2 \cdot P_{\text{max}}}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad (6.2)$$

Bei Anwendung dieser Formeln auf die gemessenen Pulsformen ist folglich ein Fehler zu erwarten. Um den realen Wert der beiden Größen zu berechnen, muss eine andere Lösung gefunden werden.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der realen Pulsspitzenleistungen und -intensitäten aus den gemessenen Spannungswerten wird in [45] beschrieben. Hierbei wird die Pulsenergie, als eine von der Pulsform unabhängige Größe, verwendet.

$$Q_P = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) \cdot dt = \sum_{i=0}^n P_i \cdot \Delta t = C \cdot \sum_{i=0}^n U_i \cdot \Delta t \quad (6.3)$$

Unter der Annahme, dass sich die Spannungsänderung der Photodiode linear zur eingestrahelten Leistung verhält, kann durch Berechnung des Korrekturwertes C jedem Spannungswert ein realer Leistungswert zugeordnet werden. Die Berechnung der Pulsspitzenleistung ist demnach aus dem maximalen Spannungswert möglich.

Da das räumliche Intensitätsprofil eine Gaußverteilung besitzt, kann zur Berechnung der realen Pulsspitzenintensität aus der realen Pulsspitzenleistung Gleichung (6.2) verwendet werden. In Tabelle 4 sind die realen und theoretischen Werte gegenübergestellt.

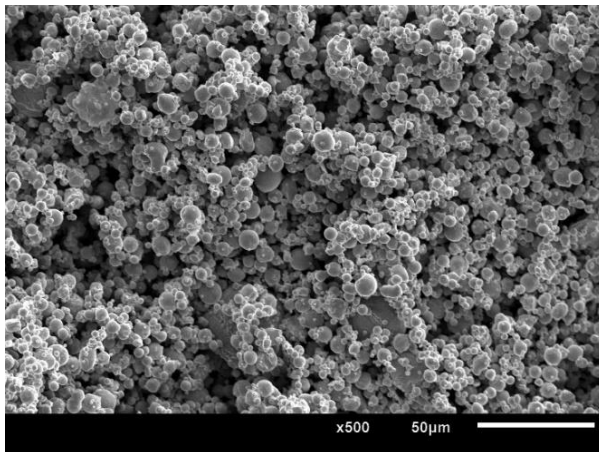
Tabelle 4: Vergleich realer und theoretischer Pulsspitzenleistungen und -intensitäten für die untersuchten Pulsformen mit sinkender Pulspause. Berechnung der realen Pulsspitzenleistungen aus den Spannungswerten der Messung des zeitlichen Pulsverlaufs bei $P_{av} = 34,7$ W.

τ_H (ns)	f_P (W)	t_{off} (μ s)	Q_P (μ J)	$P_{max,real}$ (W)	$I_{0,real}$ (MW/cm ²)	$P_{max,theo}$ (W)	$I_{0,theo}$ (MW/cm ²)
457	0,5	1,54	69,4	138,8	33,9	142,7	34,8
412	0,59	1,28	58,8	130,7	31,9	134,2	32,7
292	0,7	0,96	43,4	125,7	30,7	139,6	34,1
229	1	0,77	34,7	135,2	33,0	142,4	34,8
212	1,2	0,62	28,9	118,7	29,0	128,2	31,3
171	1,5	0,5	23,1	115,0	28,1	127,1	31,0
152	1,7	0,44	20,4	111,9	27,3	126,2	30,8
132	2	0,37	17,4	109,9	26,8	123,5	30,2

Die berechneten realen Werte liegen unterhalb der theoretischen Werte, wobei die Abweichung jedoch gering ist.

Pulvermaterial

Als Pulvermaterial wird austenitischer Edelstahl 316L der Firma Sandvik verwendet. Die Korngrößenverteilung ist laut Hersteller mit $D_{90} < 10 \mu\text{m}$ angegeben. Dieser Wert konnte mittels Laserbeugung (Partikelmessgerät Bluewave der Firma Microtrac) bestätigt werden. Die Partikel weisen eine sphärische Form auf, wodurch die Fließfähigkeit des Pulvers begünstigt wird. Die chemische Zusammensetzung des Pulvers ist in Abbildung 16 aufgeführt.



Element	Konzentration (%)	
	Angaben Hersteller	EDX-Analyse
Eisen	60 - 70	72,32
Chrom	10 - 25	14,82
Nickel	10 - 25	9,53
Molybdän	1 - 10	2,11
Mangan	1 - 10	1,22

Abbildung 16: Pulvermaterial. Links: REM-Aufnahme des verwendeten Pulvermaterials - Edelstahl 316L bei 500-facher Vergrößerung. Rechts: Chemische Zusammensetzung des Pulvers nach Angaben des Herstellers und eigens Durchgeführter EDX-Analyse.

Das Pulver, welches im Bauprozess nicht zum Aufbau des Bauteils beiträgt, und somit nach vollendetem Prozess in der Prozesskammer verbleibt, wird gesiebt und anschließend wiederverwendet. Abbildung 17 zeigt die Korngrößenverteilung für unbenutztes und 2-fach gesiebtes Pulver im Vergleich. Da das Pulver auch nach mehrfachem Sieben die gleiche Korngrößenverteilung besitzt, kann gesiebtes Pulver für weitere Bauprozesse genutzt werden, womit eine nicht zu vernachlässigende Kostenersparnis einhergeht.

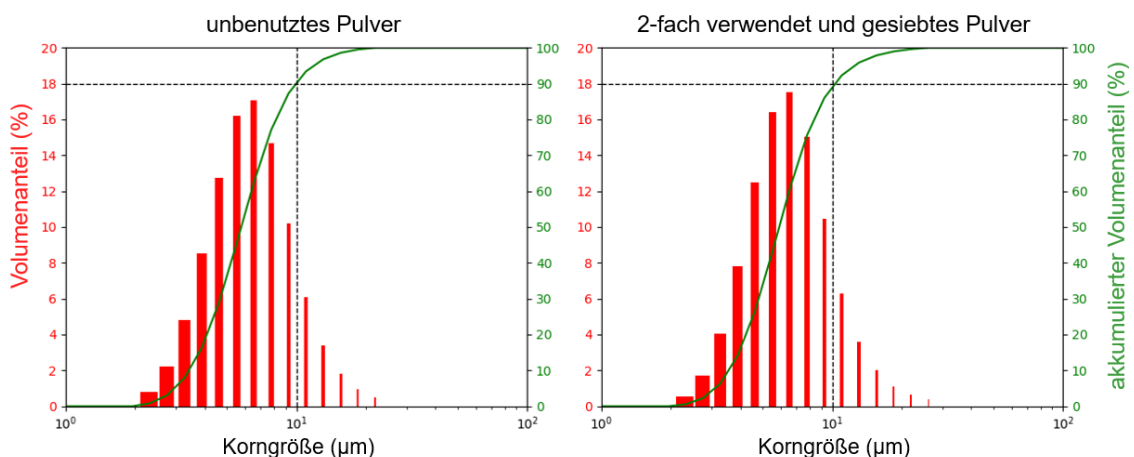


Abbildung 17: Korngrößenverteilung für unbenutztes und 2-fach gesiebtes Pulver im Vergleich. Die Messung erfolgte mittels Laserbeugung an in Wasser gelöstem Pulver.

7 Analysemethoden

Für die Auswertung der durchgeführten Versuche wurden mehrere unterschiedliche Analysemethoden genutzt.

Die optische Analyse der hergestellten Proben erfolgte zunächst mittels eines Lichtmikroskops der Firma Keyence. Ausgewählte Proben wurden zudem mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) betrachtet.

Für einige Versuche wurden Querschliffe der Proben hergestellt. Hierfür wurden die Proben in mehreren Schritten bearbeitet. Zunächst erfolgte eine Reinigung der Proben im Ultraschallbad mit Ethanol, um anhaftendes loses Pulvermaterial von den Strukturen zu lösen. Anschließend wurden die Proben mithilfe einer Trenneinrichtung der Firma Struers (Secotom-50) getrennt und in Epoxidharz eingebettet. Darauf wurde durch einen mehrmalig durchgeführten Schleif- und Polierprozess (Poliereinrichtung Tegramin-25 der Firma Struers) die Querschliffherstellung vollendet.

Für die bildanalytische Dichtemessung wurden Querschliffaufnahmen mittels eines Laserscanningmikroskops (Olympus LEXT OLS4000) angefertigt. Die Aufnahmen wurden sowohl bei 5- als auch bei 50-facher Vergrößerung gemacht. Das verwendete Mikroskop bietet dabei die Möglichkeit größere Probenausschnitte durch Bildzusammensetzung (Stitching) zu erfassen. Die relative Bauteildichte wurde aus den Querschliffaufnahmen mithilfe des Bildverarbeitungsprogrammes ImageJ bestimmt. Das Programm gibt in einem festgelegten Messbereich den prozentualen Anteil markierter Pixel bezogen auf die Gesamtfläche des Messbereichs an. Ein Schwellwert bestimmt den Anteil markierter Pixel. Dieser wurde so angepasst, dass bestehende Poren gut zu erkennen sind. Um Messfehler gering zu halten, erfolgte die Dichtemessung jeweils an mindestens drei Querschliffaufnahmen des gleichen Parameters.

Als weitere Methode zur Dichtebestimmung wurden archimedische Messungen durchgeführt. Hierfür kam eine Analysenwaage der Firma Mettler-Toledo zum Einsatz. Je Probenkörper wurden mindestens fünf Messungen durchgeführt, aus denen im Anschluss gemittelt wurde. Der Referenzwert zur Berechnung der relativen Bauteildichte wurde aus der Stoffzusammensetzung des Pulvers ermittelt.

8 Einzelspuruntersuchungen

8.1 Versuchsdurchführung

Um den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Ausbildung einzelner Schmelzspuren zu untersuchen, wurden zunächst Einzelspuruntersuchungen durchgeführt. Hierfür wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Betrachtungsschwerpunkten angesetzt.

1. Einfluss verringerter Pulspausen als Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung bei variierender Streckenenergie
2. Einfluss von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Bestrahlungsregimen

In den ersten Untersuchungen sollte ein erster Vergleich der Schmelzspuren verschiedener Bestrahlungsregime mit Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung durch sinkende Pulspausen erfolgen. Hierfür wurden, neben der kontinuierlichen Bestrahlung, acht Kombinationen von Pulslängen und Pulswiederhol frequenzen mit abnehmender Pulspause für die Erzeugung von Einzelspuren verwendet. Scangeschwindigkeit und Schichtdicke blieben zunächst konstant. Variiert wurde lediglich die mittlere Laserleistung. Pro Parametersatz wurden jeweils drei Einzelspuren mit einer Länge von 3 mm erzeugt. Der Abstand zwischen den Scanvektoren wurde mit 100 μm so groß gewählt, dass sich benachbarte Spuren nicht gegenseitig beeinflussten. Um neben der Betrachtung der Einzelspuren auch eine Aussage über den Aufbau von Strukturen treffen zu können, erfolgte der Versuch jeweils für die Bestrahlung einer Schicht und 10 Schichten. Für die kontinuierliche Bestrahlung wurde der Versuch für den späteren Vergleich der Bestrahlungsregime analog durchgeführt. Alle Versuche fanden unter Argon-Schutzgasatmosphäre statt. In Tabelle 5 sind die konstanten und variierten Prozessparameter für die erste Versuchsreihe aufgeführt.

Tabelle 5: Konstante und variierte Prozessparameter für die Einzelspuruntersuchungen zur Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung.

Konstante Parameter	Scangeschwindigkeit (m/s)		2,8		
	Schichtdicke (μm)		4		
	Hatch (μm)		100		
Varierte Parameter	Pulsdauer (ns)	Frequenz (MHz)	toff (μs)	Pav (W)	Streckenergie (J/cm)
	457	0,5	1,54		
	412	0,59	1,28		
	292	0,7	0,96		
	229	1	0,77		
	212	1,2	0,62		
	171	1,5	0,5		
	152	1,7	0,44		
	132	2	0,37		
cw				18,2 - 91	0,065 - 0,325

In der zweiten Versuchsreihe wurde anschließend die Wirkung verschiedener Streckenergien genauer betrachtet. In Abgrenzung zur ersten Versuchsreihe wurden nun sowohl Laserleistung als auch Scangeschwindigkeit variiert, um den Einfluss beider Parameter genauer beurteilen zu können. Für die Erzeugung der Schmelzspuren wurden vier der zuvor genutzten gepulsten Bestrahlungsregime und die cw-Bestrahlung genutzt. Die mittleren Laserleistungen wurden von 20 - 70 W in 10 W-Schritten und die Scangeschwindigkeiten von 1 - 4 m/s in 0,5 m/s-Schritten variiert. Da aus der ersten Versuchsreihe bereits eine Abschätzung geeigneter Streckenergien möglich war, wurden hohe mittleren Leistungen lediglich mit höheren Scangeschwindigkeiten kombiniert, um einen unnötig großen Energieeintrag bei großen Streckenergien zu vermeiden. Die Einzelspuren wurden analog der vorhergehenden Versuchsreihe mit einer Linienlänge von 3 mm und 100 μm Hatch erzeugt. Der Aufbau erfolgte zudem wiederum für 1 Schicht und 10 Schichten.

In Tabelle 6 sind die konstanten und variierten Prozessparameter aufgeführt.

Tabelle 6: Konstante und variierte Prozessparameter für die Einzelspuruntersuchungen zum Einfluss von mittlerer Laserleistung P_{av} und Scangeschwindigkeit v_s .

Konstante Parameter	Schichtdicke (μm)		4						
	Hatch (μm)		100						
Varierte Parameter	τ_H (ns)	f_P (MHz)	Pav (W)					Scangeschwindigkeit (m/s)	
			20	30	40	50	60		70
	457	0,5	1 - 4			2,5 - 4	3 - 4		3,5 - 4
	229	1				2,5 - 4	3 - 4		3,5 - 4
	171	1,5				1 - 4	2 - 4		2,5 - 4
	132	2				1 - 4	1 - 4		2,5 - 4
cw		1 - 4				1 - 4	1 - 4		

Bei beiden Versuchsreihen wurde die gleiche Vorgehensweise in der Probenherstellung genutzt. Zu Beginn eines jeden Versuchs wurde die Höhe des Substrats händisch eingestellt, bis ein gleichmäßiges Gleiten der Raketklinge ohne Anstoßen möglich war. Daraufhin wurde das Substrat angeraut. Dies ist notwendig, um ein Abscheren einer homogenen Pulverschicht auf dem Substrat zu ermöglichen. Anschließend wurde das Substrat um die gewünschte Schichtdicke von 4 μm abgesenkt. Es folgte der Pulveraufzug und die Bestrahlung der aufgetragenen Pulverschicht entsprechend der in den Tabellen 5 und 6 gegebenen Parameter. Es ist anzumerken, dass durch das händische Einstellen der Substrathöhe zu Beginn der Versuche die Pulverschichtdicke auf dem Substrat nicht bekannt ist. Hierdurch kann es zu Abweichungen der Ergebnisse bei Bestrahlung lediglich einer Pulverschicht kommen. Da diese Problematik bekannt war, erfolgte die Bestrahlung, wie oben beschrieben, zusätzlich für 10 Schichten. Hierbei kann sich der Prozess über die größere Schichtanzahl entsprechend einstellen und es können reproduzierbare Aussagen getroffen werden.

8.2 Ergebnisse und Diskussion

8.2.1 Einfluss verringerter Pulspausen als Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung bei variierender Streckenenergie

Die erzeugten Einzelspuren weisen unterschiedliche Erscheinungsbilder in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung auf. Dies ermöglicht die Einteilung der Schmelzspuren in fünf Kategorien. Abbildung 18 zeigt die Charakterisierung der Spuren für die Bestrahlung einer einzelnen Schicht mit jeweils einem Beispiel.

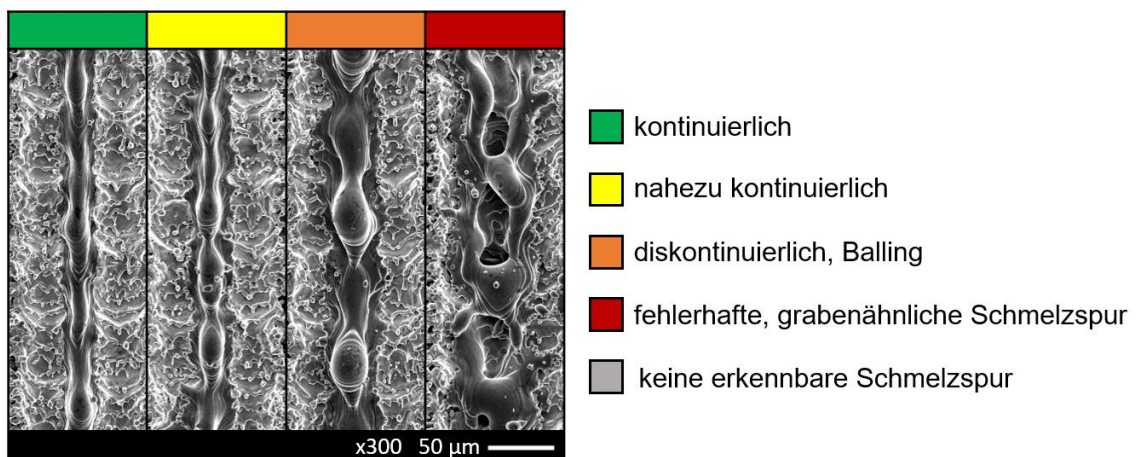


Abbildung 18: Einteilung der Einzelspuren in vier Kategorien für die Bestrahlung einer einzelnen Pulverschicht.

Die Bestrahlung einer größeren Schichtanzahl, hier 10 Schichten, sollte zeigen inwiefern die zuvor bei einer Schicht beobachteten Schmelzspuren zum Aufbau von Strukturen geeignet sind. Die erzeugten Strukturen wurden ebenfalls in Kategorien eingeteilt. Hierbei erfolgte die Einteilung in fehlerfrei aufgebaute Strukturen (grün), fehlerhafte Strukturen (gelb),

sowie Strukturfragmente und unterbrochene Strukturen (orange). Parameterkombinationen, bei welchen kein Strukturaufbau möglich war, wurden rot markiert.

In Abbildung 19 ist die entsprechende Einteilung in die beschriebenen Kategorien in Abhängigkeit der Streckenenergie für die Erzeugung von Einzelspuren bei Bestrahlung einer Schicht und für den Strukturaufbau über 10 Schichten gegeben.

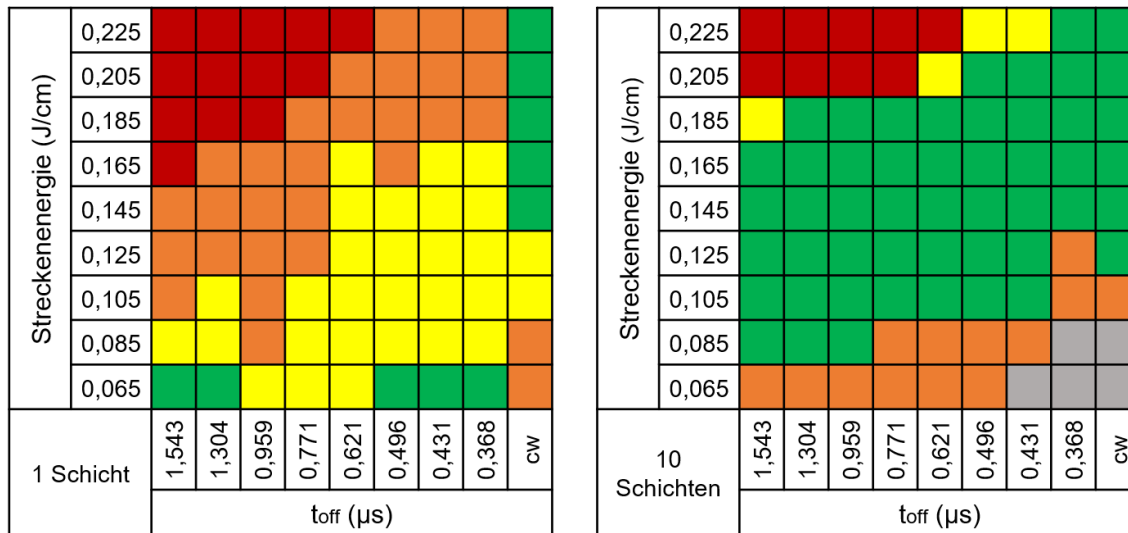


Abbildung 19: Charakterisierung der erzeugten Einzelspuren mit Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung durch verringerte Pulspausen in Abhängigkeit der Streckenenergie. Links: Bestrahlung von einer Schicht, Einteilung entsprechend Abbildung 18. Rechts: Bestrahlung von 10 Schichten, Einteilung nach fehlerfrei aufgebauten Strukturen (grün), fehlerhafte Strukturen (gelb), Strukturfragmente und unterbrochene Strukturen (orange), kein Strukturaufbau (rot).

Im Folgenden sollen zunächst die erzeugten Schmelzspuren bei Bestrahlung einer einzelnen Pulverschicht betrachtet werden. Die Differenzen zur Bestrahlung von 10 Schichten werden an späterer Stelle diskutiert.

Für alle untersuchten gepulsten Bestrahlungsregime wurde ein ähnliches Verhalten in Abhängigkeit der Streckenenergie beobachtet. Kontinuierliche Einzelspuren wurden mit gepulster Bestrahlung lediglich bei der geringsten untersuchten Streckenenergie von 0,065 J/cm beobachtet. Mit wachsender Streckenenergie werden die Schmelzspuren zunehmend diskontinuierlich und unregelmäßig. Im Bereich hoher Streckenenergien sind insbesondere bei den Bestrahlungsregimen mit geringerer Pulswiederholfrequenz und größeren Pulsenergien grabenähnliche Schmelzspuren zu erkennen.

Abbildung 19 zeigt, dass im untersuchten Parameterbereich lediglich eine obere Grenze für die mittlere Laserleistung für die Bestrahlungsregime mit Pulspausen $\geq 0,621 \mu s$ beobachtet werden konnte. Für die Bestrahlung mit geringeren Pulspausen ist die Verwendung höherer Streckenenergien denkbar. Eine untere Leistungsgrenze wurde im Bereich der genutzten Prozessparameter für keine der gepulsten Bestrahlungsregime erreicht. Die geringste untersuchte Streckenenergie von 0,065 J/cm reicht unter den gegebenen Prozessbedingungen ($v_s = 2,8 \text{ m/s}$; $l_z \sim 4 \mu m$) bei allen gepulsten Bestrahlungen aus, um ein

ausreichend großes Schmelzbad für die Einzelspurbildung zu generieren. Die bei geringen Streckenenergien erzeugten Schmelzbäder besitzen bereits eine ausreichend langanhaltende schmelzflüssige Phase und Beweglichkeit, um sich vor dem Erstarren zu einer kontinuierlichen Schmelzspur auszubreiten. Es ist zu erwarten, dass auch bei noch geringeren Streckenenergien Schmelzspuren erzeugt werden können. Eine weitere Verringerung der Streckenenergie durch Reduzieren der mittleren Laserleistung war an der genutzten Forschungsanlage nicht umsetzbar, da bei geringeren mittleren Leistungen ($< 20 \text{ W}$) keine Leistungsstabilität vorlag. Ein Verringern der Streckenenergie durch Nutzung höherer Scangeschwindigkeiten wurde in den nachfolgenden Versuchen (Kapitel 8.2.2) betrachtet.

Die mit gepulster Strahlung erzeugten Schmelzspuren zeigen, dass mit größerer Streckenenergie ein zunehmend instabiles Schmelzbad einhergeht. Mit wachsendem Energieeintrag steigt die Temperatur der Schmelze, wodurch es zum Sieden und Aufspritzen dieser kommen kann. Steigende Temperaturgradienten zwischen Oberfläche des Schmelzbades und dessen Zentrum bewirken starke Marangoni-Konvektionen. Daraus resultierende Turbulenzen fördern die Instabilität des Schmelzbades mit steigender Streckenenergie.

Steigt der Energieeintrag, so wird außerdem ein immer größerer Anteil des Pulvermaterials verdampft. Der Rückstoßdruck auf die Schmelze, infolge des expandierenden Metaldampfes, nimmt zu, wodurch Schmelze über die Nullebene hinausgedrückt werden kann, und die Bildung gleichmäßiger Schmelzspuren verhindert wird.

Zwischen den untersuchten gepulsten Bestrahlungsregimen sind deutliche Differenzen in den nutzbaren Streckenenergien zu erkennen. Insbesondere bei hohen Streckenenergien zeigt sich der Einfluss der verschiedenen Bestrahlungsregime.

Bei Bestrahlung mit geringeren Pulsenergien, d.h. bei geringeren Pulspausen und höheren Pulswiederhol frequenzen, können höhere Streckenenergien appliziert werden, ohne dass es, wie bei Bestrahlung mit hohen Pulsenergien (Beispiel: Pulsregime mit $t_{\text{off}} = 1,54 \mu\text{s}$; $f_{\text{P}} = 0,5 \text{ MHz}$) bereits ab $0,165 \text{ J/cm}$ zu einem übermäßig großen Energieeintrag kommt, wodurch das Schmelzbad instabil wird und der Anteil des verdampften Pulvermaterials zunimmt. Durch Erhöhen der Pulswiederhol frequenz von $0,5 \text{ MHz}$ auf 1 MHz bzw. 2 MHz wird die Pulsenergie auf die Hälfte bzw. ein Viertel reduziert. Die wesentlich geringeren Pulsenergien lassen höhere mittlere Leistungen zu bis der Grenzwert für die Erzeugung von Schmelzspuren überschritten wird.

Ein Vergleich der beiden Bestrahlungsregime mit der längsten und kürzesten Pulspause ist in Abbildung 20 zu sehen.

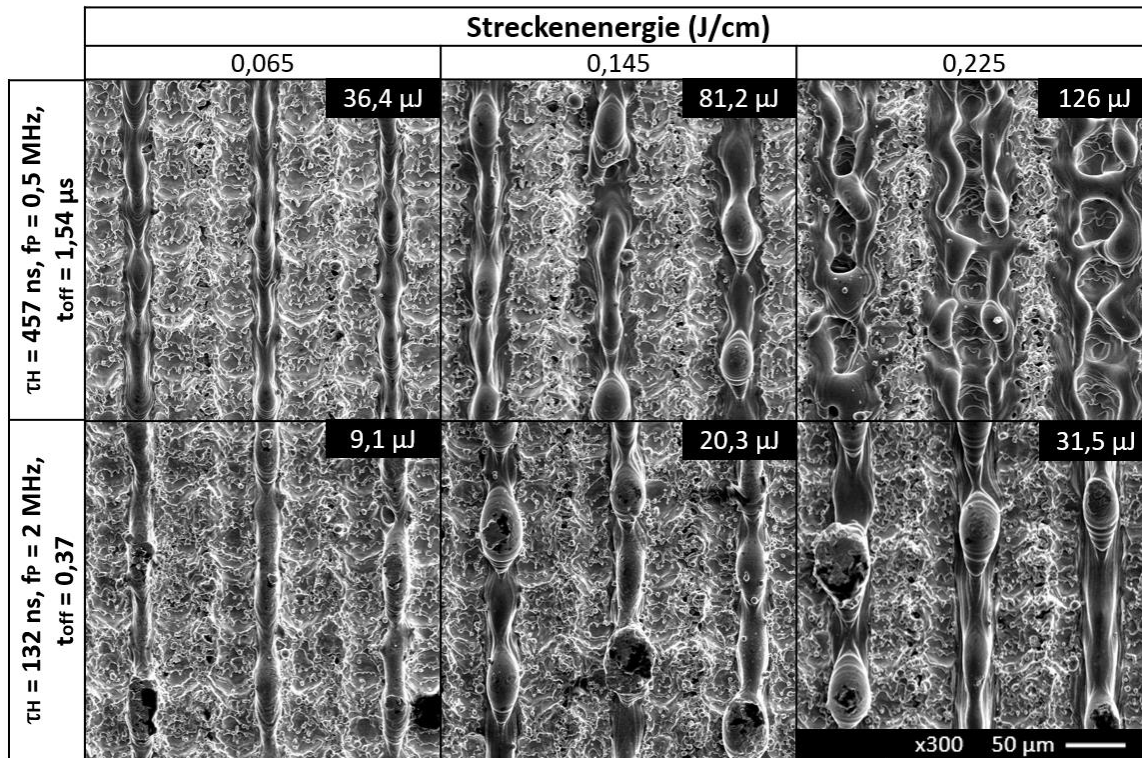


Abbildung 20: Vergleich von Schmelzspuren erzeugt mit gepulsten Bestrahlungsregimen mit unterschiedlichen Pulspausen bei variierender Streckenenergie. Zusätzlich ist die jeweilige Pulsenergie oben rechts angegeben. ($v_s = 2,8 \text{ m/s}$)

Bereits bei geringen Streckenenergien ist ein unterschiedliches Verhalten in der Ausbildung der Schmelzspuren zu erkennen. Bei kürzerer Pulspause zeigt die Schmelzspur deutlicher die Form eines Halbzylinders (Abbildung 20, unten). Bei längerer Pulspause dagegen erscheint die Schmelzspur an der Verbindungsstelle zum Substrat breit gedrückt. Die deutlich höheren Pulsenergien bewirken auch bei geringer Streckenenergie ein Verdampfen von Pulvermaterial, wodurch ein Druck auf das Schmelzbad ausgeübt wird. Bei kurzer Pulspause und den geringen Pulsenergien ist dieser Effekt weniger stark, wodurch sich die halbzylindrische Form bilden kann.

Bei der hohen Streckenenergie von 0,255 J/cm ist der Einfluss der deutlich höheren Pulsenergie bei geringerer Frequenz von 0,5 MHz zu erkennen. Das gebildete Schmelzbad ist durch eine starke Marangoni-Konvektion und Einwirkung des Rückstoßdruckes dermaßen instabil, dass grabenähnliche Schmelzspuren entstehen. Bei höherer Frequenz und geringerer Pulsenergie ist auch bei hoher Streckenenergie eine halbzylindrische Schmelzspur zu erkennen, wenn auch mit deutlichem Balling.

Die REM-Aufnahmen zeigen deutlich, dass trotz wesentlich geringerer Pulsenergien bei hoher Pulswiederholrate dennoch Schmelzspuren erzeugt werden können. Dies ist auf den Einfluss des größeren Pulsüberlapps zurückzuführen. Je größer der Pulsüberlapp, desto mehr Pulse treffen bei Ablenkung des Laserstrahls mit konstanter Scangeschwindigkeit auf einen Punkt im Pulverbett. Mit jedem Puls steigt die Wärmeakkumulation im

Material, wodurch ein Aufschmelzen des Pulvermaterials auch bei deutlich geringeren Pulsenergien ermöglicht wird.

Im Vergleich zur gepulsten Bestrahlung wurde mit kontinuierlicher Strahlung ein gegensätzliches Verhalten in Abhängigkeit der Streckenenergie beobachtet (Abbildung 21).

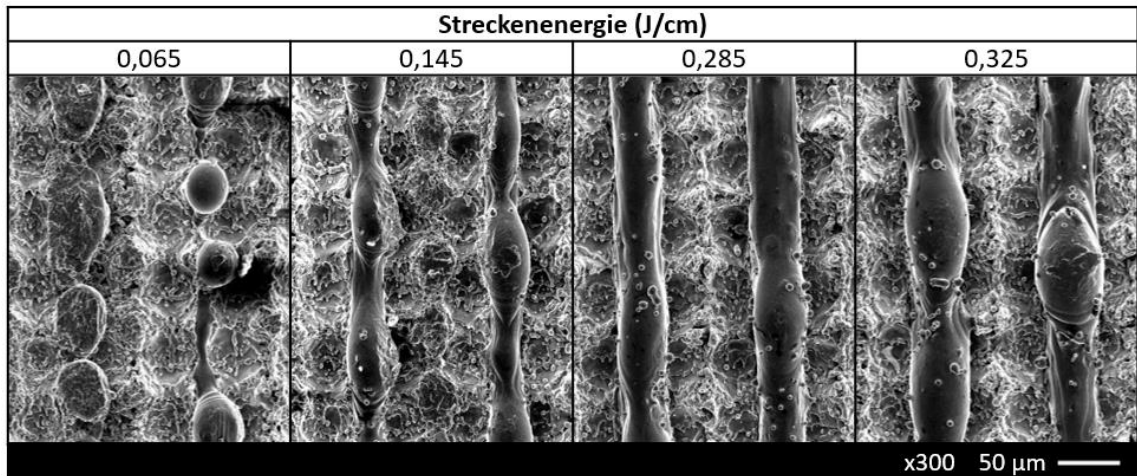


Abbildung 21: Schmelzspuren erzeugt mit kontinuierlicher Bestrahlung bei variierender Streckenenergie ($v_s = 2,8$ m/s). Im linken Bild ist die linke Schmelzspur durch Rakeleinwirkung verändert.

Mit steigender Streckenenergie sind die erzeugten Schmelzspuren zunehmend kontinuierlich. Für geringe Streckenenergien $< 0,145$ J/cm wurden lediglich diskontinuierliche Schmelzspuren beobachtet. Bei der gegebenen mittleren Laserleistung und Scangeschwindigkeit ist die Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Material nicht ausreichend, um ein genügend großes Schmelzbad zu erzeugen. Die Schmelze besitzt eine vergleichsweise geringe Temperatur, womit eine hohe Viskosität und Oberflächenspannung einhergehen. Dies führt zum Zerfall der Schmelze in einzelne Schmelztropfen (Balling).

Mit steigender Streckenenergie, d.h. in diesem Fall mit steigender mittlerer Laserleistung, wird ein größeres Schmelzbadvolumen erzeugt. Außerdem steigt die Temperatur der Schmelze, womit Viskosität und Oberflächenspannung sinken. Das Auftreten von Balling wird damit eingeschränkt und kontinuierliche Schmelzspuren können sich bilden.

Ab einer Streckenenergie von $0,145$ J/cm sind die erzeugten Schmelzspuren bereits kontinuierlich, jedoch noch recht unregelmäßig und wellig. Entlang der Schmelzspur sind häufig Einschnürungen zu erkennen. Mit zunehmender Streckenenergie werden die Schmelzspuren regelmäßiger. Bei einer Streckenenergie von $0,285$ J/cm sind die erzeugten Schmelzspuren schließlich sehr gleichmäßig und glatt. Es ist davon auszugehen, dass unter diesen Bedingungen ein stabiles Schmelzbad entsteht. Mit steigender Streckenenergie nimmt die Schmelzspurbreite zu. Damit sinkt das Länge-zu-Breite-Verhältnis des Schmelzbades und die Bedingung für die Rayleigh-Instabilität ist nicht länger gegeben.

Bis zur maximal untersuchten Streckenenergie von 0,325 J/cm wurde kein vergleichbares Verhalten zu den hohen Streckenenergien bei gepulster Bestrahlung festgestellt. Die erzeugten Schmelzspuren sind kontinuierlich und glatt und weisen kein Balling auf. Lediglich bei maximaler Streckenenergie treten erneut geringe Einschnürungen der Schmelzspuren auf.

Eine obere Leistungsgrenze für den Energieeintrag wurde nicht erreicht. Folglich ist davon auszugehen, dass bei gegebener Scangeschwindigkeit ($v_s = 2,8$ m/s) noch höhere mittlere Laserleistungen zu Generierung kontinuierlicher Schmelzspuren genutzt werden können. Eine Untersuchung höherer mittlerer Laserleistungen war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da der Leistungsbereich durch die maximal zur Verfügung stehende mittlere Laserleistung von 93 W begrenzt ist. Die maximal untersuchte Streckenenergie von 0,325 J/cm entspricht bereits einer mittleren Leistung von 91 W. Ein Erhöhen der Streckenenergie durch geringere Scangeschwindigkeiten ist Teil der folgenden Untersuchungen (Kapitel 8.2.2).

Die bei kontinuierlicher Bestrahlung beobachteten Schmelzspuren stimmen mit den Ergebnissen in der Literatur überein. Fischer et al. bestimmten geeignete Streckenenergien von 0,1 J/cm bis 0,6 J/cm für die Erzeugung kontinuierlicher Schmelzspuren bei einer Schichtdicke von 7 μm [4]. Mit geringerer Streckenenergie wurden zunehmende Defekte beobachtet. Das gleiche Verhalten konnte hier, bei ähnlichen Streckenenergien, festgestellt werden.

Die Schmelzspuren zeigen einen deutlichen Unterschied bei der Verwendung gepulster und kontinuierlicher Strahlung. Ein Vergleich von Schmelzspuren bei gleichen Streckenenergien für beide Bestrahlungsregime ist in Abbildung 22 zu sehen.

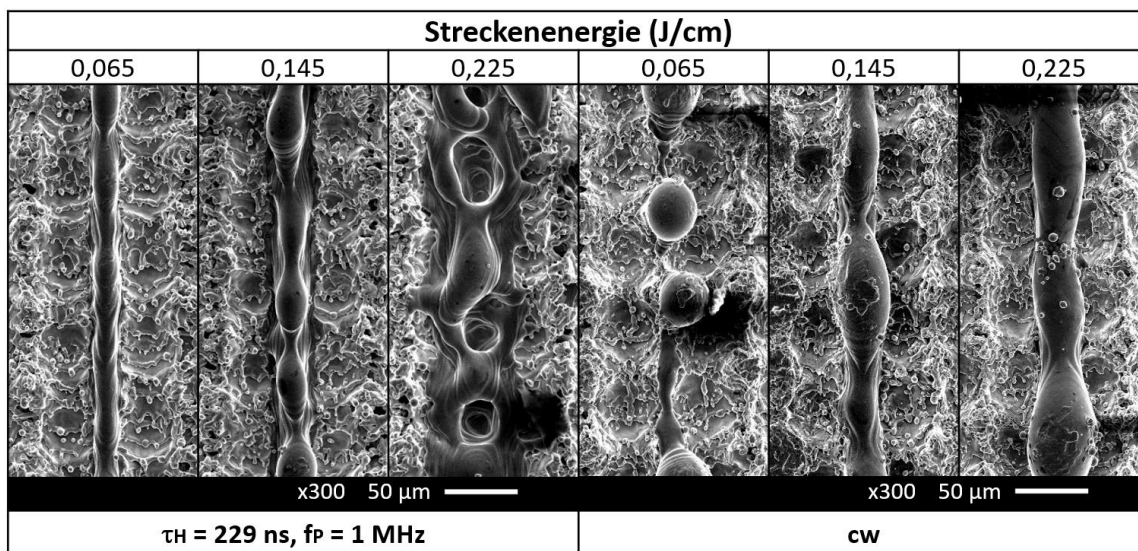


Abbildung 22: REM-Aufnahmen von Einzelspuren bei variierender Streckenenergie. Vergleich zwischen gepulster ($\tau_H = 229$ ns, $f_P = 0,5$ MHz) und kontinuierlicher Bestrahlung ($v_s = 2,8$ m/s).

Besonders markant ist das gegensätzliche Verhalten bei steigender Streckenergie für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung. So können für die verschiedenen Bestrahlungsregime zunächst folgende Aussagen getroffen werden.

- gepulste Bestrahlung: die Stabilität des Schmelzbades nimmt mit steigender Streckenenergie ab
- kontinuierliche Bestrahlung: die Stabilität des Schmelzbades nimmt mit steigender Streckenenergie zu

Unter Verwendung der cw-Bestrahlung lassen sich in einem großen Parameterbereich kontinuierliche Schmelzspuren erzeugen. Mit gepulster Strahlung konnten kontinuierliche Schmelzspuren dagegen nur in einem sehr kleinen Parameterfenster beobachtet werden.

Bei der kleinsten untersuchten Streckenenergie von 0,065 J/cm entstanden nur unter Verwendung gepulster Strahlung kontinuierliche Schmelzspuren. Die geringe Breite der Schmelzspuren zeugt von einem lediglich geringem Schmelzbadvolumen. Ein schmales Schmelzbad ist wiederum anfälliger für den Balling-Effekt, welcher hier jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Morphologie der Spur zeigt. Bei der gepulsten Bestrahlung ist auch bei geringen mittleren Leistungen die Pulsspitzenintensität so hoch, dass ein gewisser Anteil des Pulvermaterials verdampft wird. Der daraus resultierende Rückstoßdruck auf die Schmelze ermöglicht trotz geringer Schmelzbadgröße eine ausreichende Benetzung des Substrates und die Entstehung einer kontinuierlichen Schmelzspur.

Bei Nutzung der cw-Strahlung entfällt dieser Effekt bei geringen Streckenenergien und es tritt starkes Balling auf. Durch den geringen Energieeintrag besitzt die Schmelze eine vergleichsweise niedrige Temperatur, womit eine höhere Viskosität und Oberflächenspannung einhergehen. Zusammen mit dem geringen Schmelzbadvolumen führt dies zum Zerfall der Schmelzspur in einzelne Schmelztropfen. Mit steigender Streckenenergie wird mehr Pulvermaterial aufgeschmolzen, sodass die Bedingungen für die Rayleigh-Instabilität mit wachsender Schmelzbadbreite nicht mehr erfüllt sind und gleichmäßige, kontinuierliche Schmelzspuren entstehen können.

Bei gepulster Bestrahlung nimmt dagegen mit steigender Streckenenergie die Tendenz zum Balling zu. Grund hierfür ist das zunehmend instabile Schmelzbad, aufgrund hoher wirkender Intensitäten und damit verbundenen hohen Temperaturgradienten im Schmelzbad.

Als wesentlicher Grund für das unterschiedliche Verhalten der gepulsten und kontinuierlichen Bestrahlung, insbesondere bei hohen Streckenenergien, kann die unterschiedlich hohe Intensität der Bestrahlungsregime genannt werden. Bei gleicher mittlerer Laserleistung wirken im Falle der gepulsten Bestrahlung aufgrund der hohen Pulsspitzenintensitäten etwa 8-fach höhere Intensitäten als bei kontinuierlicher Bestrahlung. Damit wird ein deutlich größerer Anteil an Material verdampft und es entstehen größere Temperaturgradienten im Schmelzbad, womit ein instabiles Schmelzbad bereits bei geringeren Streckenenergien besteht.

Bestrahlung von 10 Schichten

Im Folgenden soll der Aufbau von Strukturen durch Bestrahlung von 10 Schichten betrachtet werden (Vgl. Abbildung 19, rechts).

Mit einer Streckenenergie von 0,065 J/cm konnten keinerlei Strukturen aufgebaut werden. Dies zeigt, dass eine zuvor beobachtete kontinuierliche Einzelspur kein Garant für einen möglichen Strukturaufbau ist. Als wesentlicher Prozessparameter ist hier die Schichtdicke zu betrachten.

Im Falle der Einzelspuruntersuchungen mit Bestrahlung von lediglich einer Schicht kann die reale Schichtdicke von der gewünschten Schichtdicke, hier 4 μm abweichen. Wie bereits in der Versuchsdurchführung erklärt, wird die Höhe des Substrates zu Beginn händisch eingestellt, wodurch Abweichungen der Schichtdicke nicht vermieden werden können. Im laufenden Prozess erfolgt die Zustellung der Substratachse mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$, womit sich eine Schichtdicke ohne große Schwankungen einstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schichtdicke von 4 μm für die geringe Streckenenergie von 0,065 J/cm zu groß gewählt ist. Die Pulverschicht kann nicht vollständig durchschmolzen werden, wodurch keine ausreichende Anbindung an die unterliegende Schicht möglich ist. Mit steigender Streckenenergie steigt die Eindringtiefe und die Pulverschicht kann vollständig durchschmolzen werden. Über einen großen Parameterbereich konnten somit fehlerfreie Strukturen aufgebaut werden. Daraus lässt sich ableiten, dass eine kontinuierliche Schmelzspur keine Voraussetzung für den fehlerfreien Aufbau von Strukturen darstellt. Auch die diskontinuierlichen Spuren bei gepulster Strahlung und mittleren Streckenenergien eignen sich für den Aufbau. Bei Bestrahlung der nächsten Schicht wird die unterliegende Schmelzspur zum Teil erneut aufgeschmolzen und die zuvor ungleichmäßigen Spuren können sich glätten.

Grundlegend zeigt sich beim Aufbau von Strukturen das gleiche Verhalten wie zuvor bei Bestrahlung einer einzelnen Pulverschicht. Mit sinkender Pulspause und damit sinkender Pulsenergie sind höhere Streckenenergien für den Strukturaufbau notwendig.

Im Bereich hoher Streckenenergien ab 0,205 J/cm konnten bei den Bestrahlungsregimen mit längerer Pulspause keine Strukturen erzeugt werden. Die oberen Leistungsgrenzen, welche zuvor bei den Einzelspuren bei einer bestrahlten Schicht beobachtet wurden, können in etwa auf den Strukturaufbau übertragen werden. Teilweise konnten jedoch auch Strukturen mit hohen Streckenenergien aufgebaut werden, welche zuvor sehr unregelmäßige, grabenähnliche Schmelzspuren erzeugten. Es ist davon auszugehen, dass durch die hohen wirkenden Intensitäten die unteren, bereits verfestigten Schmelzspuren beim Bestrahlen der neuen Schicht erneut aufgeschmolzen und dadurch geglättet wurden, wodurch der Strukturaufbau ermöglicht wurde.

Strukturen, welche mit Streckenenergien knapp unterhalb des oberen Grenzwertes erzeugt wurden, wiesen teils eine deutlich geringere Höhe auf. Der Energieeintrag war bereits so

groß, dass eine große Menge an Pulvermaterial verdampft wurde, wodurch weniger Material für die Strukturbildung zur Verfügung stand. Mit noch größeren Streckenenergien steigt die Instabilität des Schmelzbades und die Menge an verdampften Pulver bis zu dem Punkt, an dem keine Spurbildung und folglich kein Aufbau von Strukturen möglich ist.

Mit kontinuierlicher Bestrahlung konnten ab einer Streckenenergie von 0,125 J/cm fehlerfreie Strukturen aufgebaut werden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen bei der Bestrahlung einer Schicht. Die Streckenenergien, welche zuvor kontinuierliche Einzelspuren erzeugten, sind ebenso für den Aufbau von Strukturen über mehrere Schichten geeignet. Für Streckenenergien $< 0,105$ J/cm ist bei gegebener Schichtdicke der Energieeintrag zu gering, sodass keine Anbindung an die unterliegende Schicht möglich ist.

Bei der Bestrahlung mehrerer Schichten ist der Einfluss der Annäherung der gepulsten Bestrahlung an die kontinuierliche Bestrahlung deutlicher zu erkennen. Mit sinkender Pulspause nähern sich die geeigneten Prozessparameter zur Erzeugung von Strukturen immer weiter denen der cw-Bestrahlung an. Für die kürzeste untersuchte Pulspause von 0,37 μ s ($\tau_H = 132$ ns; $f_P = 2$ MHz) wurde ein beinahe identisches Verhalten wie für die cw-Bestrahlung beobachtet.

8.2.2 Einfluss von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Bestrahlungsregimen

In der folgenden Versuchsreihe wurde der Einfluss verschiedener mittlerer Laserleistungen und Scangeschwindigkeiten thematisiert. Zuvor wurde die Streckenenergie lediglich durch eine Leistungsänderung variiert und der Einfluss verschiedener Bestrahlungsregime mit sinkender Pulspause stand im Fokus. Nun erfolgte zusätzlich die Betrachtung variierender Scangeschwindigkeiten.

Analog zu den vorhergehenden Untersuchungen wurden die mit unterschiedlichen Bestrahlungsregimen erzeugten Schmelzspuren in Kategorien eingeteilt (Abbildung 23).

P _{av} (W)	70					0,2	0,18	
	60					0,2	0,17	0,15
	50				0,2	0,17	0,14	0,13
	40			0,2	0,16	0,13	0,11	0,1
	30		0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05
τ _H = 457 ns, f _P = 0,5 MHz, t _{off} = 1,54 μs		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		v _s (m/s)						

P _{av} (W)	70			0,35	0,28	0,23	0,2	0,18
	60			0,3	0,24	0,2	0,17	0,15
	50		0,33	0,25	0,2	0,17	0,14	0,13
	40		0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,1
	30	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05
τ _H = 132 ns, f _P = 2 MHz, t _{off} = 0,37 μs		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		v _s (m/s)						

P _{av} (W)	70	0,6	0,47	0,35	0,28	0,23	0,2	0,18
	60	0,6	0,4	0,3	0,24	0,2	0,17	0,15
	50	0,5	0,33	0,25	0,2	0,17	0,14	0,13
	40	0,4	0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,1
	30	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05
cw		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		v _s (m/s)						

Abbildung 23: Charakterisierung der Schmelzspuren in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit für drei verschiedene Bestrahlungsregime mit Angabe der entsprechenden Streckenenergien (in J/cm). Bestrahlung einer einzelnen Pulverschicht.

Zwischen den Bestrahlungsregimen sind wiederum deutliche Differenzen zu erkennen. Mit gepulster Bestrahlung konnten kontinuierliche Schmelzspuren nur bei dem Regime mit höchster Pulsenergie beobachtet werden.

Im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen ist ebenfalls ein wesentlicher Unterschied zu sehen. Zuvor wurden bei einer Streckenenergie von 0,065 J/cm bei nahezu allen gepulsten Regimen kontinuierliche Spuren erzeugt. Bei ähnlich großer Streckenenergie von 0,06 J/cm entstanden hier keine kontinuierlichen Spuren. Diese Problematik kann wiederum auf eine inhomogene Schichtdicke zu Versuchsbeginn zurückgeführt werden.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit war die reale Schichtdicke hier zu Beginn größer als in den vorangegangenen Einzelspuruntersuchungen, wodurch geringe Streckenenergien nicht weiter ausreichten, um genügend Pulvermaterial aufzuschmelzen und eine Anbindung zum Substrat herzustellen.

Insgesamt lässt sich jedoch ein gleiches Verhalten wie zuvor beobachten. Mit sinkender Pulsenergie sind höhere Streckenenergien, d.h. in diesem Falle geringere Scangeschwindigkeiten oder höhere mittlere Leistungen zur Spurerzeugung notwendig. Anders als bei der ersten Versuchsreihe wurde nun auch für die gepulste Bestrahlung eine untere nutzbare Leistungsgrenze erreicht.

Bei einer geringen mittleren Leistung von 20 W konnten nur bei geringer Pulswiederholfrequenz und entsprechend hohen Pulsenergien Schmelzspuren erzeugt werden. Für geringere Pulsenergien ist die eingebrachte Energie zu klein um ausreichend Pulvermaterial aufzuschmelzen. Außerdem ist davon auszugehen, dass mit längerer Pulsdauer die Eindringtiefe in das Material zunimmt. Hierfür wird die thermische Diffusionslänge δ_{th} , berechnet mit der Wärmeleitfähigkeit des Materials κ , herangezogen.

$$\delta_{th} = 2 \cdot \sqrt{\kappa \cdot \tau_H} \quad (8.1)$$

Die größere thermische Diffusionslänge bei dem Bestrahlungsregime mit längster Pulsdauer von 457 ns ermöglicht einen größeren Wärmetransport in die Tiefe und damit auch bei geringer Streckenenergie die Erzeugung einer ausreichenden Anbindung an das Substrat.

Für alle gepulsten Bestrahlungsregime gilt, dass mit steigender Scangeschwindigkeit höhere mittlere Laserleistungen für die Schmelzspurerzeugung notwendig sind. Mit höherer Scangeschwindigkeit besteht ein größerer räumlicher Pulsabstand und damit ein geringerer Pulsüberlapp. Weniger Pulse treffen auf einen Punkt im Pulverbett, womit eine geringere Wärmeakkumulation einhergeht. Um dies auszugleichen und genügend Energie zum Aufschmelzen des Pulvers einzubringen sind höhere Leistungen erforderlich.

Die erzeugten Schmelzspuren zeigen auch, dass bei gleicher Streckenenergie nicht von einem ebenso gleichen Bearbeitungsergebnis ausgegangen werden kann. Abbildung 24 zeigt hierfür lichtmikroskopische Aufnahmen von Schmelzspuren dreier Parametersätze mit annähernd gleicher Streckenenergie. Für die Generierung von für den Strukturaufbau geeigneten Schmelzspuren muss demnach der individuelle Einfluss von Laserleistung und Scangeschwindigkeit betrachtet werden.

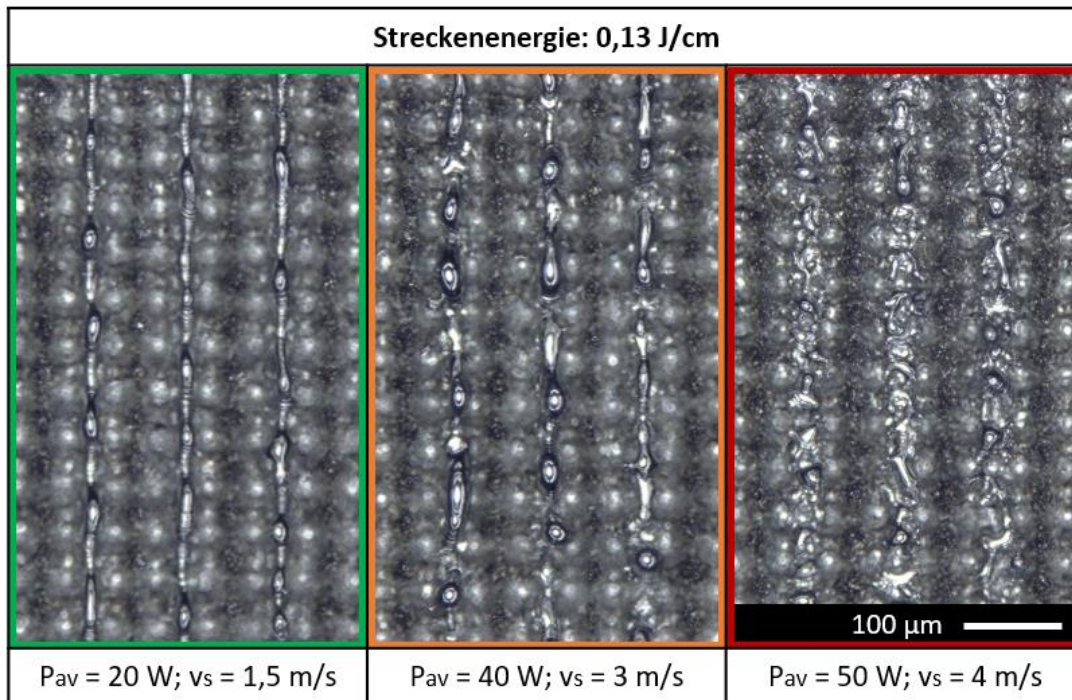


Abbildung 24: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Schmelzspuren bei annähernd gleicher Streckenenergie. Die Schmelzspuren wurden unter Verwendung gepulster Strahlung erzeugt ($\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$).

Unabhängig vom Bestrahlungsregime, tritt mit steigender Scangeschwindigkeit vermehrt Balling auf (Abbildung 25). Mit größerer Scangeschwindigkeit entsteht ein schmaleres und längeres Schmelzbad. Damit ist ein größeres Länge-zu-Breite-Verhältnis gegeben und entsprechend der Rayleigh-Instabilität kommt es zum Balling.

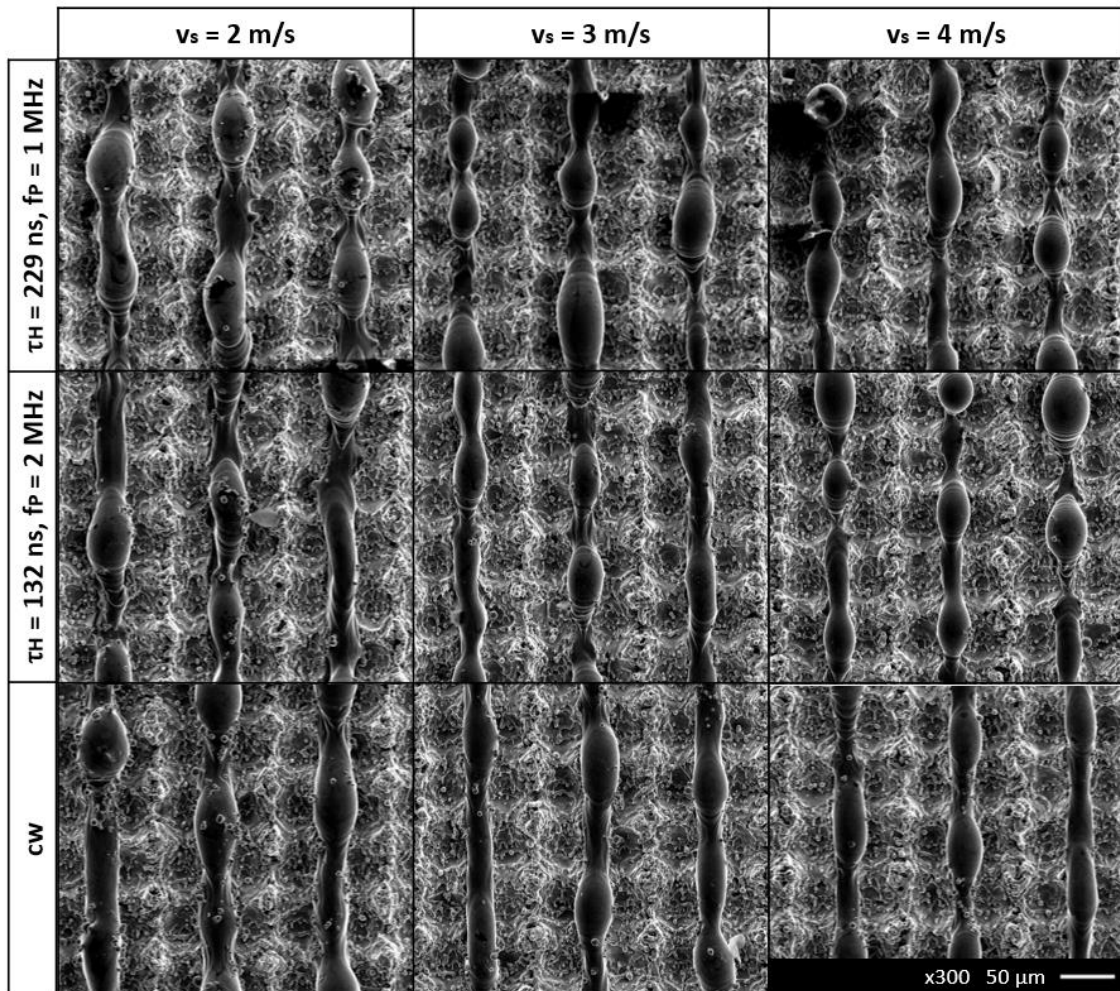


Abbildung 25: Ausbildung der Schmelzspuren in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanter mittlerer Laserleistung ($P_{av} = 40 \text{ W}$).

Bei Betrachtung der Einzelspuren können schmalere Spuren mit zunehmenden Scangeschwindigkeiten festgestellt werden. Dies lässt geringere Strukturbreiten unter Verwendung hoher Scangeschwindigkeiten erwarten.

Alle Schmelzspuren weisen einen Wechsel von schmaleren und breiteren Bereichen auf. Dies kann zum Teil auf eine inhomogene Verteilung unterschiedlich großer Pulverpartikel im Pulverbett zurückgeführt werden. Kleinere Partikel werden eher verdampft. So kann es zu Stellen mit einem Mangel an Material für die Schmelzbildung kommen, wodurch schmalere Bereiche in der Schmelzspur verbleiben.

Die Einzelspuren hergestellt mit gepulster Bestrahlung mit kurzer Pulspause und cw-Strahlung zeigen eine sehr ähnliche Morphologie. Dennoch tendieren die cw-Spuren weniger stark zum Balling und weisen nur eine gering ausgeprägte Verteilung von schmalen und breiten Bereichen auf.

Insgesamt entstehen die Schmelzspuren bei gepulster Bestrahlung nie so gleichmäßig und kontinuierlich, wie es bei cw- Bestrahlung der Fall ist. Es ist jedoch eine Annäherung bei Verkürzen der Pulspause zu erkennen. Bei konstanter Scangeschwindigkeit weisen die

genutzten gepulsten Bestrahlungsregime annähernd gleiche Wechselwirkungszeiten mit einem Punkt im Pulverbett auf. In Tabelle 7 sind die entsprechenden Zeiten aufgeführt.

Tabelle 7: Vergleich der Bestrahlungsdauer eines Punktes im Pulverbett für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanter Scangeschwindigkeit ($v_s = 3 \text{ m/s}$, $w_0 = 16,15 \text{ }\mu\text{m}$).

Bestrahlungsregime	Anzahl Pulse, die einen Punkt im Pulverbett treffen	Bestrahlungsdauer eines Punktes (μs)
$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$	6	2,74
$\tau_H = 229 \text{ ns}$, $f_P = 1 \text{ MHz}$	11	2,52
$\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$	16	2,74
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$	21	2,77
cw	-	10,77

Da sich trotz ähnlicher Wechselwirkungszeiten deutliche Unterschiede zwischen den gepulsten Bestrahlungsregimen zeigen, wird der Grund bei den verschiedenen Pulsenergien und Pulsspitzenintensitäten vermutet. Diese bestimmen den Anteil an verdampftem Material, was eine starke Auswirkung auf die Schmelzspurbildung zeigt. Mit sinkender Pulsperiode, d.h. mit steigender Frequenz, nehmen die Pulsenergien ab und weniger Material wird verdampft. Bei kontinuierlicher Bestrahlung ist aufgrund geringerer Intensitäten der Anteil an verdampftem Pulvermaterial ebenfalls sehr gering. Der Ausgleich der geringeren Intensitäten erfolgt durch eine deutlich längere Wechselwirkungszeit.

Ein besonders großer Unterschied der gepulsten und kontinuierlichen Bestrahlung ist bei Betrachtung sehr geringer mittlerer Laserleistungen zu sehen (Abbildung 26). Im Falle der cw-Strahlung kann die geringe Leistung auch nicht durch Verwendung geringerer Scangeschwindigkeiten und der damit einhergehenden längeren Wechselwirkungszeit zur Herstellung nutzbarer Schmelzspuren verwendet werden. REM-Aufnahmen zeigen, dass der Energieeintrag zwar ausreichend ist, um das Pulvermaterial aufzuschmelzen, es jedoch zu einem starken Zerfall der Schmelzspur kommt.

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen Intensität bei cw-Bestrahlung eine lediglich geringe Eindringtiefe der Strahlung besteht, womit keine ausreichende Anbindung der Schmelze hergestellt werden konnte. Zusätzlich verstärkt die hohe Oberflächenspannung infolge der geringeren Temperatur der Schmelze bei geringer Intensität den Zerfall der Schmelzspur. Die höheren Intensitäten der gepulsten Bestrahlung in Kombination mit dem stärkeren Rückstoßdruck durch verdampfendes Material ermöglichen trotz geringer Leistung eine Anbindung der Schmelze.

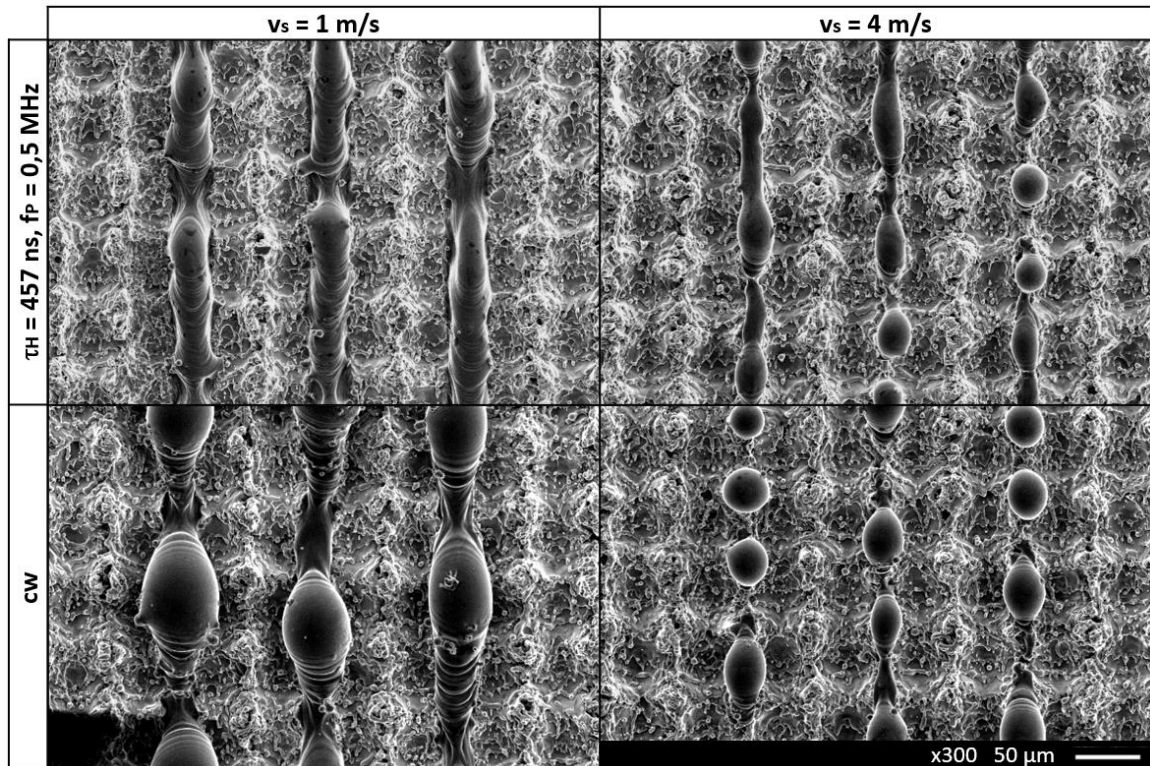


Abbildung 26: Vergleich der Schmelzspurausbildung für gepulste und kontinuierliche Bestrahlung bei Scangeschwindigkeiten von 1 m/s und 4 m/s bei geringer mittlerer Leistung ($P_{\text{av}} = 20 \text{ W}$).

Bei gepulster Bestrahlung entstehen unter Verwendung einer geringen Scangeschwindigkeit Schmelzspuren mit längeren kontinuierlichen Bereichen, unterbrochen von Einschnürungen. Diese Einschnürungen werden auch als „Necking“ bezeichnet [46].

Bei hoher Scangeschwindigkeit kann eine ähnliche Schmelzspurbildung bei gepulster und kontinuierlicher Bestrahlung beobachtet werden. Für beide Bestrahlungsregime reicht bei einer Scangeschwindigkeit von 4 m/s die Wechselwirkungszeit mit dem Material nicht aus, um mit der lediglich geringen Leistung von 20 W ein ausreichend großes Schmelzbad mit langer schmelzflüssiger Phase und geringer Oberflächenspannung zu erzeugen. Der Zerfall der Schmelzspuren aufgrund des Balling-Effekts ist deutlich zu sehen.

Die Einteilung der Schmelzspuren entsprechend ihrer Kontinuität zeigt, dass mit cw-Strahlung ab 50 W Laserleistung mit allen untersuchten Scangeschwindigkeiten kontinuierliche Schmelzspuren erzeugt werden konnten. Es ist davon auszugehen, dass bei Erreichen dieser Leistung ein stabiles Schmelzbad, relativ unabhängig von der Scangeschwindigkeit, entsteht. Abbildung 27 zeigt REM-Aufnahmen von Schmelzspuren, hergestellt mit variierender Scangeschwindigkeit.

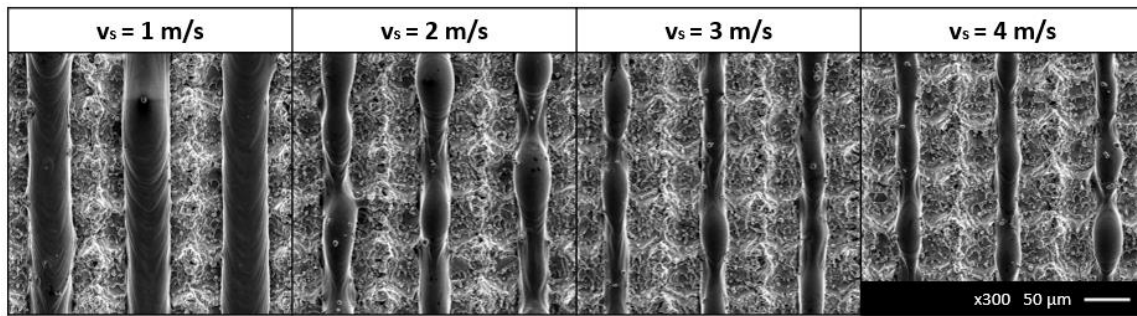


Abbildung 27: Ausbildung der Schmelzspuren in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit für die kontinuierliche Bestrahlung bei konstanter mittlerer Laserleistung ($P_{av} = 50 \text{ W}$).

Die Scangeschwindigkeit zeigt, wie bereits zuvor festgestellt, einen Einfluss auf die Spurbreite. Bei geringer Scangeschwindigkeit von 1 m/s sind gleichmäßige Ripple auf der Spuroberfläche zu erkennen. Diese entstehen durch ein gleichmäßiges Erstarren der Schmelze am Ende des Schmelzbades nach Weiterbewegen des Laserstrahls. Mit höherer Scangeschwindigkeit weisen die Schmelzspuren häufiger Einschnürungen auf, sind jedoch weiterhin kontinuierlich. Auch für höhere Laserleistungen (60 W , 70 W) wurde mit kontinuierlicher Bestrahlung das gleiche Verhalten beobachtet.

Bestrahlung von 10 Schichten

Auch der Einfluss variierender Laserleistungen und Scangeschwindigkeiten auf den Strukturaufbau über 10 Schichten wurde untersucht. Die Einteilung erfolgte wiederum analog zum vorangegangenen Versuch (Abbildung 28).

P_{av} (W)	70					0,2	0,18		
	60					0,2	0,17	0,15	
	50				0,2	0,17	0,14	0,13	
	40	0,4	0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,1	
	30	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08	
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05	
	$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$, $t_{off} = 1,54 \text{ }\mu\text{s}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
v_s (m/s)									
P_{av} (W)	70					0,28	0,23	0,2	0,18
	60	0,6	0,4	0,3	0,24	0,2	0,17	0,15	
	50	0,5	0,33	0,25	0,2	0,17	0,14	0,13	
	40	0,4	0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,1	
	30	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08	
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05	
	$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$, $t_{off} = 0,37 \text{ }\mu\text{s}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
v_s (m/s)									
P_{av} (W)	70			0,35	0,28	0,23	0,2	0,18	
	60			0,3	0,24	0,2	0,17	0,15	
	50			0,25	0,2	0,17	0,14	0,13	
	40	0,4	0,27	0,2	0,16	0,13	0,11	0,1	
	30	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08	
	20	0,2	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05	
	cw	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
v_s (m/s)									

Abbildung 28: Charakterisierung der Strukturen in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit für drei verschiedene Bestrahlungsregime mit Angabe der entsprechenden Streckenenergien (in J/cm). Bestrahlung von 10 Schichten.

Die Ergebnisse der Einzelspuruntersuchungen bei Bestrahlung einer Schicht lassen sich zu großen Teilen auf den Strukturaufbau übertragen. Mit kürzerer Pulspause sind für den Strukturaufbau höhere mittlere Leistungen oder geringere Scangeschwindigkeiten notwendig. Eine Leistung von 70 W ist bei gepulster Bestrahlung nicht sinnvoll umsetzbar. Der Energieeintrag ist hier auch bei großem Pulsabstand zu hoch, sodass ein großer Teil des Pulvers verdampft wird.

Wie bereits zuvor zeigt sich ein sehr ähnliches Verhalten für die gepulste Bestrahlung mit kurzer Pulspause und die kontinuierliche Bestrahlung. Für beide Bestrahlungsregime konnten in einem ähnlichen Parameterbereich Strukturen aufgebaut werden. Die gepulste Bestrahlung zeigt jedoch den Vorteil, dass auch bei vergleichsweise geringer Leistung noch Strukturen aufgebaut werden können. Dies ist wiederum auf die höheren Intensitäten der gepulsten Bestrahlung zurückzuführen.

Mit kontinuierlicher Strahlung sind dagegen höhere Leistungen umsetzbar. Dies ermöglicht gleichzeitig die Verwendung höherer Scangeschwindigkeiten, da geringere Wechselwirkungszeiten durch höhere Laserleistungen kompensiert werden können. Damit lassen sich höhere Prozessgeschwindigkeiten und eine höhere Prozesseffizienz unter Verwendung der cw-Strahlung erwarten.

Bereits bei Betrachtung der cw-Bestrahlung einer Schicht wurde ein stabiles Schmelzbad bei Verwendung einer mittleren Laserleistung von 50 W und höher festgestellt. Dies konnte hier für den Strukturaufbau bestätigt werden. Mit diesen Laserleistungen konnten unabhängig von der Scangeschwindigkeit fehlerfreie Strukturen erzeugt werden.

Es ist anzumerken, dass ab 50 W Laserleistung lediglich Scangeschwindigkeit von 2 m/s bis 4 m/s betrachtet wurden. Kleinere Scangeschwindigkeiten wurden bei hohen Leistungen nicht weiter untersucht, da hierbei Überhöhungen der Startpunkte der Schmelzspuren auftraten. Diese erforderten durch ein Hängenbleiben der Raketklinge einen Prozessabbruch. Grund für die Überhöhung ist ein Wärmestau am Startpunkt der Scanvektoren. Die eingebrachte Wärme kann durch das umliegende lose Pulvermaterial nur langsam abgeleitet werden.

Mit steigender Scangeschwindigkeit entsteht die Oberfläche der erzeugten Strukturen zunehmend unregelmäßig. Abbildung 29 soll dies verdeutlichen.

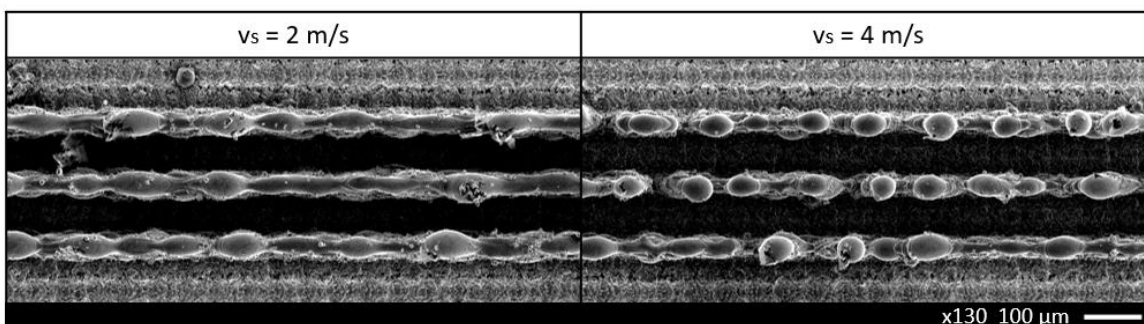


Abbildung 29: Strukturen nach Bestrahlung von 10 Schichten unter Verwendung verschiedener Scangeschwindigkeiten. $P_{av} = 40$ W. Gepulste Bestrahlung ($\tau_H = 132$ ns; $f_P = 2$ MHz).

Bei hoher Scangeschwindigkeit besteht die Struktur zum Teil aus einzelnen Säulen, welche nur an wenigen Stellen miteinander verbunden sind. Dies ist die Auswirkung des zunehmenden Balling-Effekts bei steigender Scangeschwindigkeit. Außerdem sinkt die Eindringtiefe der Strahlung aufgrund der geringeren Wechselwirkungszeit bzw. des geringeren Pulsüberlapps. Die Fehlstellen der diskontinuierlichen Schmelzspuren werden bei Bestrahlung der nachfolgenden Schicht nur teilweise ausgeglichen. Der Strukturaufbau ist somit trotz diskontinuierlicher Einzelspuren möglich, jedoch entstehen lediglich fehlerhafte Strukturen. Inwiefern diese für den Aufbau von Volumenkörpern geeignet sind, zeigen die nachfolgenden Untersuchungen.

9 Mehrspuruntersuchungen

9.1 Versuchsdurchführung

Ausgehend von den vorangegangenen Einzelspuruntersuchungen wurden Versuche zur Ermittlung eines geeigneten Hatches durchgeführt. Dies stellt den nächsten Schritt zur Parameterfindung für den späteren Aufbau von Volumenkörpern dar. Mit dem Ziel eine möglichst hohe Bauteildichte zu erreichen, wurden verschiedene Hatches in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit betrachtet. Hierzu wurden Strukturen, bestehend aus jeweils drei Einzelspuren mit variierendem Hatch im Bereich von 18 µm bis 38 µm in 5 µm-Schritten aufgebaut.

In Untersuchungen zum SLM mit Edelstahl 316L wurde festgestellt, dass der ideale Hatch 70 % der Spurbreite beträgt [9]. Um den zu untersuchenden Hatch-Bereich eingrenzen zu können, wurde folgende Gleichung zur Abschätzung des idealen Hatches aus dem Fokusbereich genutzt.

$$h_{s,ideal} = 0,7 \cdot (2 \cdot \omega_0) \tag{9.1}$$

Für den gegebenen Fokusbereich von 32,3 µm ergibt sich demnach ein idealer Hatch von 22,6 µm. In vorangegangenen Untersuchungen (siehe Kapitel 5) wurden bei gleicher Fokusgröße bereits mit größerem Hatch von 28 µm hohe Bauteildichten erreicht. Die Versuchsergebnisse zeigten jedoch auch, dass noch höhere Dichten bei geringerem Hatch zu erwarten sind. Da sich ein zu großer Linienüberlapp jedoch auch nachteilig auf das Bearbeitungsergebnis auswirken kann [47, 48], wurde ausgehend vom berechneten idealen Hatch nur ein weiterer geringerer Hatch untersucht. In Hinblick auf eine möglichst hohe Prozesseffizienz war zudem die Anwendbarkeit größerer Hatches von Interesse.

Tabelle 8 fasst die verwendeten Prozessparameter zusammen.

Tabelle 8: Genutzte Parameter für die Untersuchungen zum Einfluss vom Hatch bei verschiedenen mittleren Leistungen und Scangeschwindigkeiten. Die Schichtdicke betrug konstant 4 µm.

Bestrahlungsregime	P _{av} (W)	v _s (m/s)	h _s (µm)
τ _H = 457 ns, f _P = 0,5 MHz	30, 40	2, 3, 4	18, 23, 28, 33, 38
τ _H = 229 ns, f _P = 1 MHz	30, 40		
τ _H = 171 ns, f _P = 1,5 MHz	40, 50		
τ _H = 132 ns, f _P = 2 MHz	40, 50, 60		
cw	40, 50, 60, 70		

Die Bestrahlung erfolgte für 100 Schichten mit einer konstanten Schichtdicke von 4 μm . Bei der zuerst erzeugten Probe bestand das Problem, dass die aufgebauten Strukturen zu instabil waren. Durch den Trenn- und Schleifprozess für die Querschliffherstellung wurden die Proben unbrauchbar, da einzelne Strukturen verdrückt oder abgelöst wurden. Für die weitere Probenherstellung wurden daher Stützstrukturen zwischen den einzelnen Hatch-Strukturen eingefügt, womit die Problematik behoben werden konnte. Zudem wurden Einzelwände zwischen den Strukturen zur Hatchuntersuchung aufgebaut, um erste Aussagen über die Umsetzbarkeit der verwendeten Parameter zum Aufbau dünner Strukturen über eine größere Schichtanzahl als die zuvor in den Einzelspuruntersuchungen genutzten 10 Schichten treffen zu können.

9.2 Ergebnisse und Diskussion

Mit den verwendeten Prozessparametern konnten Strukturen mit unterschiedlich ausgeprägter horizontaler Vernetzung erzeugt werden. Während bei geringem Hatch die ursprünglichen drei Einzelwände nicht mehr zu erkennen sind, verbleiben bei großem Hatch teils drei klar getrennte Strukturen.

Die variierten Parameter mittlere Laserleistung und Scangeschwindigkeit zeigen beide einen merklichen Einfluss auf die erzeugte Breite der Einzelwände und damit auf den nutzbaren Hatch (Abbildung 30).

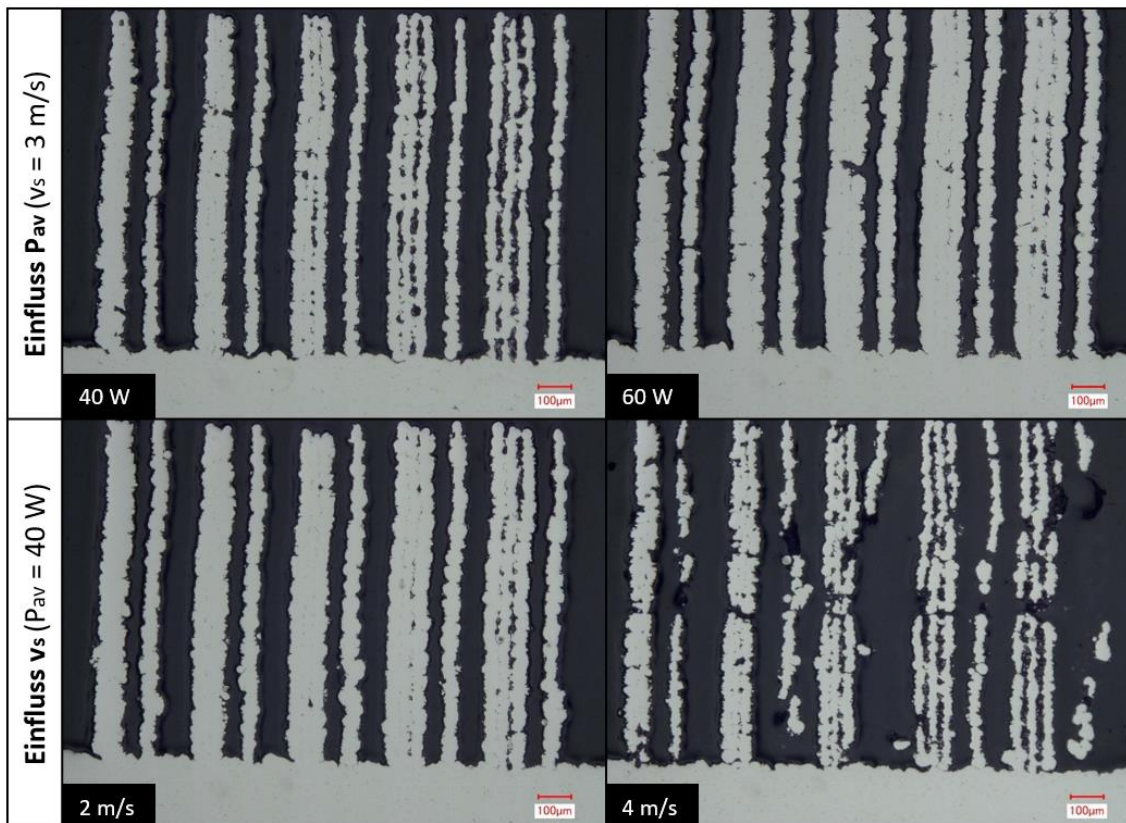




Abbildung 30: Einfluss von mittlerer Laserleistung (oben) und Scangeschwindigkeit (unten) auf die Wahl des Hatches. Gepulste Bestrahlung ($\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$).

Bei konstanter Scangeschwindigkeit nimmt mit wachsender mittlerer Laserleistung die Wandstärke zu. Folglich entstehen auch bei größerem Hatch dichte Strukturen. Besonders im Bereich hoher Scangeschwindigkeiten ist der Einfluss der Laserleistung jedoch gering. Einen größeren Einfluss zeigt die Variation der Scangeschwindigkeit. Mit höherer Scangeschwindigkeit nimmt die Wandstärke deutlich ab, womit kleinere Hatches zum Erzeugen dichter Strukturen erfordert werden.

Aus den Querschliffaufnahmen konnte der zur Herstellung dichter Strukturen geeignete Hatch in Abhängigkeit von Laserleistung und Scangeschwindigkeit ermittelt werden. Die Ergebnisse und Beispielaufnahmen für einen geeigneten und ungeeigneten Hatch sind in Tabelle 9 gegeben. Die Tabelle beschränkt sich aus Zwecken der Übersichtlichkeit lediglich auf die mittlere Laserleistung von 40 W. Die Ergebnisse für die weiterhin untersuchten Leistungen können im Anhang (A.1) eingesehen werden.

Tabelle 9: Zur Generierung dichter Bauteile geeigneter Hatch für verschiedene Scangeschwindigkeiten bei einer mittleren Laserleistung von 40 W.

Bestrahlungsregime	v _s (m/s)	Hatch (µm)					✓	✗
		18	23	28	33	38		
τ _H = 457 ns, f _P = 0,5 MHz	2	✓	✓	✓	✓	✗		
	3	✓	✓	✓	✗	✗		
	4	✓	✓	✓	✗	✗		
τ _H = 229 ns, f _P = 1 MHz	2	✓	✓	✓	✗	✗		
	3	✓	✓	✗	✗	✗		
	4	✓	✗	✗	✗	✗		
τ _H = 171 ns, f _P = 1,5 MHz	2	✓	✓	✓	✗	✗		
	3	✓	✓	✗	✗	✗		
	4	✓	✗	✗	✗	✗		
τ _H = 132 ns, f _P = 2 MHz	2	✓	✓	✓	✗	✗		
	3	✓	✓	✗	✗	✗		
	4	✓	✗	✗	✗	✗		
cw	2	✓	✓	✓	✓	✓		
	3	✓	✓	✓	✗	✗		
	4	✓	✓	✗	✗	✗		

Die bereits zuvor genannte Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit tritt unabhängig vom verwendeten Bestrahlungsregime auf. Mit kürzerer Pulspause sinkt der nutzbare Hatch-Bereich. Dies spricht für geringere Wandstärken bei kürzeren Pulspausen. Die Querschliffaufnahmen der verschiedenen Bestrahlungsregime bei gleichen Prozessparametern bestätigen dies (Abbildung 31).

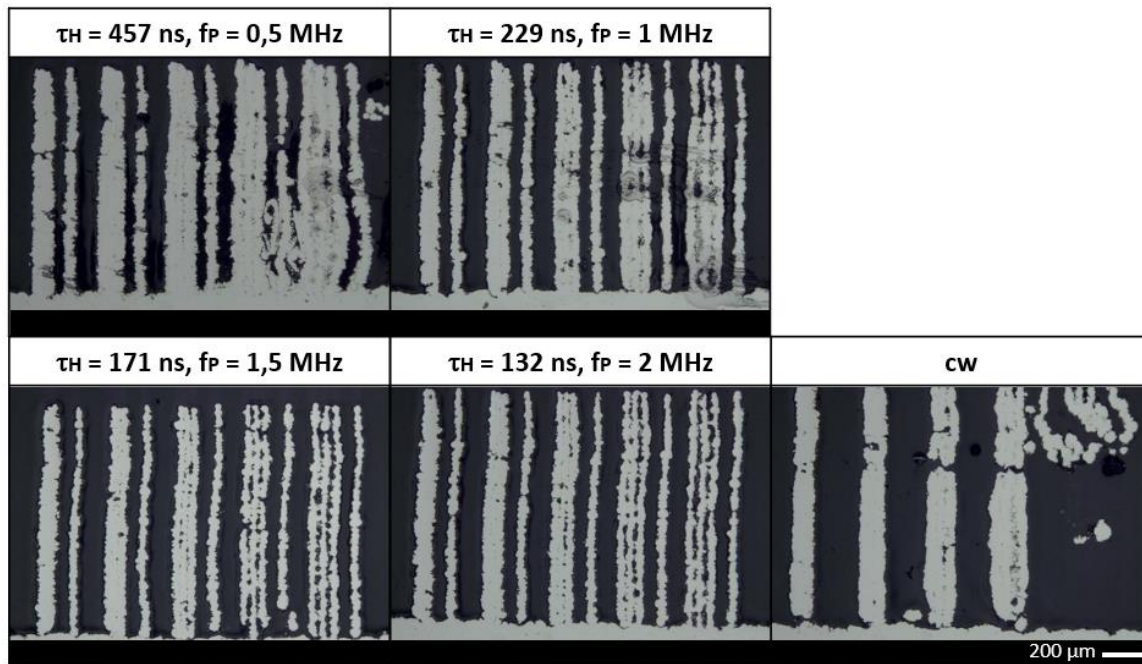


Abbildung 31: Querschliffaufnahmen zur Hatchuntersuchung für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanten Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$). Variierter Hatch (jeweils v.l.n.r.): $18 \mu\text{m}$, $23 \mu\text{m}$, $28 \mu\text{m}$, $33 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m}$.

Die größte Differenz weist das Regime mit der größten Pulspause auf. Alle weiteren gepulsten Bestrahlungsregime unterscheiden sich hinsichtlich des nutzbaren Hatches kaum. Dies lässt vermuten, dass die Wandstärken der drei Regime mit geringerer Pulspause in einem ähnlichen Bereich liegen. Dieser Sachverhalt wird in einem späteren Kapitel (Kapitel 11) genauer untersucht.

Eine Auffälligkeit stellt der größere nutzbare Hatch bei Verwendung der kontinuierlichen Bestrahlung dar. Diese ermöglicht als einziges der untersuchten Regime die Verwendung des größten Hatches von $38 \mu\text{m}$ bei einer Scangeschwindigkeit von 2 m/s . Dem entsprechend werden mit kontinuierlicher Bestrahlung bei geringer Scangeschwindigkeit die größten Wandstärken generiert.

Weiterhin zeigt Abbildung 31 ein unterschiedliches Verhalten für den Aufbau von Einzelwänden für die verschiedenen Bestrahlungsregime. Während mit gepulster Bestrahlung bei den gegebenen Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$) alle Einzelwände aufgebaut wurden, konnten mit cw-Bestrahlung keine Einzelwände erzeugt werden. In den Einzelspuruntersuchungen zuvor zeigte sich bereits, dass es sich bei diesen Prozessparametern für die kontinuierliche Bestrahlung um kritische Parameter handelt. Der mangelnde Energieeintrag verhindert eine Anbindung der Schmelzspuren an unterliegende Schichten und damit den Strukturaufbau.

Dennoch konnten trotz dieser kritischen Parameter, welche keinen Aufbau von Einzelwänden ermöglichen, Strukturen aus mehreren Einzelwänden erzeugt werden. Dies zeigt, dass eine Schmelzspur bei ausreichend geringem Hatch von der zuvor bestrahlten Spur beeinflusst wird. Bei Bestrahlung der zweiten Scanlinie ist bereits Wärme im Material. Es kommt

zur Wärmeakkumulation, wodurch weniger Energie für die nächste Spur notwendig ist. Im Vergleich zum Aufbau von Einzelwänden können so geringere Leistungen oder höhere Scangeschwindigkeiten für den Strukturaufbau verwendet werden.

Mit Erhöhen der Leistung auf 50 W konnten auch mit cw-Strahlung Einzelwände aufgebaut werden. Dies unterstützt die zuvor getroffene Annahme, dass im Falle der kontinuierlichen Bestrahlung mit steigender Leistung ein zunehmend stabiles Schmelzbad mit guter Anbindung entsteht.

REM-Aufnahmen der hergestellten Strukturen bestätigen nochmals die Aussagen, welche bereits in den Einzelspuruntersuchungen getroffen wurden (Abbildung 32).

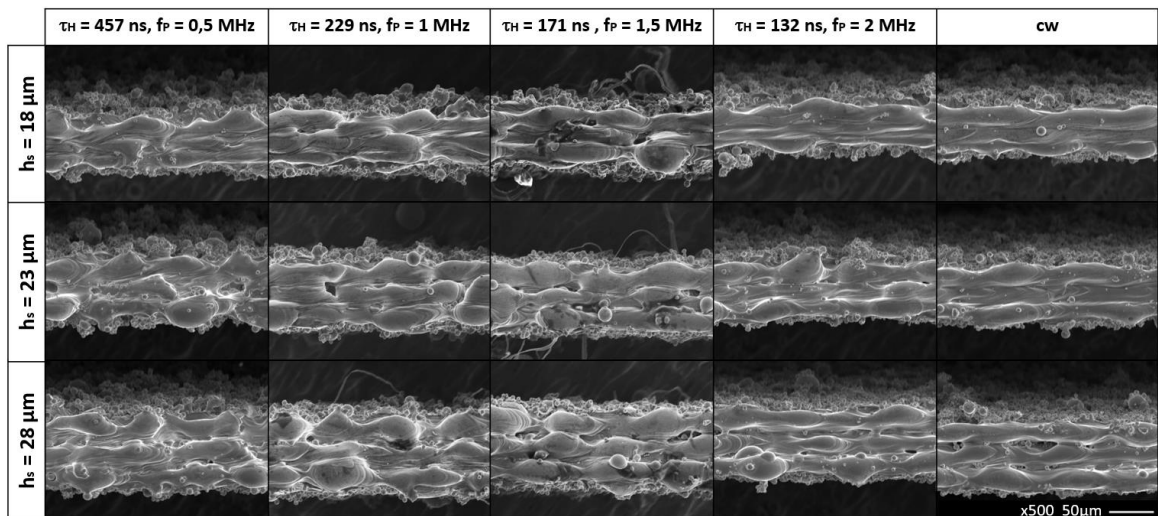


Abbildung 32: REM-Aufnahmen der mit variierendem Hatch erzeugten Strukturen für verschiedene Bestrahlungsregime ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$).

Mit kürzerer Pulspause entstehen glattere, gleichmäßigere Schmelzspuren und es ist eine deutliche Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung zu erkennen. Auch abnehmende Spurbreiten bei kürzerer Pulspause sind zu sehen. Während die drei Einzelwände bei längster Pulspause ($\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$) und $28 \mu\text{m}$ Hatch eine dichte Struktur ergeben, sind bei kurzer Pulspause und kontinuierlicher Bestrahlung deutlich alle drei Einzelwände mit wenigen horizontalen Verbindungen zu erkennen.

An den erzeugten Strukturen konnte außerdem ein unterschiedliches Verhalten zwischen kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung hinsichtlich anhaftender Schmelzperlen beobachtet werden (Abbildung 33).

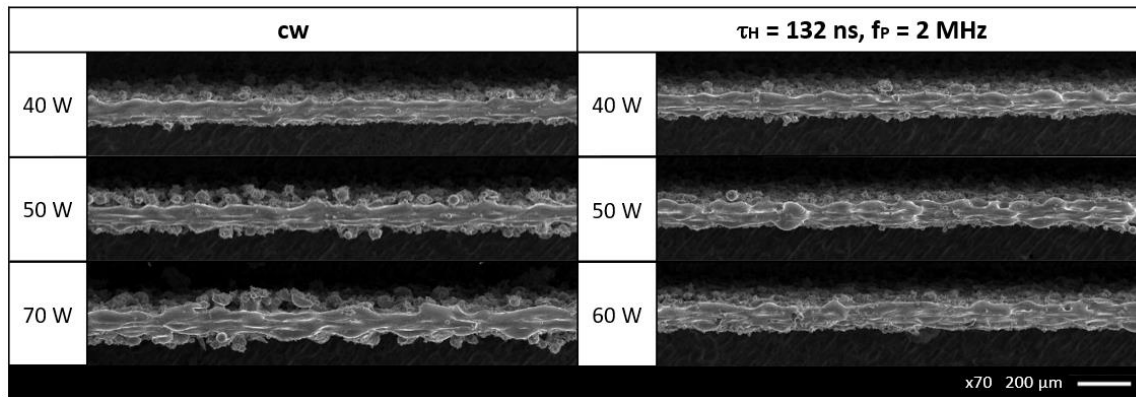


Abbildung 33: Einfluss der mittleren Laserleistung auf die Anhaftung von Pulverpartikeln an Seitenwänden für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung. ($h_s = 18 \mu\text{m}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$).

Bei geringer Leistung zeigen die mit unterschiedlicher Bestrahlung hergestellten Strukturen an den Seitenwänden in etwa die gleiche Menge an anhaftenden Schmelzperlen. Mit Erhöhen der Leistung ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Bestrahlungsregimen zu sehen. Während die gepulst erzeugten Strukturen kaum eine Änderung hinsichtlich anhaftender Schmelzperlen aufweisen, nimmt bei den cw-Strukturen mit steigender Leistung die Menge und auch Größe der anhaftenden Schmelzperlen signifikant zu.

Mit steigender Leistung nimmt die Wärmeeinflusszone (WEZ) um die Schmelzspuren zu. Es werden angrenzende Pulverpartikel in die Schmelze gezogen und nur partiell aufgeschmolzen, wodurch die zu erkennenden Schmelzperlen entstehen. Durch die kürzere Wechselwirkungszeit bei gepulster Bestrahlung ist die WEZ geringer. Weniger angrenzende Pulverpartikel werden zur Schmelze gezogen. Gleichzeitig werden umliegende lose Pulverpartikel von verdampfendem Material verdrängt. Mit gepulster Bestrahlung sind somit geringere vertikale Rauheiten zu erwarten.

Die Untersuchungen geben Aufschluss über den Bereich nutzbarer Hatches zu Erzeugung dichter Bauteile. Es zeigt sich, dass durch Anpassung von Laserleistung und Scangeschwindigkeit ein größerer Hatch-Bereich geeignet ist. Bei der Wahl des Hatches für den Aufbau von Volumenkörpern sollte der Aspekt der Prozesseffizienz nicht vernachlässigt werden. Um die Bestrahlungszeit für eine Schicht möglichst kurz zu halten, sollte ein möglichst großer Hatch bei hoher Scangeschwindigkeit angestrebt werden. Durch Erhöhen des Hatches sinkt die Anzahl an Scanvektoren, die für die Bestrahlung einer Fläche benötigt werden. In Tabelle 10 ist beispielhaft die Berechnung der notwendigen Bestrahlungszeit für eine Fläche von $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Hatches gegeben. Es wird eine Linienbestrahlung angenommen und Scanner- und Laserdelays werden vernachlässigt. Es zeigt sich, dass sowohl Hatch als auch Scangeschwindigkeit einen enormen Einfluss auf die Bestrahlungszeit besitzen. Um einen möglichst effizienten Bauprozess zu erhalten ist es daher notwendig beide Prozessparameter in Abhängigkeit voneinander zu optimieren. Dabei muss zudem der Einfluss der Laserleistung bedacht werden, welche bei Zunahme die Verwendung größerer Hatches ermöglicht.

Tabelle 10: Berechnung der zur Bestrahlung einer definierten Fläche (5x5 mm) benötigten Zeit in Abhängigkeit des Hatches und der Scangeschwindigkeit.

Fläche: 5x5 mm			benötigte Zeit (s)		
Hatch (µm)	Anzahl Scanlinien	zu bestrahlende Strecke (mm)	$v_s = 2 \text{ m/s}$	$v_s = 3 \text{ m/s}$	$v_s = 4 \text{ m/s}$
18	278	1388,9	0,69	0,46	0,35
23	217	1087,0	0,54	0,36	0,27
28	179	892,9	0,45	0,3	0,22
33	152	757,6	0,38	0,25	0,19
38	132	657,9	0,33	0,22	0,16

Inwiefern die untersuchten Hatches final für den Aufbau von dichten Volumenkörpern geeignet sind, ist Thema des folgenden Kapitels.

10 Aufbau von Volumenkörpern

10.1 Dichte

10.1.1 Versuchsdurchführung

Nachdem der geeignete Parameterbereich hinsichtlich mittlerer Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch für fünf verschiedene Bestrahlungsregime ermittelt wurde, folgte schließlich der Aufbau von Volumenkörpern.

Zunächst wurden Volumenkörper für eine bildanalytische Dichtemessung erzeugt. Damit sollte ein erster Überblick über erreichbare Dichten in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern und Bestrahlungsregimen erreicht werden. Die Volumenkörper wurden hierfür mit einem treppenartigen Aufbau hergestellt. Beginnend mit einer Grundfläche von 6 mm x 5 mm wurde jede folgende Treppenstufe um 0,1 mm eingerückt (Abbildung 34). Dies dient der späteren Identifizierung der Parameterwechsel im Querschliff. Die Bestrahlung einer Stufe erfolgte mit konstanten Parametern für jeweils 200 Schichten. Für die nächste Stufe wurden Parameter geändert. Zu den variierten Prozessparametern gehören mittlere Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch. In Tabelle 11 sind die untersuchten Parameter zusammengefasst. In Hinblick auf die Prozesseffizienz wurde sich auf höhere Scangeschwindigkeiten beschränkt. Die Schichtdicke wurde zunächst aus den vorherigen Untersuchungen übernommen und betrug konstant 4 μm . Nach jeder Schicht wurde die Bestrahlungsrichtung um einen Winkel von 139° gedreht. Der Aufbau erfolgte wiederum unter Schutzgasatmosphäre.

Tabelle 11: Verwendete Prozessparameter für den Aufbau von Volumenkörpern für die bildanalytische Dichtemessung. Die Schichtdicke betrug 4 μm .

	P_{av} (W)	v_s (m/s)	h_s (μm)
gepulst (4 Bestrahlungsregime siehe Kapitel 9)	40	4	28, 23, 18
	30	3	28, 23, 18
	40	3	28, 23, 18
cw	40	4	28, 23, 18
	40	3	28, 23, 18
	50	4	28, 23

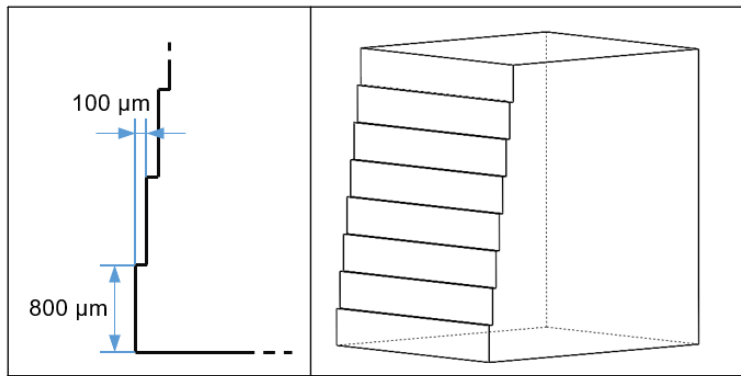


Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Generierung von Volumenkörpern für die bildanalytische Dichtemessung. Links: Querschnitt der Treppenstufen. Rechts: Dreidimensionaler Volumenkörper mit treppenartigem Aufbau (Grundfläche: 6 mm x 5 mm).

Ausgehend von den Ergebnissen der bildanalytischen Dichtemessung wurden mit ausgewählten Parametersätzen Quader für eine archimedische Dichtemessung aufgebaut. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass die archimedische Dichtemessung der bildanalytischen Messung, aufgrund der geringeren Anfälligkeit für Messfehler, vorzuziehen ist. Da die archimedische Messung für eine hohe Genauigkeit jedoch eine minimale Masse der Bauteile von rund 4 g erfordert, müssen hierfür größere Bauteile mit deutlich längeren Prozesszeiten erzeugt werden. Die erzeugten Quader besitzen eine Grundfläche von 21 mm x 7 mm. Die Bestrahlung erfolgte für 900 Schichten.

Die genutzten Parameter und Bestrahlungsregime sind in Tabelle 12 zu sehen.

Tabelle 12: Parameter für die Erzeugung von Volumenkörpern für die archimedische Dichtemessung. Die Schichtdicke betrug 4 µm.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	h_s (µm)
$\tau_H = 457$ ns, $f_P = 0,5$ MHz	40	3	18
$\tau_H = 229$ ns, $f_P = 1$ MHz			
$\tau_H = 171$ ns, $f_P = 1,5$ MHz			
$\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz			
$\tau_H = 457$ ns, $f_P = 0,5$ MHz	30	3	18
$\tau_H = 229$ ns, $f_P = 1$ MHz	40	3	23
$\tau_H = 171$ ns, $f_P = 1,5$ MHz			
$\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz			
CW			
$\tau_H = 171$ ns, $f_P = 1,5$ MHz	50	4	23
$\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz			
CW			

Um ebenfalls den Einfluss der Schichtdicke auf die Bauteildichte beurteilen zu können, wurden ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Hierfür wurden analog zu den ersten Versuchen für die bildanalytische Dichtemessung treppenartige Probenkörper mit variierender mittlerer Laserleistung erzeugt. Es wurde sich neben der kontinuierlichen Bestrahlung auf die Betrachtung eines gepulsten Bestrahlungsregimes beschränkt. Der Hatch blieb konstant. Als Schichtdicken wurden 4 μm und 8 μm verwendet. In der Tabelle 13 sind die genutzten Prozessparameter aufgeführt.

Tabelle 13: Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Schichtdicke auf die Bauteildichte.

Bestrahlungsregime	l_z (μm)	h_s (μm)	P_{av} (W)	v_s (m/s)
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$	4; 8	23	45 - 65 (5 W - Schritte)	4
cw				

10.1.2 Ergebnisse und Diskussion

10.1.2.1 Einfluss von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch

Die Ergebnisse der bildanalytischen Dichtemessungen geben zunächst einen guten Überblick über die erreichbaren Dichten für die verschiedenen Bestrahlungsregime. Allgemein wurden mit allen untersuchten Parameterkombinationen relative Dichten > 98 % erreicht. Der genutzte Parameterbereich kann damit für die Generierung hoher Bauteildichten als geeignet angesehen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird sich im Folgenden nur auf die Darstellung ausgewählter Messergebnisse beschränkt. Eine vollständige Wiedergabe der Ergebnisse der bildanalytischen Dichtemessung ist im Anhang (A.2.1) gegeben.

Die Prozessparameter mittlere Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch wirken sich für alle Bestrahlungsregime ähnlich auf die Bauteildichte aus. Abbildung 35 zeigt den Einfluss der Prozessparameter für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung grafisch.

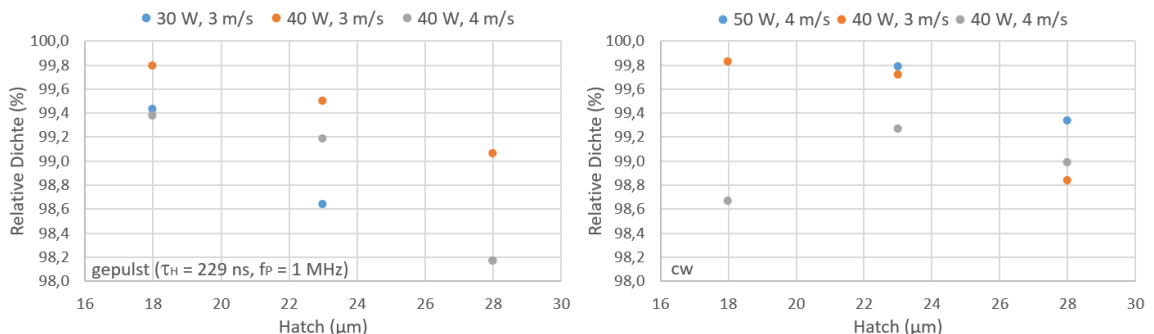


Abbildung 35: Abhängigkeit der relativen Dichte von mittlerer Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch für die gepulste (links) und kontinuierliche Bestrahlung (rechts). Bildanalytische Messung bei 50-facher Vergrößerung. Es sind sinkende Dichtewerte durch geringere Leistung, höhere Scangeschwindigkeit und größeren Hatch zu sehen.

Die maximalen Bauteildichten wurden jeweils beim geringsten untersuchten Hatch von $18\ \mu\text{m}$ gemessen. Mit wachsendem Hatch nimmt die Bauteildichte ab. Je geringer der Linienüberlapp, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwischen benachbarten Schmelzspuren Poren entstehen.

Die mit den verwendeten Prozessparametern erzeugten Schmelzspuren sind weitestgehend unregelmäßig und weisen in Scanrichtung einen Wechsel breiter und schmaler Bereiche auf. Treten nun bei benachbarten Schmelzspuren schmalere Bereiche an gleicher Stelle auf, so können trotz geringem Hatch Poren im Bauteil verbleiben.

Ein geringer Hatch und damit ein großer Linienüberlapp bewirkt, dass ein Teil der bereits verfestigten Schmelzspur wieder aufgeschmolzen wird. Damit werden Unebenheiten der ursprünglichen Schmelzspur ausgeglichen und die Spur wird geglättet, womit weniger Poren im Material verbleiben. Je geringer der Linienüberlapp, desto geringer ist dieser glättende Effekt und die Bauteildichte sinkt.

Ebenso nimmt die Bauteildichte mit steigender Scangeschwindigkeit ab. Dies ist auf die, in Kapitel 8.2.2 beobachtete, abnehmende Spurbreite und den zunehmenden Balling-Effekt mit höherer Scangeschwindigkeit zurückzuführen.

Weiterhin wurde eine Zunahme der Dichte mit steigender Leistung festgestellt. Hierbei ist anzumerken, dass für die gepulsten Bestrahlungsregime lediglich die beiden eher geringen mittleren Leistungen $30\ \text{W}$ und $40\ \text{W}$ untersucht wurden. Demnach trat das Phänomen der abnehmenden Schmelzbadstabilität mit zunehmender Leistung noch nicht auf und die Leistungssteigerung äußert sich lediglich in einer Zunahme der Spurbreite. Unter Verwendung höherer mittlerer Leistungen sind aufgrund der zuvor beobachteten instabileren Schmelzbäder und daraus resultierenden unregelmäßigen Schmelzspuren geringere Bauteildichten für die gepulste Bestrahlung zu erwarten. Außerdem besteht mit höherer Leistung die Möglichkeit, dass unerwünschter Pulveraufschiebung auftritt, welcher bisher nicht erkennbar war. Die Verwendung höherer mittlerer Leistungen, auch bei gepulster Bestrahlung, wurde im Rahmen der Volumenkörper für die archimedische Dichtemessung untersucht.

Für die kontinuierliche Bestrahlung lässt sich die Dichtezunahme mit höherer Leistung auf die erhöhte Stabilität des Schmelzbades und die daraus resultierenden gleichmäßigen, glatten Schmelzspuren zurückführen.

Für fast alle Bestrahlungsregime wurde die maximale relative Bauteildichte mit gleichen Prozessparametern ($P_{\text{av}} = 40\ \text{W}$, $v_s = 3\ \text{m/s}$, $h_s = 18\ \mu\text{m}$) erreicht. Ausnahme bildet das gepulste Bestrahlungsregime mit längster Pulspause ($\tau_H = 457\ \text{ns}$, $f_P = 0,5\ \text{MHz}$). Hier wurde die höchste Dichte bei geringerer Leistung von $30\ \text{W}$ gemessen. Da jedoch ein Messfehler durch Beeinflussung der sichtbaren Poren durch den Schleifprozess vermutet wird, wurde der Parameter in folgenden Untersuchungen für die archimedische Messung nochmals betrachtet.

Die für die restlichen Bestrahlungsregime gemessenen maximalen Dichten liegen im Bereich von 99,8 %. Die Abweichungen zwischen den Regimen sind dabei sehr gering (Tabelle 14). Hohe Bauteildichten sind demnach sowohl mit gepulster als auch mit kontinuierlicher Bestrahlung möglich.

Tabelle 14: Maximale relative Dichten der bildanalytischen Dichtemessung für die verschiedenen Bestrahlungsregime. Mittelwert aus jeweils vier Messwerten mit Angabe der Standardabweichung σ .

Bestrahlungsregime	Maximale relative Bauteildichte (%)	σ	Prozessparameter (P_{av} , v_s , h_s)
$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$	99,75	0,03	30 W, 3 m/s, 18 μm
$\tau_H = 229 \text{ ns}$, $f_P = 1 \text{ MHz}$	99,80	0,06	40 W, 3 m/s, 18 μm
$\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$	99,84	0,07	
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$	99,78	0,09	
cw	99,83	0,04	

Bei Herstellung der Volumenkörper wurde bei einigen Parametern, insbesondere bei Bestrahlung mit kurzer Pulspause oder kontinuierlicher Bestrahlung, das Phänomen einer sehr glatten Deckfläche beobachtet. Dies zeigte sich durch teils mangelhaften Pulveraufzug, wobei nur stellenweise oder gar kein Pulvermaterial auf der zu bestrahlenden Fläche abgeschert wurde. Damit lassen sich die teils großen Poren im Bauteil bei geringem Hatch erklären. Da sich diese Problematik offensichtlich auf die Bauteildichte und die Anwendbarkeit bestimmter Prozessparameter auswirkt, wurden Untersuchungen zur Deckflächenrauheit durchgeführt (Kapitel 10.2).

Eine Problematik der bildanalytischen Dichtemessung wird bei Vergleich der Querschnittsaufnahmen bei unterschiedlicher Vergrößerung ersichtlich. Die bisher angegebenen Dichtewerte wurden an Querschliffaufnahmen mit 50-facher Vergrößerung gemessen. Diese bilden allerdings nur einen kleinen Bildausschnitt ab, welcher bei einer ungleichmäßigen Verteilung der Poren als nicht repräsentativ für den gesamten Querschnitt des Bauteils angesehen werden kann. Der Vergleich mit den Aufnahmen bei 5-facher Vergrößerung zeigt, dass teils große Poren oder Risse bei Parametersätzen vorhanden sind, bei welchen mit höherer Auflösung hohe Dichten gemessen wurden (Abbildung 36). Besonders markant ist dies für die Bauteile, welche mit kontinuierlicher Bestrahlung erzeugt wurden.

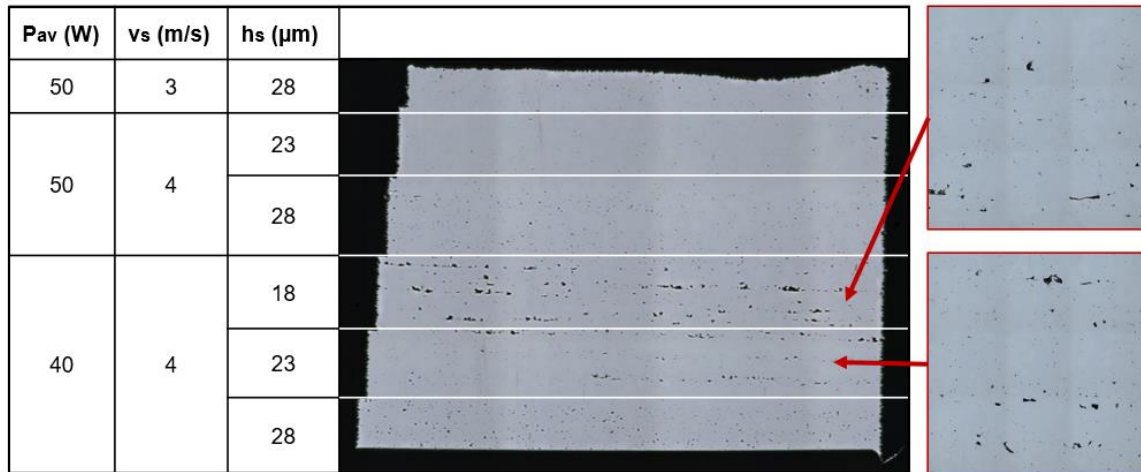


Abbildung 36: Vergleich von Querschliffaufnahmen mit unterschiedlicher Vergrößerung (5-fach und 50-fach) für einen mit kontinuierlicher Bestrahlung erzeugten Volumenkörper.

Die Querschliffaufnahmen bei 50-facher Vergrößerung zeigen für den Hatch von 18 μm und 23 μm eine ähnlich große Menge an Poren. Auch hinsichtlich der Größe der Poren ist eine hohe Ähnlichkeit gegeben. Die Aufnahmen bei 5-facher Vergrößerung zeigen dagegen einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Parametern. Über den Querschnitt bei 18 μm Hatch sind weitaus mehr und auch größere Poren zu erkennen. Es ist bei diesem Parameter von einer real geringeren Dichte auszugehen. Um diese Problematik bei Messung der Dichte zu umgehen, wurden zusätzlich archimedische Messungen durchgeführt.

10.1.2.2 Archimedische Dichtemessung

Mit den archimedischen Dichtemessungen konnten die Ergebnisse der bildanalytischen Messung weitestgehend bestätigt werden. Die maximalen Bauteildichten wurden im Falle der gepulsten Bestrahlung auch hier bei den gleichen Parametern wie zuvor ($P_{av} = 40$ W, $v_s = 3$ m/s, $h_s = 18$ μm) gemessen. Als Referenzwert zur Bestimmung der relativen Bauteildichten wurde eine Dichte von 7,908 g/cm³ genutzt.

Im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen wurde auch für das Bestrahlungsregime mit längster Pulspause ($\tau_H = 457$ ns, $f_P = 0,5$ MHz) die höhere Dichte bei 40 W mittlerer Laserleistung gemessen.

Unter Verwendung der kontinuierlichen Strahlung traten beim Aufbau der Volumenkörper für die archimedische Dichtemessung Probleme auf. Mit den Parametern, welche zuvor die höchste Dichte ergaben ($P_{av} = 40$ W, $v_s = 3$ m/s, $h_s = 18$ μm) war kein Aufbau möglich. Bereits in den vorangegangenen Untersuchungen war die Problematik der sehr glatten Bauteiloberfläche unter Verwendung dieser Parameter aufgefallen. Durch die nun größere zu bestrahlende Fläche (in diesem Fall: 20 mm x 18 mm) wirkte sich dies deutlich stärker auf den Bauprozess aus (Abbildung 37). Durch den zunehmend inhomogenen Pulveraufzug kam es zur Schichtablösung, welche einen Prozessabbruch erzwang.

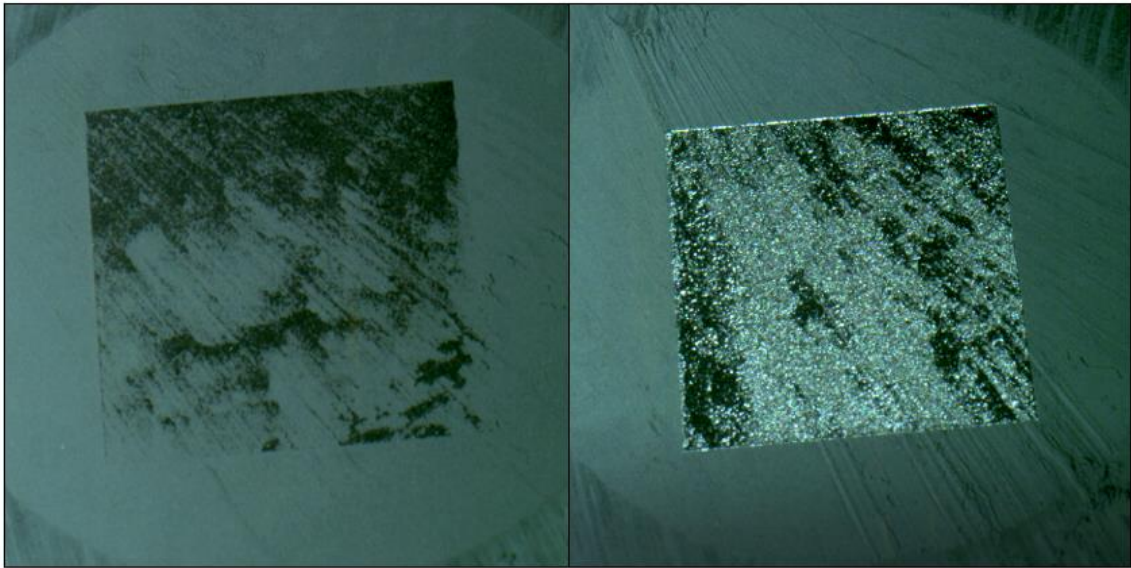


Abbildung 37: Mangelhafter Pulveraufzug bei kontinuierlicher Bestrahlung mit geringem Hatch aufgrund glatter Oberflächen. Links: inhomogener Pulveraufzug nach der ersten Bestrahlung. Rechts: unebene Bauteiloberfläche infolge des inhomogenen Pulveraufzugs nach der 10. Bestrahlung. (Prozessparameter: $P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 18 \text{ }\mu\text{m}$).

Die Versuche zeigen, dass hinsichtlich der Umsetzbarkeit bestimmter Prozessparameter, die Größe der zu bestrahlenden Fläche eine Rolle spielt. Bei Bestrahlung kleiner Flächen lassen sich kritische Parametersätze zwar bereits vermuten, jedoch können Effekte, wie hier die glatte Bauteiloberfläche, bei größerer zu bestrahlender Fläche deutlich dominanter auftreten. Dies gilt auch für die Problematik des Pulveraufschubs. Während bei der Herstellung der Proben für die bildanalytische Messung kein nennenswerter Pulveraufschub zu erkennen war, trat bei gleichen Prozessparametern bei Herstellung der größeren Volumenkörper für die archimedische Messung teils deutlicher Pulveraufschub auf.

Außerdem zeigen sich bei Bestrahlung einer größeren Fläche Probleme des verwendeten Rakelsystems. Die Hartmetallklinge, welche zum Abziehen der Pulverschicht genutzt wird, bleibt bei geringsten Unebenheiten der Bauteiloberfläche an dieser hängen. Es kommt zum Springen der Klinge, wodurch ein inhomogener Pulveraufzug verursacht wird. Eine Optimierung des Rakelsystems sollte für künftige Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der archimedischen Dichtemessung zeigen höhere Dichten mit sinkender Pulspause, wobei zwischen den beiden Bestrahlungsregimen mit den zwei kürzesten Pulspausen ($\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$ und $\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$) bei Verwendung der optimalen Prozessparameter ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 18 \text{ }\mu\text{m}$) kaum eine Differenz besteht (Abbildung 38).

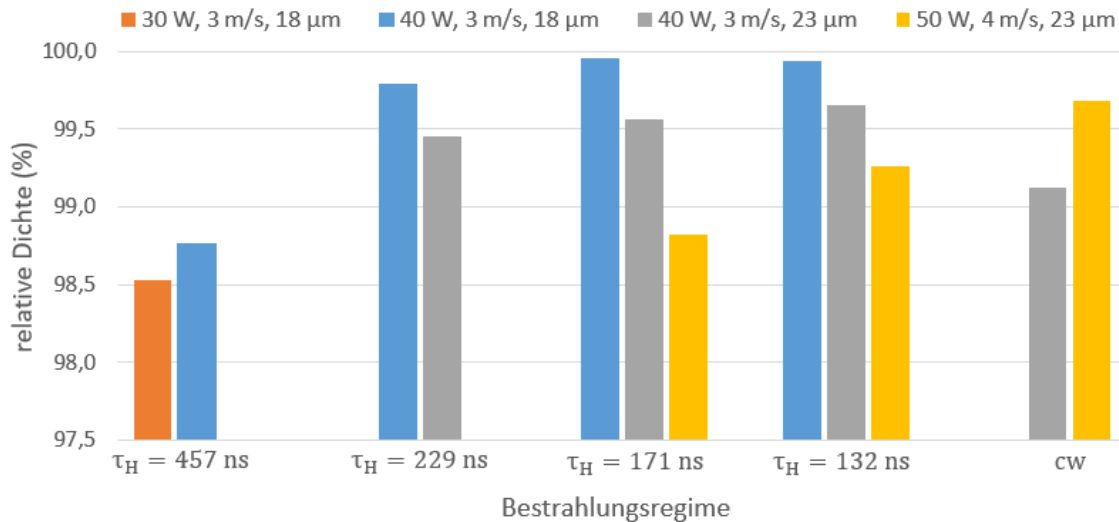


Abbildung 38: Ergebnisse der archimedischen Dichtemessung für die fünf verschiedenen Bestrahlungsregime. Die Angaben der Legende bezeichnen P_{av} , v_s und h_s .

Im Rahmen der untersuchten Parameter wurde die höchste Bauteildichte von 99,95 % mit gepulster Bestrahlung erreicht. Als wesentlicher Vorteil gegenüber der kontinuierlichen Bestrahlung ist hier die Umsetzbarkeit eines sehr geringen Hatches zu nennen. Durch Verringern des Hatches von 23 μm auf 18 μm konnten die bereits sehr hohen Bauteildichten nochmals verbessert werden.

Durch Erhöhen des Hatches war der Aufbau von Volumenkörpern auch mit kontinuierlicher Strahlung möglich. Bei Verwendung der gleichen Prozessparameter ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 23 \mu\text{m}$) wurden zunächst höhere Dichten bei gepulster Bestrahlung gemessen. Mit Erhöhen der mittleren Laserleistung auf 50 W wurden dagegen höhere Bauteildichten mit kontinuierlicher Bestrahlung erreicht. Grund hierfür zeigt sich bei nochmaliger Betrachtung der Schmelzspuren bei diesen Parametersätzen (Abbildung 39). Im Falle der kontinuierlichen Bestrahlung entstehen infolge der Leistungssteigerung kontinuierliche und gleichmäßige Schmelzspuren, womit die höhere Dichte erklärt werden kann. Im Hinblick auf die in Kapitel 8.2.2 bei höheren Leistungen erzeugten Einzelspuren sind auch noch höhere Bauteildichten mit höherer mittlerer Leistung zu erwarten.

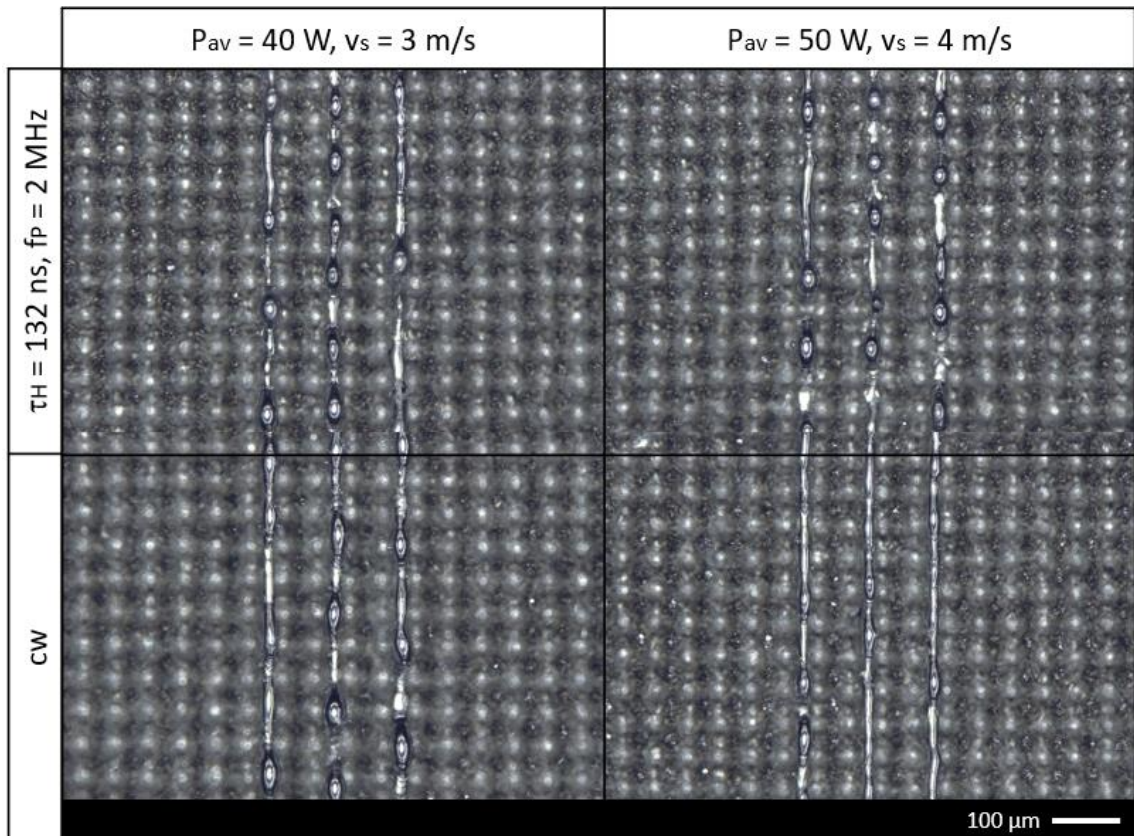


Abbildung 39: Vergleich der Schmelzspuren für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung für zwei Parametersätze, welche im Rahmen der archimedischen Dichtemessung betrachtet wurden.

Interessant zu sehen, ist die große Ähnlichkeit der Schmelzspuren bei 40 W Laserleistung für beide Bestrahlungsregime. Dennoch besteht ein wesentlicher Unterschied in der gemessenen Bauteildichte bei 23 µm Hatch. Zur näheren Betrachtung sind in Tabelle 15 nochmals die Dichtewerte für die bildanalytische und die archimedische Messung aufgeführt. Für eine Vergleichsmessung wurden auch von den Volumenkörpern der archimedischen Messung Querschliffe angefertigt und eine zweite bildanalytische Messung durchgeführt. Eine Ansicht der entsprechenden Querschliffe ist im Anhang (A.2.2) zu finden.

Tabelle 15: Vergleich der gemessenen Dichten für zwei Bestrahlungsregime bei gleichen Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 23 \text{ µm}$, $l_z = 4 \text{ µm}$). Angaben für die archimedische und bildanalytische Messung. Bildanalytisch 1 gemessen an Querschliffen der Treppenstufen-Proben. Bildanalytisch 2 gemessen an Querschliffen der Volumenkörper für die archimedische Dichtemessung.

Bestrahlungsregime	Relative Bauteildichte (%)		
	archimedisch	bildanalytisch 1	bildanalytisch 2
$\tau_H = 132 \text{ ns}; f_P = 2 \text{ MHz}$	99,66	99,6	99,54
cw	99,12	99,72	99,49

Zwischen den einzelnen Messungen und Messmethoden bestehen Differenzen. Insbesondere die Dichten der cw-Proben zeigen größere Abweichungen. Die archimedisch lediglich geringe gemessene Dichte lässt sich durch Risse im Bauteil erklären.

Die Entstehung dieser Baufehler ist auf die relativ glatte Bauteiloberfläche bei den verwendeten Parametern und den dadurch entstehenden inhomogenen Pulveraufzug zurückzuführen. Die bildanalytischen Messungen unterscheiden sich für beide Bestrahlungsregime, wobei die zweite Messung jeweils den geringeren Dichtewert ergab. Als Grund wird hier die unterschiedliche Größe der Probenkörper und damit der zu bestrahlenden Fläche vermutet. Die erste Messung erfolgte an Probenkörpern mit lediglich sehr kleiner Grundfläche. Fehler durch den Rakelprozess wirken sich hierbei weniger stark auf die Bauteileigenschaften aus. Bei größerer zu bestrahlender Fläche, wie es bei den Volumenkörpern für die archimedische Dichtemessung der Fall war, besitzen Fehler im Pulveraufzug einen größeren Einfluss. Entstehen beispielsweise aufgrund glatter Deckflächen Fehlstellen an Pulvermaterial auf den Bauteilen, so ist bei großer Fläche die Wahrscheinlichkeit geringer, dass diese Fehlstellen mit dem nächsten Pulveraufzug ausgeglichen werden. So konnten im Bauprozess häufig Fehlstellen über mehrere Schichten an gleicher Stelle auf dem Bauteil beobachtet werden. An diesen Stellen sind die verwendeten Prozessparameter aufgrund der veränderten Schichtdicke nicht optimal und es kommt zur vermehrten Porenbildung.

Die Ergebnisse der zweiten bildanalytischen Messung zeigen ähnliche Werte für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung. Dies stimmt mit den zuvor beobachteten sehr ähnlichen Einzelspuren überein. Es ist daher davon auszugehen, dass bei den betrachteten Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 23 \text{ }\mu\text{m}$) mit beiden Bestrahlungsregimen annähernd gleiche Dichten möglich sind, insofern keine größeren Baufehler durch inhomogenen Pulveraufzug auftreten.

Für die gepulste Bestrahlung weisen die Schmelzspuren bei den, in Abbildung 39, verglichenen Parametersätzen kaum Unterschiede auf. Wie bereits in den Einzelspuruntersuchungen festgestellt, sinkt mit steigender Leistung die Stabilität des Schmelzbades. Außerdem tritt durch Erhöhen der Scangeschwindigkeit vermehrt Balling auf. Dennoch zeigen die Schmelzspuren eine große Ähnlichkeit, weshalb man auch ähnlich hohe Dichtewerte erwartet würde. Grund für die Abweichung stellt der bei höherer Leistung auftretende Pulveraufschub dar.

Während bei den gepulsten Bestrahlungsregimen mit längerer Pulspause, aufgrund der höheren Pulsspitzenintensitäten, bereits bei 40 W mittlerer Laserleistung ein geringer Pulveraufschub auftrat, war bei 50 W bei allen gepulsten Regimen ein deutlicher Pulveraufschub zu erkennen. Im Falle der Bestrahlung mit $\tau_H = 229 \text{ ns}$ und $f_P = 1 \text{ MHz}$ war der Pulveraufschub bei 50 W bereits so stark, dass kein fehlerfreier Aufbau von Bauteilen mehr möglich war (Abbildung 40). Dies zeigt, dass die Problematik des Pulveraufschubs einen limitierenden Faktor hinsichtlich nutzbarer Laserleistungen für die gepulste Bestrahlung darstellt. Bei Überschreiten eines von der Pulsspitzenintensität abhängigen Leistungswertes, wird ein verstärkter Pulveraufschub stets zu geringeren Bauteildichten führen.

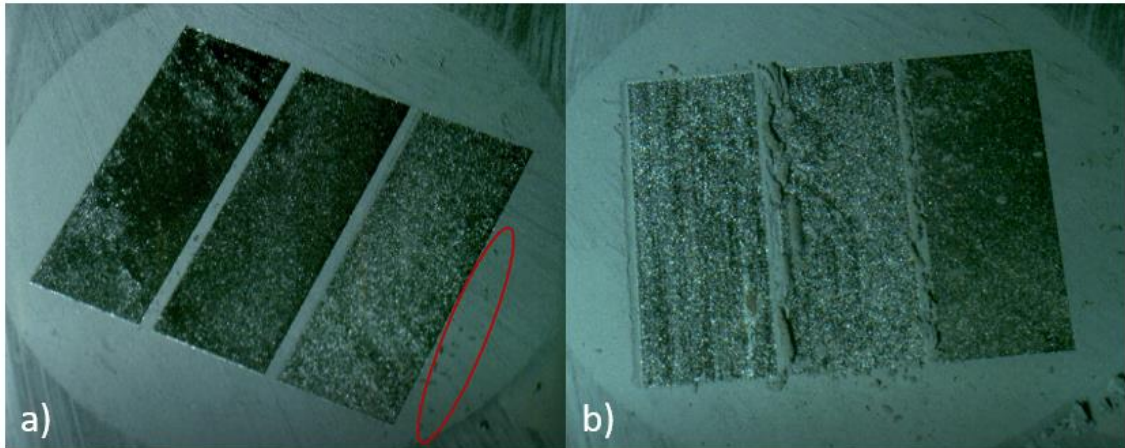


Abbildung 40: Prozessbilder zum Vergleich des auftretenden Pulveraufschubs bei verschiedenen Bestrahlungsregimen und Prozessparametern. a) rot markiert: minimaler Pulveraufschub bei Bestrahlung mit $\tau_H = 229$ ns, $f_P = 1$ MHz, kein Pulveraufschub bei Bestrahlung mit $\tau_H = 171$ ns, $f_P = 1,5$ MHz (links) und $\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz (mittig) (Prozessparameter: $P_{av} = 40$ W, $v_s = 3$ m/s, $h_s = 18$ μ m). b) Links: starker Pulveraufschub bei Bestrahlung mit $\tau_H = 229$ ns, $f_P = 1$ MHz. Mittig: mäßiger Pulveraufschub bei Bestrahlung mit $\tau_H = 171$ ns, $f_P = 1,5$ MHz. Rechts: kein Pulveraufschub bei kontinuierlicher Bestrahlung. (Prozessparameter: $P_{av} = 50$ W, $v_s = 4$ m/s, $h_s = 23$ μ m)

Die Ergebnisse der Dichtemessungen lassen vermuten, dass für die gepulste Bestrahlung die maximal möglichen Bauteildichten erreicht wurden. Lediglich eine weitere Verringerung des Hatches stellt noch eine Möglichkeit zur Optimierung der Dichte dar. Die Nutzung deutlich höherer Leistungen ist aufgrund des Pulveraufschubs als limitierenden Faktor nicht möglich.

Für die kontinuierliche Bestrahlung wurde die maximal mögliche Bauteildichte im Rahmen der Untersuchungen vermutlich nicht erreicht. Es werden höhere Dichten mit höherer mittlerer Laserleistung erwartet. Damit sind auch höhere Prozessgeschwindigkeiten durch Verwendung höherer Scangeschwindigkeiten möglich. Als limitierender Faktor hinsichtlich des nutzbaren Hatches wurde die Deckflächenrauheit identifiziert. Diese Problematik ist Thema des folgenden Kapitels 10.2.

10.1.2.3 Einfluss der Schichtdicke

In den bisherigen Untersuchungen wurde die Schichtdicke als wichtiger Prozessparameter konstant bei $l_z = 4$ μ m gehalten. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Schichtdicke einen wesentlichen Einfluss auf die Schmelzspurbildung und Benetzung besitzt. Inwiefern sich dies auf die Bauteildichte auswirkt, wurde im Folgenden untersucht. Die Messung der Dichte erfolgte wiederum bildanalytisch. Als variierender Parameter wurde hier neben der Schichtdicke die mittlere Laserleistung genutzt.

Beim Aufbau der Probenkörper mit variierender Leistung konnten bisherige Annahmen zu den limitierenden Faktoren der Bestrahlungsregime nochmals bestätigt werden. Einerseits ermöglichte ein immer stärkerer Pulveraufschub bei der gepulsten Bestrahlung keine Leistungssteigerung über 65 W hinaus. Andererseits ermöglichten glatte Oberflächen bei der

kontinuierlichen Bestrahlung keine geringeren Leistungen als 45 W. Auch die Vermutung steigender Bauteildichten bei höherer Leistung im Falle der kontinuierlichen Bestrahlung konnte bestätigt werden.

Abbildung 41 zeigt die gemessenen Dichten für beide Schichtdicken und Bestrahlungsregime grafisch. Die Angabe der Bauteildichte erfolgt in Abhängigkeit der VED. Diese halbiert sich bei Verdopplung der Schichtdicke.

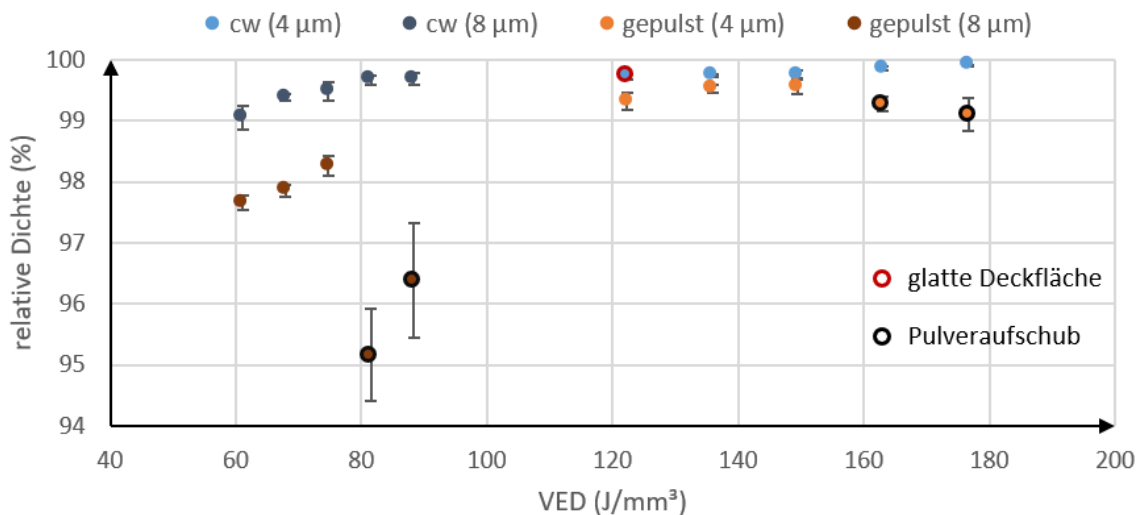


Abbildung 41: Relative Bauteildichte in Abhängigkeit der VED und Schichtdicke für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung. Prozessparameter: $v_s = 4$ m/s, $h_s = 23$ µm, $\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz. Parameter, welche zu glatten Deckflächen oder Pulveraufschub führten, sind entsprechend markiert. Bildanalytische Messung.

Insgesamt wurden höhere Dichten mit kontinuierlicher Bestrahlung erreicht. Dies ist auf die Verwendung der höheren Scangeschwindigkeit von 4 m/s zurückzuführen. Für die gepulste Bestrahlung kommt es bei höheren Scangeschwindigkeiten vermehrt zum Balling, wodurch unregelmäßige Schmelzspuren entstehen. Im Falle der kontinuierlichen Bestrahlung ist der Einfluss der Scangeschwindigkeit bei ausreichend hoher mittlerer Laserleistung weniger stark. Es ist davon auszugehen, dass mit der hier verwendeten minimalen Leistung von 45 W unter kontinuierlicher Bestrahlung bereits ein stabiles Schmelzbad entsteht, wodurch der Balling-Effekt trotz hoher Scangeschwindigkeiten kaum auftritt.

Für die kontinuierliche Bestrahlung wächst die Bauteildichte mit zunehmender Leistung. Auch hier zeigt sich bis zur maximal untersuchten mittleren Leistung von 65 W keine Dichteabnahme, wie es bei der gepulsten Bestrahlung ab 60 W der Fall ist. Bei gepulster Bestrahlung kann die Dichteabnahme infolge hoher Leistungen wiederum mit dem stärkeren Pulveraufschub erklärt werden. Unter Verwendung von cw-Strahlung ist dieses Phänomen auch bei hohen Leistungen nicht zu beobachten. Grund hierfür sind die wesentlich geringeren Intensitäten im Falle der kontinuierlichen Bestrahlung.

Mit höherer Schichtdicke sinkt für beide Bestrahlungsregime die Bauteildichte. Die Dichteabnahme fällt dabei bei gepulster Bestrahlung größer aus. Durch die längere

Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Material bei kontinuierlicher Bestrahlung ist auch die Eindringtiefe in das Material größer als bei gepulster Bestrahlung. Die größere Schichtdicke kann besser durchgeschmolzen werden.

Mit wachsender Schichtdicke muss zum Erreichen einer geeigneten Benetzung mehr Pulvermaterial aufgeschmolzen werden. Da alle weiteren Prozessparameter nicht geändert wurden, stand für beide Schichtdicken die gleiche Energiemenge zum Durchschmelzen der Pulverschicht zur Verfügung. Für geringe mittlere Laserleistungen ist der Energieeintrag hierfür ungenügend, die unterliegende Schicht kann nicht ausreichend aufgeschmolzen werden und es kommt aufgrund einer lediglich schlechten Benetzung vermehrt zum Balling.

Bei ausreichend großem Energieeintrag entsteht bei größerer Schichtdicke ein entsprechend größeres Schmelzbad. In der Tiefe eingeschlossene Gasblasen können durch das schnelle Erstarren der Schmelze nicht entweichen und bleiben als Poren im Material zurück [49].

Bei hohen mittleren Leistungen zeigt sich bei gepulster Bestrahlung und größerer Schichtdicke ein starker Dichteabfall. Als Ursache wird hier ein stärkerer Einfluss des Pulveraufschubs vermutet. Wird die ohnehin schon große Schichtdicke durch den Pulveraufschub noch weiter erhöht, so reicht der Energieeintrag nicht aus, um die Pulverschicht zu durchschmelzen und die starke Dichteabnahme folgt.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich mit kontinuierlicher Bestrahlung auch bei größerer Schichtdicke Bauteile mit hoher Dichte erzeugen lassen. Für die gepulste Bestrahlung ist dagegen die Verwendung geringerer Schichtdicken vorzuziehen. Damit bietet die kontinuierliche Bestrahlung hinsichtlich der Prozesseffizienz einen entscheidenden Vorteil. Durch Erhöhen der Schichtdicke wird die Anzahl notwendiger Schichten verringert und gleichzeitig die theoretische Aufbaurrate erhöht. Damit lassen sich mit höherer Schichtdicke deutlich geringere Prozesszeiten erreichen.

10.2 Deckflächenrauheit

10.2.1 Versuchsdurchführung

Beim Aufbau der Volumenkörper für die Dichteuntersuchungen wurde festgestellt, dass unter Anwendung bestimmter Prozessparameter sehr glatte Deckflächen entstehen. Auf besagten Oberflächen blieb beim Pulveraufzug kaum oder nur stellenweise Pulvermaterial liegen. Dieser inhomogene Pulveraufzug führte schließlich zu Fehlern im Bauprozess und zu deutlich verringerten Bauteildichten.

Um die Entstehung von Oberflächen mit zu geringer Rauheit vermeiden zu können, wurden Messungen der Deckflächenrauheit für verschiedene Prozessparameter durchgeführt. Hierfür wurden jeweils Quadrate mit einer Fläche von 2 mm x 2 mm bestrahlt. Zunächst wurden die Prozessparameter der zuvor durchgeführten Dichteuntersuchung verwendet (Tabelle 16). Um eine mögliche Änderung der Rauheit mit der Schichtanzahl zu erfassen, erfolgte die Bestrahlung jeweils für 1, 10 und 50 Schichten.

Tabelle 16: Erste Rauheitsuntersuchung - verwendete Prozessparameter und Bestrahlungsregime.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	h_s (μm)
457 ns - 0,5 MHz	40	3	18
229 ns - 1 MHz			
171 ns - 1,5 MHz			
132 ns - 2 MHz			
cw	40	3	23
cw			
cw			

Um für folgende Bauprozesse nutzbare Prozessparameter zur Vermeidung glatter Bauteiloberflächen umfangreich zu ermitteln, wurden analog zum bereits beschriebenen Versuch weitere Parameterkombinationen zum Einfluss von mittlerer Laserleistung, Scangeschwindigkeit und zusätzlich Schichtdicke untersucht. Der Hatch war hierbei mit 23 μm konstant und es wurde sich auf lediglich zwei der fünf Bestrahlungsregime beschränkt (Tabelle 17). Die Bestrahlung erfolgte jeweils für 10 Schichten.

Tabelle 17: Zweite Rauheitsuntersuchung - verwendete Prozessparameter. Zusätzlich zur vorangegangenen Untersuchung wurde die Schichtdicke betrachtet.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	l_z (μm)	h_s (μm)
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$; cw	40, 50, 60	2, 3, 4	4,6,8	23

Die Messung der Mittenrauwerte (S_a) erfolgte optisch mit einem Laserscanningmikroskop bei 50-facher Vergrößerung. Pro Parametersatz wurden drei Messungen durchgeführt.

10.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Rauheitsmessung zeigt deutliche Differenzen für die verschiedenen Bestrahlungsregime. In Abbildung 42 sind die gemessenen Rauheitswerte grafisch dargestellt.

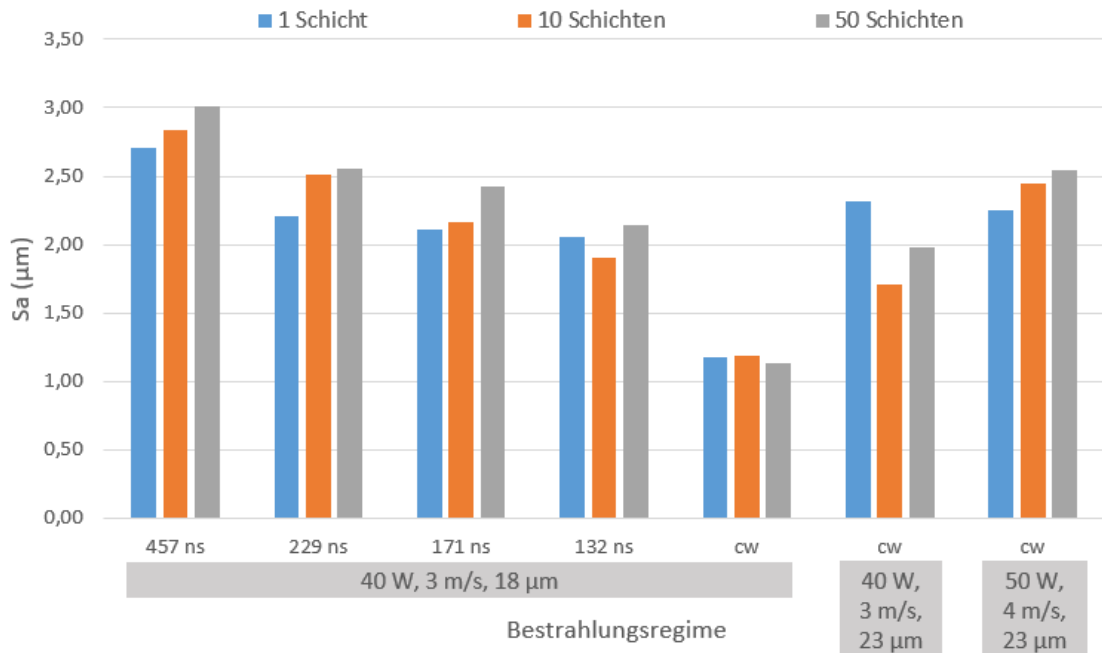


Abbildung 42: Ergebnisse der Rauheitsmessung (Deckflächenrauheit). Abhängigkeit von S_a von h_s , P_{av} und v_s bei konstanter Schichtdicke ($l_z = 4 \mu\text{m}$). Die entsprechenden Prozessparameter sind unterhalb der Grafik angegeben.

Unabhängig von der Anzahl der bestrahlten Schichten sinkt die Deckflächenrauheit mit sinkender Pulspause und mit Annäherung an die kontinuierliche Bestrahlung. Dies war bereits aus den Erkenntnissen der Einzelspuruntersuchungen zu erwarten. Mit sinkender Pulspause werden die Schmelzspuren bei konstanten Prozessparametern zunehmend gleichmäßig und glatt. Zwischen dem Bestrahlungsregime mit kürzester Pulspause und der cw-Bestrahlung ist nochmals eine deutliche Abnahme der Rauheit zu sehen.

Mit dem Erhöhen des Hatches geht eine höhere Rauheit einher. Der geringere Linienüberlapp lässt „Rillen“ zwischen den Schmelzspuren entstehen. Durch zusätzliches Erhöhen der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit kann die Rauheit weiter erhöht werden.

Mit höherer Schichtanzahl nimmt auch die Deckflächenrauheit zu. Dies ist auf das Schrumpfen des Schmelzbades beim Erstarren zurückzuführen. Die reale Schichtdicke nimmt hierdurch bis zum Erreichen eines Endwertes schrittweise zu. Durch die höhere Schichtdicke sinkt die Schmelzbadstabilität und der Balling-Effekt tritt vermehrt auf, womit die Rauheit zunimmt [9]. Zusätzlich kann es durch eine raue, unregelmäßige Oberfläche zu einem inhomogenen Pulveraufzug kommen, welcher ergänzend zu einer größeren Rauheit beiträgt.

REM-Aufnahmen der Deckflächen (300-fache Vergrößerung) lassen die unterschiedlichen Rauheiten gut erkennen (Abbildung 43).

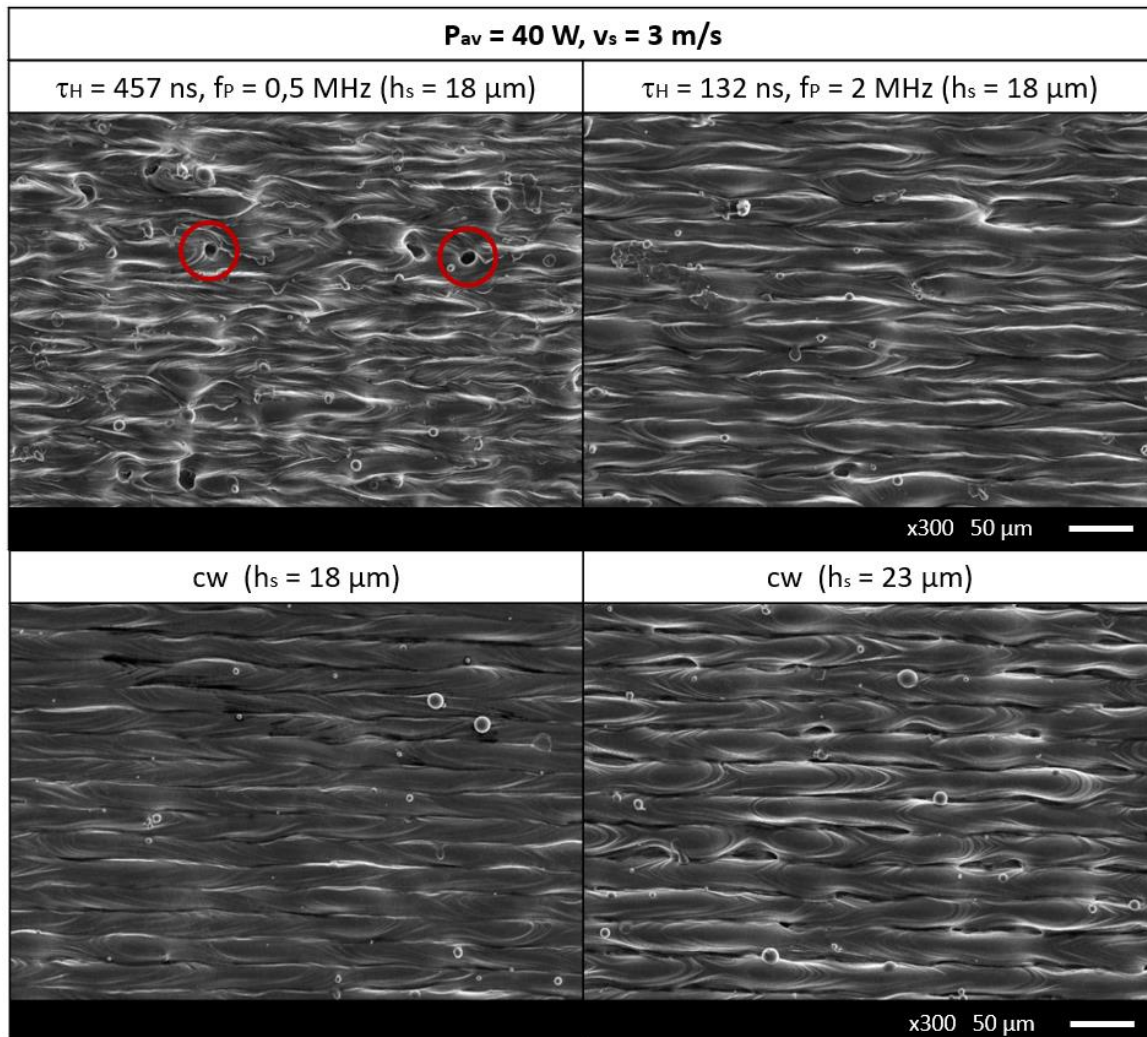


Abbildung 43: Deckflächen bei Bestrahlung einer Schicht für verschiedene Bestrahlungsregime und Prozessparameter. Rot markiert sind verbleibende Poren.

Es ist auch zu sehen, dass bei gepulster Bestrahlung mit $\tau_H = 457 \text{ ns}$ und $f_P = 0,5 \text{ MHz}$ trotz des geringen Hatches von $18 \mu\text{m}$ Poren zwischen den Schmelzspuren verbleiben. Bei Bestrahlung mit kürzerer Pulspause ist dies nicht der Fall. Dies bestätigt nochmals die Entstehung gleichmäßigerer Schmelzspuren und höherer Dichten mit kürzerer Pulspause.

Während der Probenherstellung wurde der Pulveraufzug genauestens beobachtet. Ein mangelhafter Pulveraufzug war, wie bereits zuvor, bei kontinuierlicher Bestrahlung mit $18 \mu\text{m}$ Hatch zu sehen. Zudem traten bei gepulster Bestrahlung mit $\tau_H = 131 \text{ ns}$ und $f_P = 2 \text{ MHz}$ bereits erste Inhomogenitäten im Pulveraufzug auf. Diese wurden jedoch durch nachfolgende Schichten ausgeglichen. Ausgehend von diesen Beobachtungen und den Ergebnissen der Rauheitsmessung wurde für einen akzeptablen, fehlerarmen Pulveraufzug ein minimaler Mittenrauwert von $Sa \geq 2 \mu\text{m}$ festgelegt.

Darauf folgten weitere Untersuchungen mit größerer Varianz der Prozessparameter.

Hinsichtlich mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten. Mit steigender Scangeschwindigkeit geht eine deutliche Zunahme der

Deckflächenrauheit einher. Grund hierfür ist der zunehmende Balling Effekt. Die mittlere Laserleistung zeigt dagegen nur geringen Einfluss auf die Rauheit (Abbildung 44).

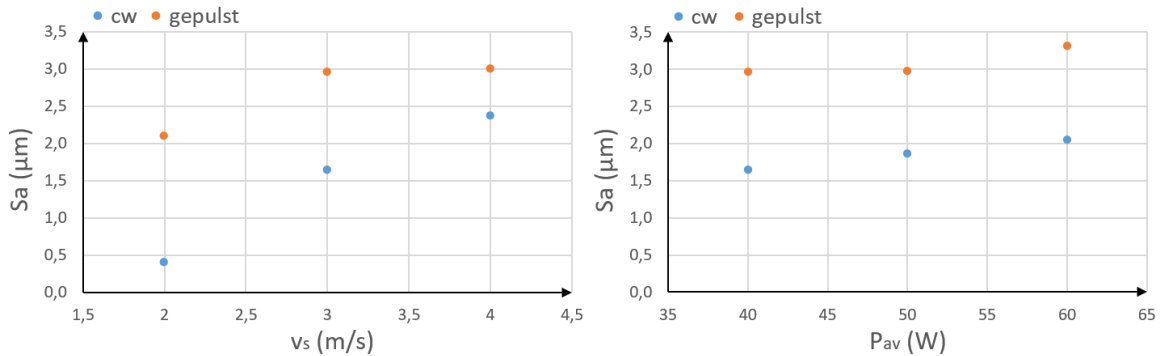


Abbildung 44: Einfluss von mittlerer Laserleistung bei $v_s = 3$ m/s (rechts) und Scangeschwindigkeit bei $P_{av} = 50$ W (links) auf die Deckflächenrauheit S_a für die gepulste und kontinuierliche Bestrahlung. $h_s = 23$ µm.

Ein signifikanter Einfluss der Schichtdicke auf die Oberflächenrauheit konnte nicht festgestellt werden. Abbildungen 45 und 46 zeigen das Verhalten der Rauheit für verschiedene Schichtdicken für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung.

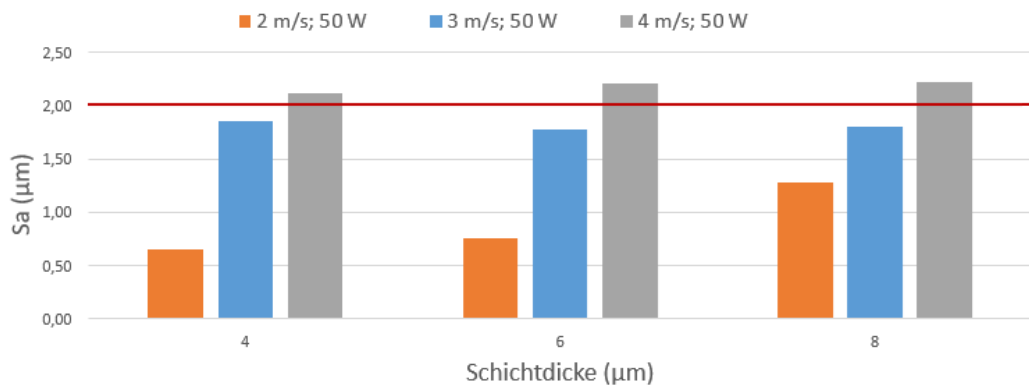


Abbildung 45: Einfluss der Schichtdicke auf die Deckflächenrauheit (cw). Rot markiert ist die festgelegte minimal erforderliche Rauheit für einen fehlerarmen Pulveraufzug. $h_s = 23$ µm.

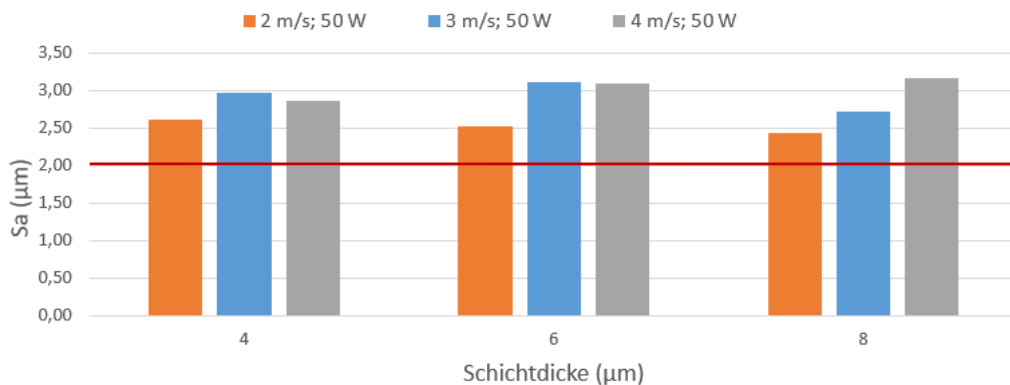


Abbildung 46: Einfluss der Schichtdicke auf die Deckflächenrauheit (gepulst, $\tau_H = 132$ ns, $f_P = 2$ MHz). Rot markiert ist die festgelegte minimal erforderliche Rauheit für einen fehlerarmen Pulveraufzug. $h_s = 23$ µm.

Mit gepulster Bestrahlung wurde die minimal erforderliche Rauheit von $2\ \mu\text{m}$ bei allen untersuchten Parametersätzen erreicht. Für die kontinuierliche Bestrahlung konnte diese Anforderung bei dem gegebenen Hatch von $23\ \mu\text{m}$ nur bei Verwendung einer hohen Scangeschwindigkeit von $4\ \text{m/s}$ erfüllt werden. Um geringere Leistungen und Scangeschwindigkeiten auch bei cw-Strahlung nutzen zu können ist eine Erhöhung des Hatches notwendig. Damit gehen jedoch auch geringere Bauteildichten einher.

10.3 Eigenspannungen

10.3.1 Versuchsdurchführung

Die durch den Bauprozess induzierten Eigenspannungen können zum Verzug oder Rissen in Bauteilen führen. Möglichst geringe Eigenspannungen sind daher für hohe Bauteilqualitäten erstrebenswert. Das Vorkommen von Eigenspannungen in generierten Bauteilen wurde für die kontinuierliche und gepulste Bestrahlung vergleichend untersucht. Hierfür wurden unter Verwendung verschiedener Bestrahlungsregime Probenkörper für einen Cantilever-Test erzeugt. Die Abmessungen der entsprechenden Bauteile können Abbildung 47 entnommen werden. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 18 gegeben.

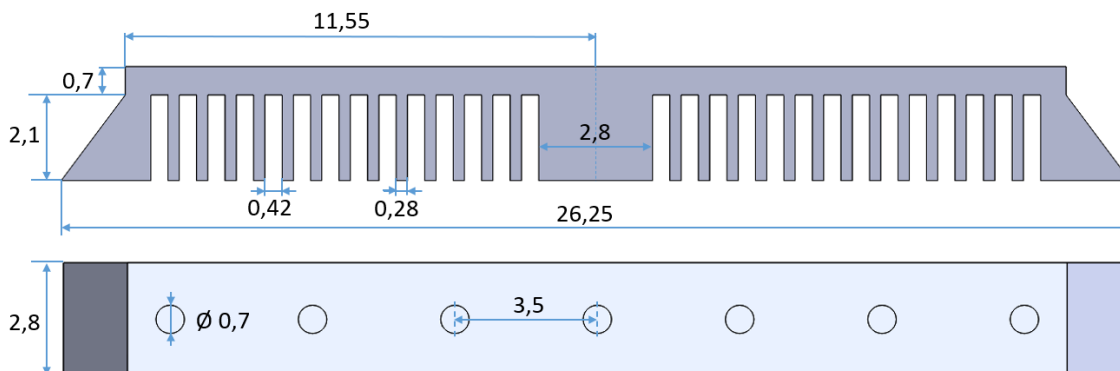


Abbildung 47: Maße der Probenkörper für den Cantilever-Test zur Untersuchung der Eigenspannungen. Angaben in mm.

Tabelle 18: Prozessparameter für den Aufbau der Probenkörper für den Cantilever-Test zur Untersuchung der Eigenspannungen.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	h_s (μm)	l_z (μm)
$\tau_H = 457\ \text{ns}$, $f_P = 0,5\ \text{MHz}$	40	3	23	4
$\tau_H = 229\ \text{ns}$, $f_P = 1\ \text{MHz}$				
$\tau_H = 171\ \text{ns}$, $f_P = 1,5\ \text{MHz}$				
$\tau_H = 132\ \text{ns}$, $f_P = 2\ \text{MHz}$				
cw				

Nach erfolgreichem Aufbau der Probenkörper wurden die Stützstrukturen vom Substrat getrennt, sodass die Probenkörper nur noch über den mittleren Pfeiler ($2,8\ \text{mm}$ Länge) mit dem Substrat verbunden sind. Aufgrund der enthaltenen Eigenspannungen kommt es zum

Verzug der Bauteile. Die Auslenkung wurde anschließend mittels Lasertriangulation vermessen. Die Messung erfolgte jeweils an den sieben markierten Messpunkten.

10.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Der Aufbau der Probenkörper konnte für alle fünf Bestrahlungsregime gewährleistet werden. Nach Trennen der Stützstrukturen vom Substrat ist bei allen Bauteilen eine geringe Auslenkung zu sehen (Abbildung 48). Das Vorhandensein von Eigenspannungen kann so für alle Proben bestätigt werden.

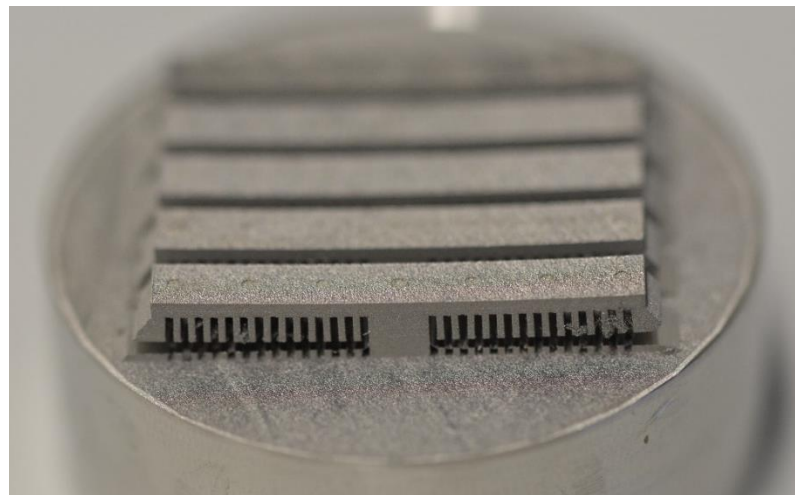


Abbildung 48: Probenkörper für den Cantilever-Test nach Trennen der Stützstrukturen vom Substrat.

Der Messpunkt 4, welcher sich jeweils mittig auf dem Probenkörper befindet, wurde als Referenzpunkt zur Berechnung der Auslenkung aus der mittels Lasertriangulation gemessenen Höhe genutzt. Abbildung 49 zeigt die Anordnung der Bauteile auf dem Substrat.

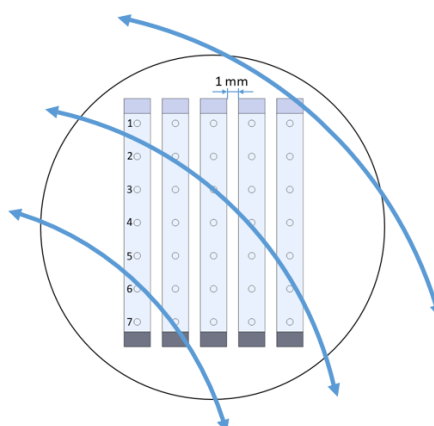


Abbildung 49: Anordnung der Cantilever-Proben auf dem Substrat. Blau markiert ist die Bewegung der Klinge zum Abziehen der Pulverschicht. Die unterschiedlichen Radien, mit welchen die Klinge das Substrat überstreicht besitzen Einfluss auf die Bauteilqualität.

Abbildung 50 gibt die an den verschiedenen Messpunkten ermittelten Auslenkungen wieder. Bei allen Probenkörpern wurde die maximale Auslenkung an Messpunkt 1 gemessen. Die Auslenkung am gegenüberliegenden Ende der Körper fällt insgesamt geringer aus. Dies kann auf die Ausrichtung der Bauteile im Bauprozess zurückgeführt werden. Am Messpunkt 1, welcher auf dem hinteren Teil der Bauplattform lokalisiert ist, bewegt sich die Klinge beim Pulveraufzug in einem größeren Radius über die Bauplattform als an Messpunkt 7. Dieser befindet sich im vorderen Bereich der Bauplattform und damit näher am Drehpunkt der Rakelachse. Durch die unterschiedlich großen Radien, mit denen die Klinge die Bauplattform überstreicht, kann es zu einem unterschiedlichen Pulveraufzug über die Bauplattform kommen. Im Bauprozess konnten Mängel im Pulveraufzug, wie Fehlstellen oder Pulveraufwürfe vor allem im vorderen Bereich beobachtet werden.

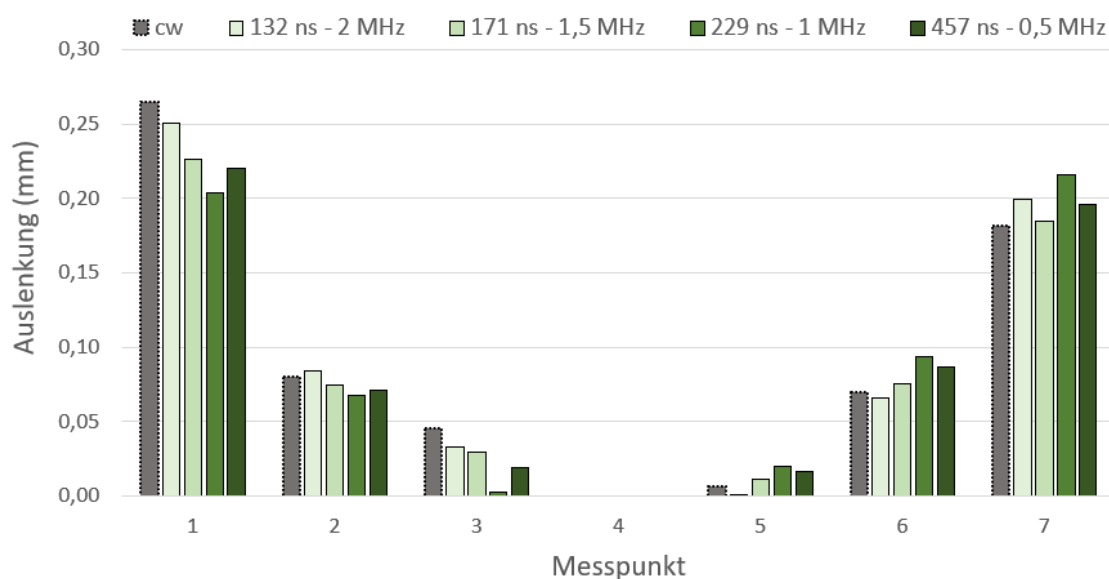


Abbildung 50: Ergebnisse des Cantilever-Tests. Auslenkung der Probenkörper an verschiedenen Messpunkten. Messung mittels Lasertriangulation.

Insgesamt sind keine signifikanten Unterschiede der Auslenkung zwischen den Bestrahlungsregimen gegeben. Demnach entstehen bei den gegebenen Prozessparametern auch ähnlich große Eigenspannungen für alle Bestrahlungsregime.

Für die Versuche wurde sich aus Gründen der Vergleichbarkeit für die Verwendung eines konstanten Parametersatzes für alle Bestrahlungsregime entschieden. Es muss jedoch beachtet werden, dass die verwendeten Prozessparameter für die kontinuierliche Bestrahlung nicht optimal sind und die Ergebnisse für geeignetere Parameter (höhere mittlere Laserleistung) abweichen können. Inwiefern sich die Eigenspannungen bei höheren Leistungen verändern, muss in künftigen Untersuchungen weiterführend betrachtet werden.

11 Strukturauflösung

11.1 Versuchsdurchführung

Hinsichtlich der erreichbaren Auflösungen zeigte sich in zahlreichen Untersuchungen in der Literatur eine bessere Eignung der gepulsten Strahlung. Im Vergleich zur kontinuierlichen Bestrahlung konnten höhere Auflösungen und geringere minimale Strukturbreiten erreicht werden. Da sich die meisten in der Literatur zu findenden Untersuchungen auf das Makro-SLM beziehen, war die Betrachtung des Verhaltens gepulster und kontinuierlicher Strahlung hinsichtlich der Auflösung im μ SLM von besonderem Interesse.

Hierfür wurden zunächst Einzelwände bei variierender Laserleistung und Scangeschwindigkeit unter Verwendung verschiedener Bestrahlungsregime erzeugt. Hiermit sollte der Einfluss der Prozessparameter auf die Strukturbreite untersucht werden. Der Aufbau erfolgte für 100 Schichten, was einer Bauhöhe von 400 μm entspricht. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Prozessparameter für den Aufbau von Einzelwänden zur Untersuchung des Einflusses von mittlere Laserleistung und Scangeschwindigkeit auf die Strukturbreite.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	l_z (μm)
$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$	30, 40	2, 3, 4	4
$\tau_H = 229 \text{ ns}$, $f_P = 1 \text{ MHz}$			
$\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$	30, 40, 50		
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$			
cw			

Um den Einfluss des Bestrahlungsregimes auf die Strukturbreite genauer beurteilen zu können, wurden zusätzlich bei konstanten Prozessparametern Einzelwände erzeugt. Erstmals wurde hier ein zusätzliches Regime mit $\tau_H = 229 \text{ ns}$ und $f_P = 0,5 \text{ MHz}$ verwendet. Dabei handelt es sich um ein im LMS übliches Bestrahlungsregime mit langer Pulspause. Um ein Verdrücken der Einzelwände durch Rakeleinwirkung zu verhindern, wurde um die Wände ein Schutzrahmen erzeugt. Der Abstand zwischen benachbarten Einzelwänden betrug 250 μm . Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 20 gegeben.

Tabelle 20: Prozessparameter für den Aufbau von Einzelwänden zur Untersuchung der Auflösung für verschiedene Bestrahlungsregime.

Bestrahlungsregime	P_{av} (W)	v_s (m/s)	l_z (μm)
$\tau_H = 229 \text{ ns}, f_P = 0,5 \text{ MHz}$	30	3	4
$\tau_H = 457 \text{ ns}, f_P = 0,5 \text{ MHz}$	40	3	4
$\tau_H = 229 \text{ ns}, f_P = 1 \text{ MHz}$			
$\tau_H = 171 \text{ ns}, f_P = 1,5 \text{ MHz}$			
$\tau_H = 132 \text{ ns}, f_P = 2 \text{ MHz}$			
cw			

Zunächst wurden die erzeugten Einzelwände mittels REM betrachtet. Anschließend wurden Querschliffe der Wände angefertigt und eine Messung der Wandstärken durchgeführt.

11.2 Ergebnisse und Diskussion

Mit allen verwendeten Parametersätze konnten Einzelwände erzeugt werden. Die mittels cw-Strahlung bei geringer mittlerer Leistung von 30 W und Scangeschwindigkeiten von 3 m/s und 4 m/s erzeugten Einzelwände erwiesen sich jedoch als sehr instabil und lösten sich beim Trennprozess für die Querschliffherstellung ab. Dies ist auf eine mangelhafte Anbindung der Wände aufgrund des geringen Energieeintrags bei kurzer Wechselwirkungszeit zurückzuführen.

Die Einzelwände weisen unabhängig vom Bestrahlungsregime wachsende Strukturbreiten mit geringerer Scangeschwindigkeit und höherer mittlerer Laserleistung auf. Dies stimmt mit den Beobachtungen der Einzelspuruntersuchungen überein. Abbildungen 51 und 52 zeigen den Einfluss beider Parameter. Ein signifikanter Unterschied zwischen der dargestellten gepulsten und kontinuierlichen Bestrahlung ist nicht zu erkennen.

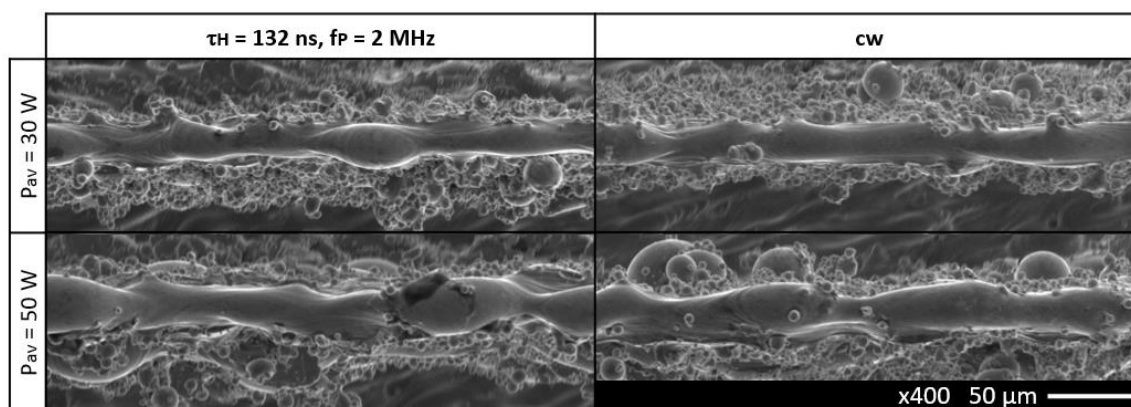


Abbildung 51: REM-Aufnahmen von Einzelwänden. Einfluss der mittleren Laserleistung auf die Strukturbreite. $v_s = 3 \text{ m/s}$.

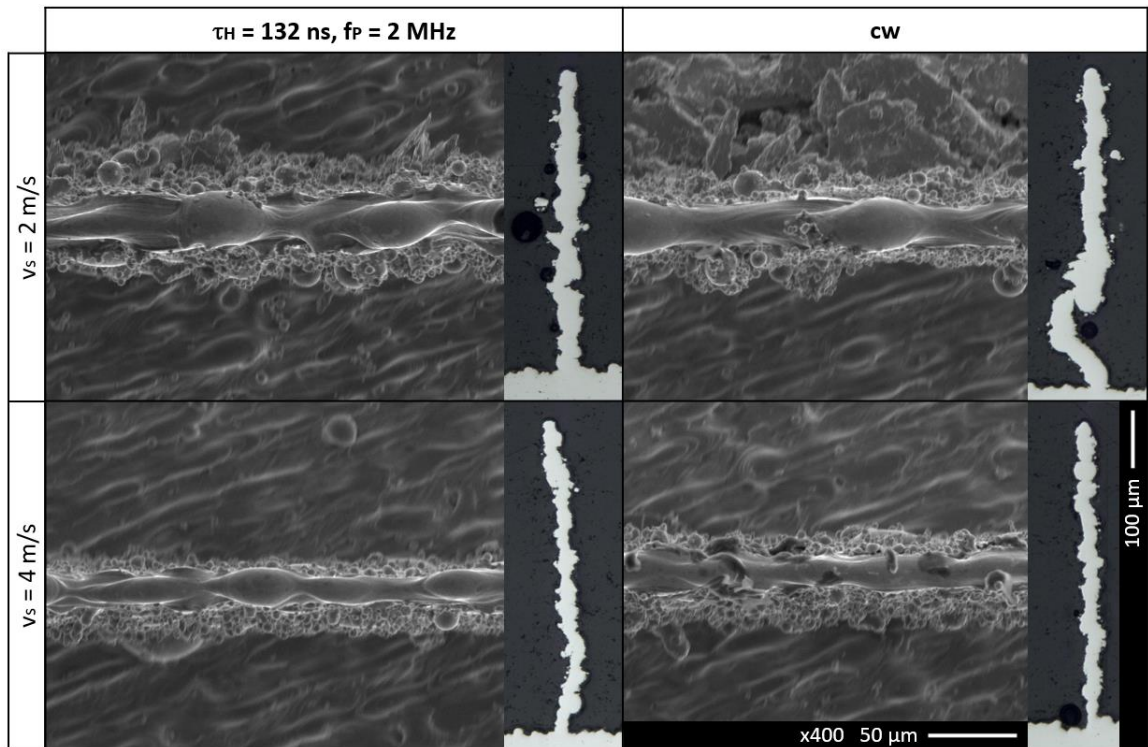


Abbildung 52: REM-Aufnahmen von Einzelwänden. Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Strukturbreite. $P_{av} = 40 \text{ W}$.

Mit höherer mittlerer Laserleistung nimmt das Schmelzbadvolumen und damit auch die Spurbreite zu. Mit steigender Scangeschwindigkeit verändert sich das Schmelzbad von einer breiteren, kurzen Form hin zu einer länglichen, schmalen Form. Damit sinkt die Schmelzspurbreite und Einzelwände mit geringer Wandstärke entstehen.

Ein Messen der Strukturbreiten war an den Einzelwänden aufgrund von Verdrückungen durch den Trenn- und Schleifprozess nicht möglich.

Ein Vergleich erzeugter Wandstärken für verschiedene Bestrahlungsregime erfolgte bei konstanten Prozessparametern. Die Messung der Strukturbreiten erfolgte jeweils an 10 Einzelwänden (Abbildung 53).

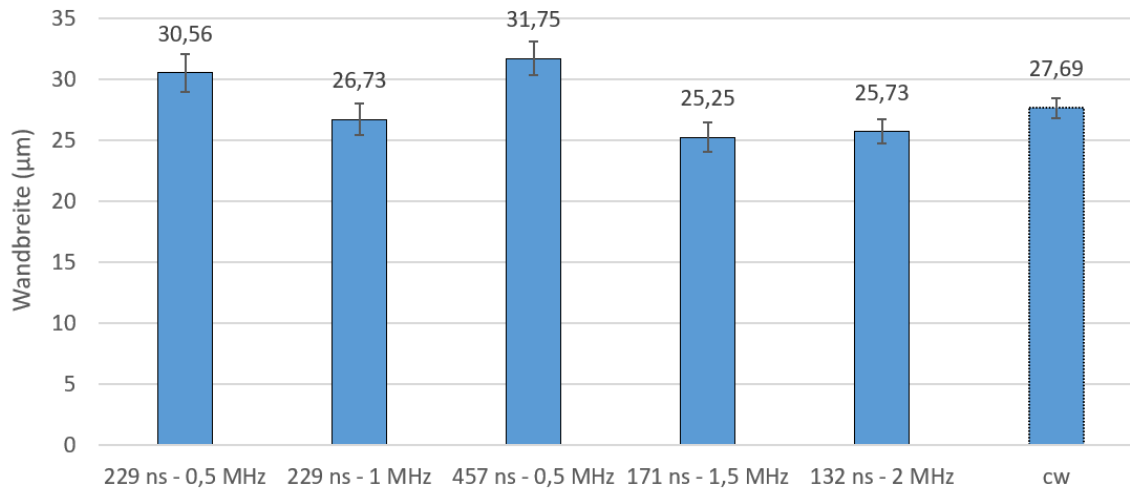


Abbildung 53: Vergleich der Wandstärken für verschiedene Bestrahlungsregime bei konstanten Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $l_z = 4 \mu\text{m}$). Mittelung aus je 10 Messungen.

Bei allen Bestrahlungsregimen wurden Wandstärken kleiner als der Fokusbereich gemessen. Die geringsten Strukturweiten wurden mit den Bestrahlungsregimen mit kurzer Pulspause erreicht. Mit kontinuierlicher Strahlung wurden größere Wandstärken erzeugt, wobei die Differenz lediglich gering ist.

Weitere Messungen der Wandstärke bei verschiedenen Prozessparametern wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Mit steigender mittlerer Leistung wird ein deutlicher Unterschied in erzielbaren Wandstärken zwischen gepulster und kontinuierlicher Strahlung vermutet. Bei beiden Bestrahlungsregimen wird die Wandstärke mit steigender Leistung zunehmen, wie bereits aus den durchgeführten Untersuchungen zum Aufbau von Einzelwänden zu erkennen ist. Da bei kontinuierlicher Bestrahlung jedoch eine größere WEZ besteht und der Anteil anhaftender Schmelzperlen mit steigender Leistung wächst (Vgl. Abbildung 33), werden größere Wandstärken im Vergleich zur gepulsten Bestrahlung erwartet.

12 Zusammenfassung und Ausblick

12.1 Zusammenfassung

Die Verwendung kurz gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung im μ SLM und deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften wurden umfassend untersucht. Um eine Annäherung der gepulsten an die kontinuierliche Bestrahlung zu realisieren, wurden verschiedene Pulsregime mit sinkender Pulspause genutzt. In Einzelspuruntersuchungen zeigte sich in Abhängigkeit der Streckenenergie ein unterschiedliches Verhalten zwischen kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung.

Bei Verwendung der gepulsten Bestrahlungsregime zeigte sich mit zunehmender Streckenenergie ein zunehmend instabiles Schmelzbad. Als wesentliche Einflussfaktoren bei Vergleich der gepulsten Bestrahlungsregime wurden wirkenden Pulsenergien bzw. Pulsspitzenintensitäten ermittelt. Mit kürzerer Pulspause waren aufgrund geringerer Pulsenergien höhere Streckenenergien für die Spurerzeugung möglich. Auch bei sehr geringen Pulsenergien in Verbindung mit hohen Pulswiederholraten konnten Schmelzspuren erzeugt werden. Der Einfluss von Pulsüberlapp und Wärmeakkumulation zeigte sich damit deutlich. Die Generierung gleichmäßiger und kontinuierlicher Schmelzspuren war gepulst nur bei sehr geringen Streckenenergien möglich.

Unter Verwendung kontinuierlicher Strahlung konnten regelmäßige und kontinuierliche Schmelzspuren bei Erreichen einer ausreichend hohen Streckenenergie erzeugt werden. Es zeigte sich eine zunehmende Stabilität des Schmelzbades bei steigender Streckenenergie.

Die Beobachtungen der Einzelspuruntersuchungen bei Bestrahlung einer Schicht konnten größtenteils auf den Strukturaufbau über 10 Schichten übertragen werden. Kontinuierliche Schmelzspuren stellten keine Voraussetzung für den Strukturaufbau dar. Diskontinuierliche, unregelmäßige Schmelzspuren eigneten sich ebenso.

Insgesamt zeigte sich ein sehr ähnliches Verhalten für die gepulste Bestrahlung mit kürzester Pulspause ($\tau_{\text{TH}} = 132 \text{ ns}$, $f_{\text{P}} = 2 \text{ MHz}$) und der kontinuierlichen Bestrahlung, womit eine Annäherung der gepulsten Strahlung an die cw-Strahlung durch Verkürzen der Pulspause bestätigt werden kann.

Dennoch bestehen, aufgrund der unterschiedlich großen Intensitäten, deutliche Unterschiede zwischen den Bestrahlungsregimen. Mit kontinuierlicher Bestrahlung lassen sich insbesondere höhere mittlere Laserleistungen umsetzen. Im Falle der gepulsten Bestrahlung ist dies durch starkes Verdampfen des Pulvermaterials nicht möglich.

Untersuchungen zum Hatch ergaben, dass bei gegebenem Fokusbereich ein geringer Hatch von 18 μm bis 23 μm zur Erzeugung sehr dichter Strukturen notwendig ist. Ein Größerer Hatch ist durch Senken der Scangeschwindigkeit und Erhöhen der mittleren Laserleistungen anwendbar. In den Versuchen konnten bereits erste Aussagen zur vertikalen Rauheit der Bauteile bei unterschiedlichen Bestrahlungsregimen getroffen werden. Mit zunehmender Leistung zeigte sich bei kontinuierlicher Strahlung eine starke Zunahme anhaftender Schmelzperlen. Gepulst konnte dagegen kein Einfluss der Leistung auf Menge anhaftender Schmelzperlen festgestellt werden.

Mit dem Aufbau von Volumenkörpern wurden die Erkenntnisse der Einzelspuruntersuchungen überprüft. Im Rahmen der untersuchten Prozessparameter wurde die höchste Bauteildichte von 99,95 % mit gepulster Bestrahlung erreicht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit kontinuierlicher Strahlung unter Verwendung höherer mittlerer Laserleistungen vergleichbare oder sogar höhere Dichten möglich sind. Für beide Bestrahlungsregime konnten limitierende Faktoren für den Aufbau von Volumenkörpern ermittelt werden. Bei cw-Strahlung sind nutzbare Prozessparameter durch Entstehung sehr glatter Oberflächen limitiert. Diese verursachen einen inhomogenen Pulveraufzug, welcher geringe Bauteilqualitäten bewirkt. Die Verwendung eines geringen Hatches von 18 μm war somit für die kontinuierliche Bestrahlung nicht nutzbar. Als Möglichkeiten zum Erhöhen der Rauheit wurde die Verwendung höherer Scangeschwindigkeiten und größerer Hatches bestimmt. Im Falle der gepulsten Bestrahlung wurden ausreichend hohe Oberflächenrauheiten mit allen untersuchten Parametern erreicht. Für die gepulste Bestrahlung zeigte sich dagegen eine Grenze nutzbarer mittlerer Laserleistungen durch wachsenden Pulveraufschub.

Hinsichtlich der erreichbaren Prozesseffizienz bietet die kontinuierliche Strahlung ein größeres Potential. Die Nutzung höherer Laserleistungen, welche gepulst aufgrund hoher Intensitäten und resultierendem Pulveraufschub nicht umsetzbar sind, ermöglichen auch die Verwendung höherer Scangeschwindigkeiten. Außerdem zeigten Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicke, dass mit kontinuierlicher Strahlung höhere Schichtdicken zur Erzeugung dichter Bauteile genutzt werden können.

Erste Untersuchungen zu Eigenspannungen in den Bauteilen zeigten bei Verwendung gleicher Prozessparameter keinen Unterschied zwischen der gepulsten und kontinuierlichen Bestrahlung.

Hinsichtlich der Strukturauflösung wurden, wiederum bei konstanten Prozessparametern, die geringsten Wandstärken mit gepulster Bestrahlung erreicht. Die Differenz zwischen den Bestrahlungsregimen war dabei jedoch sehr gering.

12.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten bereits einige Vermutungen getroffen werden, deren Überprüfung in weiteren Untersuchungen notwendig ist. Hierbei ist vor allem die Generierung höherer Bauteildichten bei höheren mittleren Laserleistung mittels cw-Strahlung zu nennen.

Auch der Einfluss der Bestrahlungsregime auf die vertikale Rauheit von Bauteilen sollte Thema weiterführender Untersuchungen sein, da hierbei ein wesentlicher Unterschied zwischen der gepulsten und kontinuierlichen Bestrahlung erwartet wird.

Auch die Betrachtung der Entstehung von Eigenspannungen bei unterschiedlichen Prozessparametern bietet sich für weitere Untersuchungen an.

Ebenso sollte die Strukturauflösung in weiteren Versuchen, insbesondere unter Verwendung verschiedener Scangeschwindigkeiten betrachtet werden. Interessant wäre hierbei die Umsetzbarkeit hoher Scangeschwindigkeiten bei gepulster und kontinuierlicher Bestrahlung. Die cw-Strahlung bietet die Möglichkeit der Verwendung höherer Leistungen, womit kürzere Wechselwirkungszeiten, aufgrund hoher Scangeschwindigkeiten, eventuell kompensiert werden können und somit höhere Geschwindigkeiten im Vergleich zur gepulsten Bestrahlung möglich sind. Durch eine starke Abhängigkeit der Schmelzspurbreite von der Scangeschwindigkeit sind hierbei geringere Strukturauflösungen zu erwarten.

Die Untersuchungen zeigten des weiteren Problematiken des verwendeten Rakelsystems auf. Eine Optimierung dieses Systems könnte durch einen verbesserten Pulveraufzug einen erheblichen Einfluss auf erzielbare Bauteileigenschaften haben.

Literatur

- [1] AMPOWER Report. *How Laser Beam Powder Bed Fusion became the leading metal technology*. Verfügbar unter <https://additive-manufacturing-report.com/technology/metal/laser-beam-powder-bed-fusion/#003> [abgerufen am 3. Dezember 2022].
- [2] Kruth, J. 1991. Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. *CIRP Annals*. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61136-6.
- [3] Yap, C. et al. 2015. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. doi: 10.1063/1.4935926.
- [4] Fischer, J. et al. 2014. *Micro Laser Melting: Analyses of Current Potentials and Restrictions for the Additive Manufacturing of Micro Structures*. doi: 10.26153/tsw/15661.
- [5] Exner, H. et al. 2003. Selective laser micro sintering with a novel process. In: Miyamoto, I. et al. [Hrsg.] *Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication*. SPIE. 145.
- [6] Regenfuss, P. et al. 2008. Laser micro sintering of ceramics - reaction models and results. In: *Ceramic Forum International/Ber. DKG. Vol. 85 No. 13*. 65-72.
- [7] Regenfuß, P. et al. 2007. Laser Micro Sintering – a Versatile Instrument for the Generation of Microparts. *Laser Technik Journal*. doi: 10.1002/latj.200790139.
- [8] Nagarajan, B. et al. 2019. Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives. *Engineering*. doi: 10.1016/j.eng.2019.07.002.
- [9] Di, W. et al. 2012. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-011-3443-y.
- [10] Jia, H. et al. 2021. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-021-06810-3.
- [11] Hu, Z. et al. 2019. Formation of SS316L Single Tracks in Micro Selective Laser Melting: Surface, Geometry, and Defects. *Advances in Materials Science and Engineering*. doi: 10.1155/2019/9451406.

- [12] Wei, Y. et al. 2022. Micro selective laser melting of SS316L: Single Tracks, Defects, microstructures and Thermal/Mechanical properties. *Optics & Laser Technology*. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107469.
- [13] Yang, T. et al. 2019. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.015.
- [14] Gao, F. und Sonin, A. 1994. Precise deposition of molten microdrops: the physics of digital microfabrication. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*. doi: 10.1098/rspa.1994.0037.
- [15] Khairallah, S. und Anderson, A. 2014. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder. *Journal of Materials Processing Technology*. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.001.
- [16] Le, T.-N. und Lo, Y.-L. 2019. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. *Materials & Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107866.
- [17] DebRoy, T. et al. 2018. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [18] Le, K. et al. 2019. On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process. *International Journal of Thermal Sciences*. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.105992.
- [19] King, W. et al. 2014. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005.
- [20] Laakso, P. et al. 2016. Optimization and Simulation of SLM Process for High Density H13 Tool Steel Parts. *Physics Procedia*. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.004.
- [21] Khorasani, A. et al. 2019. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. doi: 10.1016/j.addma.2018.09.002.
- [22] Greco, S. et al. 2020. Selective laser melting (SLM) of AISI 316L-impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density, and microhardness at constant input energy density. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-020-05510-8.

- [23] Mumtaz, K. und Hopkinson, N. 2009. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. doi: 10.1108/13552540910943397.
- [24] Abele, E. und Kniepkamp, M. 2015. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting. *Surface Topography: Metrology and Properties*. doi: 10.1088/2051-672X/3/3/034007.
- [25] Di Wang et al. 2016. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. doi: 10.1108/RPJ-06-2015-0078.
- [26] Li, Y. et al. 2018. Modeling temperature and residual stress fields in selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.001.
- [27] Liu, Y. et al. 2016. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-016-8466-y.
- [28] Yadroitsev, I. und Yadroitsava, I. 2015. Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping*. doi: 10.1080/17452759.2015.1026045.
- [29] Narvan, M. et al. 2021. Part deflection and residual stresses in laser powder bed fusion of H13 tool steel. *Materials & Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109659.
- [30] Demir, A. et al. 2017. From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-016-9948-7.
- [31] Xiang, Y. et al. 2018. Forming and defect analysis for single track scanning in selective laser melting of Ti6Al4V. *Applied Physics A*. doi: 10.1007/s00339-018-2056-9.
- [32] Li, R. et al. 2012. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-011-3566-1.
- [33] Biffi, C. et al. 2018. Continuous wave vs pulsed wave laser emission in selective laser melting of AlSi10Mg parts with industrial optimized process parameters: Microstructure and mechanical behaviour. *Additive Manufacturing*. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.021.

- [34] Caprio, L. et al. 2018. Comparative study between CW and PW emissions in selective laser melting [online]. *Journal of Laser Applications*. doi: 10.2351/1.5040631.
- [35] Caprio, L. et al. 2019. Influence of pulsed and continuous wave emission on melting efficiency in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.019.
- [36] Ke, L. et al. 2014. Effects of peak laser power on laser micro sintering of nickel powder by pulsed Nd:YAG laser. *Rapid Prototyping Journal*. doi: 10.1108/RPJ-09-2012-0084.
- [37] Ebert, R. et al. 2013. Investigation of cw and ultrashort pulse laser irradiation of powder surfaces: a comparative study. In: Xu, X. et al. [Hrsg.] *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVIII*. SPIE. 86070X.
- [38] Ullsperger, T. et al. 2021. Ultra-short pulsed laser powder bed fusion of Al-Si alloys: Impact of pulse duration and energy in comparison to continuous wave excitation. *Additive Manufacturing*. doi: 10.1016/j.addma.2021.102085.
- [39] Streek, A. et al. 2008. *Laser Micro Sintering – A Quality Leap through Improvement of Powder Packing*. doi: 10.26153/tsw/7273.
- [40] Regenfuss, P. et al. 2007. Principles of laser micro sintering. *Rapid Prototyping Journal*. doi: 10.1108/13552540710776151.
- [41] Schniedenharn, M. et al. 2013. Micro scale laser based additive manufacturing for metals. In: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Laser Institute of America. 661-666.
- [42] SPI Lasers - G4 Pulsed Fiber Laser Specification (SM-S00587_C_100W_A_EP_Z_specification). Datenblatt
- [43] Sandvik Osprey Ltd. - 316L. Abschnitt 3: Composition/Information on Ingredients. Datenblatt.
- [44] SPI Lasers - G4 Pulsed Fibre Laser V8 Interface Manual. S.10. Datenblatt
- [45] Erler, M. 2014. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Verfahren Micro Cladding. Masterarbeit.
- [46] Yuan, W. et al. 2020. Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser melting: Simulation and experiment. *Materials & Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108542.

-
- [47] Dong, Z. et al. 2018. Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Experimental Approaches. *Materials (Basel, Switzerland)*. doi: 10.3390/ma12010050.
- [48] Xia, M. et al. 2016. Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.07.010.
- [49] Ma, M. et al. 2015. Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.034.

Anlagen

A.1 Hatchuntersuchungen.....	A-I
A.2 Dichteuntersuchungen.....	A-III

Anlagen, A.1 Hatchuntersuchungen

Tabelle 21: Vollständige Ergebnisse der Hatchuntersuchungen. Nutzbarer Hatch in Abhängigkeit von Bestrahlungsregime, mittlerer Laserleistung und Scangeschwindigkeit.

Bestrahlungsregime	Pav (W)	v _s (m/s)	Hatch (µm)				
			18	23	28	33	38
$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$	30	2	✓	✓	✓	x	x
		3	✓	✓	x	x	x
		4	✓	x	x	x	x
	40	2	✓	✓	✓	✓	x
		3	✓	✓	✓	x	x
		4	✓	✓	✓	x	x
$\tau_H = 229 \text{ ns}$, $f_P = 1 \text{ MHz}$	30	2	✓	✓	x	x	x
		3	✓	x	x	x	x
		4	✓	x	x	x	x
	40	2	✓	✓	✓	x	x
		3	✓	✓	x	x	x
		4	✓	x	x	x	x
$\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$	40	2	✓	✓	✓	x	x
		3	✓	✓	x	x	x
		4	✓	x	x	x	x
	50	2	✓	✓	✓	✓	✓
		3	✓	✓	✓	x	x
		4	✓	✓	x	x	x
$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$	40	2	✓	✓	✓	x	x
		3	✓	✓	x	x	x
		4	✓	x	x	x	x
	50	2	✓	✓	✓	✓	✓
		3	✓	✓	✓	✓	x
		4	✓	✓	✓	x	x
cw	40	2	✓	✓	✓	✓	✓
		3	✓	✓	✓	x	x
		4	✓	✓	x	x	x
	50	2	✓	✓	✓	✓	✓
		3	✓	✓	✓	x	x
		4	✓	✓	x	x	x

Anlagen, A.2 Dichteuntersuchungen

A.2.1 Bildanalytische Dichtemessung

Tabelle 22: Ergebnisse der bildanalytischen Dichtemessung (Treppenstufen-Proben). Abhängigkeit der Dichte von mittlerer Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch bei verschiedenen Bestrahlungsregimen. Angabe der Mittelwerte aus je 3 Messungen und zugehörige Standardabweichungen σ .

			Relative Dichte (%)									
			$\tau_H = 457 \text{ ns}$, $f_P = 0,5 \text{ MHz}$		$\tau_H = 229 \text{ ns}$, $f_P = 1 \text{ MHz}$		$\tau_H = 171 \text{ ns}$, $f_P = 1,5 \text{ MHz}$		$\tau_H = 132 \text{ ns}$, $f_P = 2 \text{ MHz}$		cw	
P_{av} (W)	v_s (m/s)	h_s (μm)	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
40	4	28	98,10	0,12	98,17	0,16	98,02	0,15	98,34	0,18	98,99	0,16
		23	98,80	0,15	99,19	0,04	99,10	0,16	99,36	0,11	99,27	0,22
		18	99,15	0,04	99,38	0,17	99,34	0,17	99,45	0,14	98,67	0,54
30	3	28	99,17	0,08	98,17	0,30	98,13	0,26	98,96	0,13		
		23	99,47	0,12	98,64	0,20	99,22	0,09	99,24	0,07		
		18	99,75	0,03	99,43	0,10	99,66	0,09	99,55	0,11		
40	3	28	99,18	0,04	99,07	0,11	99,12	0,08	99,02	0,12	98,84	0,08
		23	99,49	0,05	99,50	0,11	99,54	0,07	99,60	0,06	99,72	0,08
		18	99,48	0,05	99,80	0,06	99,84	0,07	99,78	0,09	99,83	0,04
40	2	33	99,36	0,21	99,34	0,06	99,24	0,10	99,32	0,12		
50	4	28									99,34	0,12
		23									99,79	0,05
50	3	28									99,47	0,20

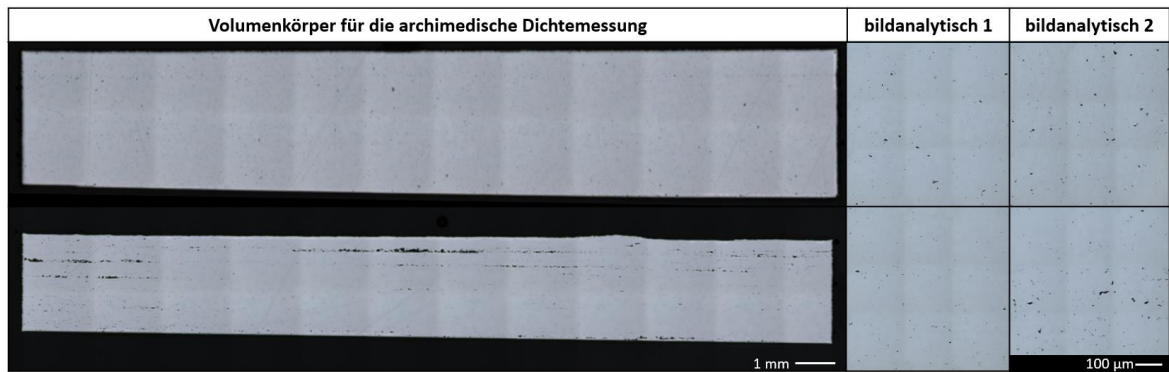
A.2.2. Vergleichende Querschliffaufnahmen

Abbildung 54: Querschliffaufnahmen entsprechend Tabelle 15 bei gleichen Prozessparametern ($P_{av} = 40 \text{ W}$, $v_s = 3 \text{ m/s}$, $h_s = 23 \text{ }\mu\text{m}$, $l_z = 4 \text{ }\mu\text{m}$). Oben: gepulste Bestrahlung ($\tau_H = 132 \text{ ns}$; $f_P = 2 \text{ MHz}$). Unten: cw-Strahlung. Bildanalytisch 1 zeigt Querschliff der Treppenstufen-Proben. Bildanalytisch 2 zeigt Querschliff der Volumenkörper für die archimedische Dichtemessung.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 09.12.2022

Laura Römer