
BACHELORARBEIT

Frau
Laura Römer

**Lasermikrosintern – Justage,
Charakterisierung und erste
Untersuchungen an einer
neuen Forschungsanlage**

Mittweida, 2021

BACHELORARBEIT

Lasermikrosintern – Justage, Charakterisierung und erste Untersuchungen an einer neuen Forschungsanlage

Autor:

Frau

Laura Römer

Studiengang:

Lasertechnik

Seminargruppe:

LT17w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. André Streek

Zweitprüfer:

Martin Erler, M.Sc.

Einreichung:

Mittweida, 29.01.2021

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2021

BACHELOR THESIS

Laser micro sintering – adjustment, characterization and first investigations on a new research plant

author:

Ms.

Laura Römer

course of studies:

Laser Technology

seminar group:

LT17w1-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. André Streek

second examiner:

Martin Erler, M.Sc.

submission:

Mittweida, 29.01.2021

defence/ evaluation:

Mittweida, 2021

Bibliografische Beschreibung:

Römer, Laura:

Lasermikrosintern - Justage, Charakterisierung und erste Untersuchungen an einer neuen Forschungsanlage.

- 2021. - 9, 48, 2 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2021

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung einer neuen Forschungsanlage für das Lasermikrosintern. Neben der Bestimmung räumlicher und zeitlicher Strahlparameter erfolgt eine Beurteilung der Dynamik des fortschrittlichen Galvanometerscanners. Die Erkenntnisse der Charakterisierung bilden die Grundlage für anschließende Untersuchungen zur Parameteroptimierung für die Erzeugung von Bauteilen mit hoher Dichte.

Inhalt

Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	3
2.1 <i>Verfahrensgrundlagen - Lasermikrosintern.....</i>	3
2.2 <i>Bearbeitung unter Schutzgas</i>	5
3 Anlagentechnik.....	7
3.1 <i>Laser</i>	7
3.2 <i>Scannereinheit und SCANahead Regelungstechnik.....</i>	7
3.3 <i>Rakelsystem und Bauraum</i>	8
4 Charakterisierung.....	10
4.1 <i>Strahljustage und -diagnose.....</i>	10
4.2 <i>Leistungsmessung</i>	14
4.3 <i>Pulsformen.....</i>	18
4.4 <i>Verzögerung zwischen Lasersignal und Laserpuls</i>	22
4.5 <i>Scannerdynamik.....</i>	23
4.5.1 <i>Manuelle Delaybestimmung</i>	23
4.5.2 <i>Auto-Delay-Funktion.....</i>	25
4.5.3 <i>Vergleich der Scannerdynamik mit und ohne Verwendung der Auto-Delay-Funktion.....</i>	26
5 Parameteroptimierung	28
5.1 <i>Vorversuche</i>	28

II	Inhalt
5.2	<i>Dichteuntersuchungen</i> 30
5.2.1	Stand der Technik am LHM..... 30
5.2.2	Versuchsaufbau 31
5.2.3	Probenpräparation und Dichtemessungen 33
5.2.4	Ergebnisse und Diskussion 36
5.3	<i>Zugversuch</i> 42
6	Zusammenfassung und Ausblick 47
6.1	<i>Zusammenfassung</i> 47
6.2	<i>Ausblick</i> 48
Literatur	49
Anlagen	51
Anlage I - Dichteuntersuchungen	A-I
Anlage II - Zugversuch	A-II
Selbstständigkeitserklärung	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des LMS-Prozesses.....	4
Abbildung 2: Verringerung der Prozesszeiten unter Verwendung der SCANahead Regelungstechnik im Vergleich zu konventionellen Regelungen.	8
Abbildung 3: Bauraum der Forschungsanlage mit zwei Rakelarmen mit je einem Pulverreservoir und einer Klingenhalterung.....	9
Abbildung 4: Strahlführung von der Faserauskopplung über die sechs Umlenkspiegel (ULS) bis zur Scannereinheit. ULS 6, Scanner und die daran angebrachte Fokussieroptik sind in z-Richtung beweglich.	10
Abbildung 5: Verschiedene Positionen des Strahlaufweiters (a,b) und finale Position der Plankonvexlinse (c) im Strahlengang zur Erzielung eines geringen Fokusedurchmessers bei hoher Strahlqualität. Dargestellt sind die Faserauskopplung, sowie die ersten drei Umlenkspiegel (ULS).	12
Abbildung 6: Intensitätsverteilungen an unterschiedlichen z-Positionen für den Aufbau mit Strahlaufweiter und Plankonvexlinse zum Vergleich der Asymmetrie des Laserstrahls. ...	13
Abbildung 7: Leistungsmessung zur Überprüfung der Leistungsstabilität des Lasers durch dreifache Messung am Faserausgang.....	14
Abbildung 8: Laserleistung in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe und des Messortes für den Aufbau mit Strahlaufweiter (orange) und mit Plankonvexlinse (grau).	15
Abbildung 9: Transmissionskurven im Wellenlängenbereich von 0 bis 4000 nm für UV- und IR-Quarzglas [4].	16
Abbildung 10: Grafische Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Leistung für Pulsformen mit Pulsdauern im Bereich von 250 ns bis 30 ns (Pulsdauer gemessen bei 10 % des Pulses).	16
Abbildung 11: Messanordnung zur Ermittlung der Pulsformen 0 bis 39 in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Pulswiederholfrequenz.....	18

Abbildung 12: Grafische Darstellung ausgewählter Pulsformen in Abhängigkeit ihrer Pulsdauer für die Pulswiederholfrequenzen 20 kHz (oben) und 1 MHz (unten).	19
Abbildung 13: Grafische Darstellung der Frequenzabhängigkeit von Pulsen mit ca. 200 ns Pulsdauer (Pulshalbwertsbreite).	21
Abbildung 14: Grafische Darstellung der ermittelten Beschleunigungsstrecken in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s bis 10 m/s.	24
Abbildung 15: Testfeld für die Delaybestimmung für 6 m/s Scangeschwindigkeit. a) Ondelaybestimmung; b) Offdelaybestimmung (Parameter: Startwert Ondelay: 1200 ms; Startwert Offdelay: 1100 ms; pro Scanlinie wurden beide Delays um 5 ms verlängert) ...	24
Abbildung 16: Testfeld zur feineren Anpassung der Laserdelays, sowie der Beschleunigungs- und Bremsstrecken für 3 m/s. a) Testfeld mit grob bestimmten Delays; b) angepasste Werte: es wurden Beschleunigungsstrecke, sowie On- und Offdelay verlängert.....	25
Abbildung 17: Vergleich zweier Testfelder, erzeugt mit 2 m/s Scangeschwindigkeit. a) mit Auto-Delay-Funktion der SCANahead-Regelung mit der RTC 6 Steuerkarte, b) ohne Auto-Delay, mit zuvor bestimmten Delays.	26
Abbildung 18: Vergleich der benötigten Zeit pro Schicht zur Erzeugung des gleichen Bearbeitungsergebnisses für den excelliSCAN 14, mit und ohne Verwendung der Auto-Delay-Funktion.....	27
Abbildung 19: Ungleichmäßige Pulverschichten durch alleinige Verwendung der Ringrakel und Verbesserung des Pulveraufzuges durch zusätzliches Abziehen der Pulverschicht mit einer Hartmetallklinge. a) Pulverschicht nach Bewegung der Ringrakel von links nach rechts über das Substrat; b) Pulverschicht nach Bewegung der Ringrakel von rechts nach links über das Substrat; c) Pulverschicht nach Abziehen in beide Richtungen mit einer Hartmetallklinge	28
Abbildung 20: Rakelprozess. Links: Rakelarme mit Pulverreservoir und Hartmetallklinge. Die Pfeile geben die Bewegung der Komponenten an (grün: Pulverreservoir, blau: Klinge). Rechts: Rakelstrategie für den Aufbau der Testwürfel aus Kapitel 5.2.	29
Abbildung 21: Anordnung der Testwürfel zur Dichteuntersuchung auf dem Edelstahlsubstrat mit 35 mm Durchmesser.	32

Abbildung 22: Schematische Darstellung einer Probe mit gekennzeichneten Trennlinien, senkrecht und waagrecht zur Rakelrichtung.	34
Abbildung 23: Dichtebestimmung; links: Originalbild des Querschliffs; rechts: selbe Aufnahme mit ImageJ bearbeitet (gelb: Messbereich).	34
Abbildung 24: Unterschiede der Schliffbilder nach dem ersten und zweiten Schliff.	35
Abbildung 25: Grafische Darstellung der relativen Dichten in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas. Zusätzlich ist die Standardabweichung der Dichtewerte dargestellt.	37
Abbildung 26: REM-Aufnahmen der Querschliffe mit Angabe der relativen Dichte für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas, sowie mit verbesserter Rakelstrategie für die beiden Hatches 35 μm und 40 μm . (600-fache Vergrößerung)	39
Abbildung 27: REM-Aufnahmen der Deckflächen, hergestellt unter Normal- und Schutzgasatmosphäre (100- und 600-fach vergrößert).	41
Abbildung 28: Aufbau der Zugproben. a) Anordnung der Proben auf dem Substrat. b) Abmessungen der aufgebauten Zugproben (Angaben in mm).	42
Abbildung 29: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuchs für beide Umgebungsatmosphären. Darstellung in Abhängigkeit der Positionierung der Proben auf dem Substrat bei der Herstellung.	43
Abbildung 30: Querschliffe der Zugproben nach dem Zugversuch (5-fache Vergrößerung).	45
Abbildung 31: Bruchkanten der Zugproben für beide Umgebungsatmosphären. Es ist keine Einschnürung der Proben zu erkennen.	A-II

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Laserdaten aus dem Datenblatt.	7
Tabelle 2: Ausgewählte Messwerte der Strahlvermessung für die Messung am Faserausgang und die Messungen mit Strahlaufweiter (Position 2) und Plankonvexlinse.	12
Tabelle 3: Maximale Leistung und Abschwächung für die Messung am Faserausgang, sowie am Bearbeitungsort für den Aufbau mit Strahlaufweiter und mit Plankonvexlinse.	15
Tabelle 4: Definierte kleinste Pulswiederholfrequenzen PRF0 zum Erreichen der maximalen Leistung für Pulsdauern von 241 bis 30 ns (Angaben aus dem Datenblatt des Lasers). .	17
Tabelle 5: Minimale und maximale Pulsdauern, gemessen bei 10 % und 50 % des Pulses, für die Frequenzen 20 kHz und 1 MHz.	20
Tabelle 6: Verzögerung zwischen Lasersignal und Laserpuls in Abhängigkeit der Frequenz.	22
Tabelle 7: Ermittelte On- und Offdelays mit zugehörigen Beschleunigungs- und Bremsstrecken für Scangeschwindigkeiten von 1 m/s bis 4 m/s.	25
Tabelle 8: Verwendete Parameter zur Untersuchung der Scannerdynamik ohne Nutzung der Auto-Delay-Funktion.	26
Tabelle 9: Konstante und variierte Parameter zur Erzeugung der Testkörper für die Dichteuntersuchungen.	33
Tabelle 10: Bereich der nutzbaren mittleren Leistung, Pulsenergien und VED für die Bearbeitung unter Normalatmosphäre und unter Schutzgasatmosphäre in Abhängigkeit des Hatches.	36
Tabelle 11: Sauerstoffanteil in den Proben erfasst mittels EDX, gemessen im Schliff und auf der Deckfläche. Angegeben sind der mittlere Sauerstoffgehalt und die Standardabweichung aus jeweils 6 Messungen.	40

Tabelle 12: Abweichungen der Dicken der Zugproben von der gewünschten Probendicke von 1 mm.	44
Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte aus dem Zugversuch mit Standardwerten nach DIN EN 10088-3 und Vergleichswerten der Firma 3D Micro Print.....	46
Tabelle 14: Erreichte relative Dichten in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Bearbeitung unter Normalatmosphäre und unter Schutzgasatmosphäre.....	A-I

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
LMS	Lasermikrosintern
SLM	Selektives Laserstrahlschmelzen (Selective Laser Melting)
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
LHM	Laserinstitut Hochschule Mittweida
ULS	Umlenkspiegel
UVFS	UV-Quarzglas (UV-Fused Silica)
UZS	Uhrzeigersinn
VED	Volumenenergiedichte
REM	Rasterelektronenmikroskopie
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

Formelverzeichnis

Formelzeichen	SI-Einheit	Beschreibung
w_p	m	Strahlradius vor der Fokussieroptik (Parallelstrahl)
M^2	-	Strahlgüte
λ	m	Wellenlänge
f	m	Brennweite der Fokussieroptik
w_0	m	Fokusradius
Q_p	J	Pulsenergie
P_{av}	W	mittlere Laserleistung
f_p	Hz	Pulswiederholfrequenz
E_V	J/m ³	Volumenenergiedichte
v_s	m/s	Scangeschwindigkeit
h_s	m	Hatch / Linienabstand
l_z	m	Schichtdicke

1 Einleitung

Die Nutzung laserbasierter additiver Fertigungsverfahren ermöglicht die Herstellung komplexer dreidimensionaler Bauteile nahezu ohne Einschränkungen bezüglich der Bauteilgeometrie. Aufgrund der zahlreichen Vorteile gegenüber konventionellen additiven Fertigungsverfahren haben lasergestützte Verfahren seit deren Entwicklung zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Mit dem Bestreben, kleinere Bauteilstrukturen und höhere Auflösungen zu realisieren, wurde das Verfahren des Lasermikrosinterns entwickelt. Unter Verwendung von gepulster Laserstrahlung und feinkörnigen Pulvermaterialien mit Korngrößen kleiner 10 μm können damit Bauteile mit einer Auflösung von 30 μm hergestellt werden.

Um die Verfahren für die Industrie zugänglich zu machen, bieten diverse Hersteller Laseranlagen für die additive Fertigung an. Der Einsatzbereich, sowie alle für die Bearbeitung notwendigen Daten hinsichtlich der Laserstrahleigenschaften, sind bei diesen kommerziellen Anlagen vom Hersteller vorgegeben. Im Gegensatz dazu werden in der Forschung häufig eigens konzipierte und aufgebaute Anlagen verwendet. Hierbei ist stets eine Charakterisierung der Anlage und deren Laserstrahleigenschaften notwendig. Da die Bearbeitung mittels Laser von vielen Faktoren wie der mittleren Laserleistung, der Pulswiederholfrequenz, der Pulsdauer und der Intensität abhängt, ist es erforderlich, die Möglichkeiten der Anlage bezüglich dieser Eigenschaften zu kennen. So wird beispielsweise bei der Charakterisierung der räumlichen Strahleigenschaften festgestellt, ob mit gegebenem Aufbau der Anlage der gewünschte Fokusradius zum Erzielen ausreichend hoher Intensitäten für den Prozess möglich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Eigenschaften einer neu aufgebauten Forschungsanlage für das Lasermikrosintern charakterisiert. Hierzu wurden die räumlichen Strahleigenschaften mittels Strahldiagnose, nach vorangegangener Strahljustage, ermittelt. Weiterhin wurde der Leistungsbereich des verwendeten Lasers in mehreren Leistungsmessungen hinsichtlich Leistungsstabilität und Frequenzabhängigkeit untersucht. Da es sich um einen gepulsten Laser mit der Möglichkeit der Wahl verschiedener Pulsformen handelt, erfolgte zudem eine Untersuchung dieser Pulsformen, um für spätere Bearbeitungsprozesse gezielt geeignete Pulsformen und -dauern wählen zu können.

Einen weiteren Schwerpunkt stellten Untersuchungen des neuen Galvanometerscanners dar. Da es sich hierbei um einen sehr schnellen Scanner mit neuartiger Regelungstechnik handelt, wurde die Scannerdynamik überprüft, um Vorteile bezüglich verkürzter Prozesszeiten einschätzen zu können.

Mit den Erkenntnissen aus der Charakterisierung der Anlage wurden anschließend erste Versuche zum Aufbau von Testkörpern durchgeführt. Hauptsächlich wurde hierbei die Realisierung möglichst hoher Bauteildichten untersucht. Zunächst wurden Parameter ermittelt, welche einen zuverlässigen Prozess ermöglichen. Der Aufbau der Proben erfolgte dabei vorerst unter Normalatmosphäre, wie es im Lasermikrosintern üblich ist. In weiteren Versuchen wurde anschließend der Einfluss eines inerten Schutzgases auf den Bearbeitungsprozess untersucht.

2 Stand der Technik

2.1 Verfahrensgrundlagen - Lasermikrosintern

Das Lasermikrosintern (LMS) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein schichtweiser Aufbau eines dreidimensionalen Werkstückes aus Pulvermaterial erfolgt. Entwickelt wurde das Verfahren 2003 am Laserinstitut Mittelsachsen e.V.

Bereits zuvor wurden Metallpulver mit dem Verfahren des selektiven Laserstrahlschmelzens (SLM), auch Laser Powder Bed Fusion (LPBF) genannt, zu dreidimensionalen Werkstücken verarbeitet. Während beim SLM vorwiegend Laser im cw - Betrieb zum Einsatz kommen, erfolgt die Bearbeitung beim LMS mit gepulsten Faserlasern mit üblichen Pulsdauern im Bereich von 200 ns. Eine weitere Abgrenzung des LMS vom herkömmlichen SLM besteht in der Verwendung feinkörnigerer Pulver.

Der grundlegende Prozessablauf der beiden Verfahren ist gleich. Abbildung 1 zeigt den LMS-Prozess schematisch. Ein Pulverreservoir stellt das für den Prozess notwendige Pulver zur Verfügung. Mithilfe einer Rakel wird eine Pulverschicht mit definierter Schichtdicke auf ein Substrat aufgezogen. Anschließend erfolgt die selektive Bestrahlung mit einem Laserstrahl. Die Pulverschicht wird aufgeschmolzen und durch anschließende rasche Abkühlung entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Bei der lokal begrenzten Einwirkung des Laserstrahls wird zudem das unterliegende bereits verfestigte Material zum Teil aufgeschmolzen, sodass eine Verbindung zwischen den einzelnen Schichten erzeugt wird. Im Anschluss wird das Substrat um einen definierten Betrag nach unten Verfahren und der Prozess wird wiederholt.

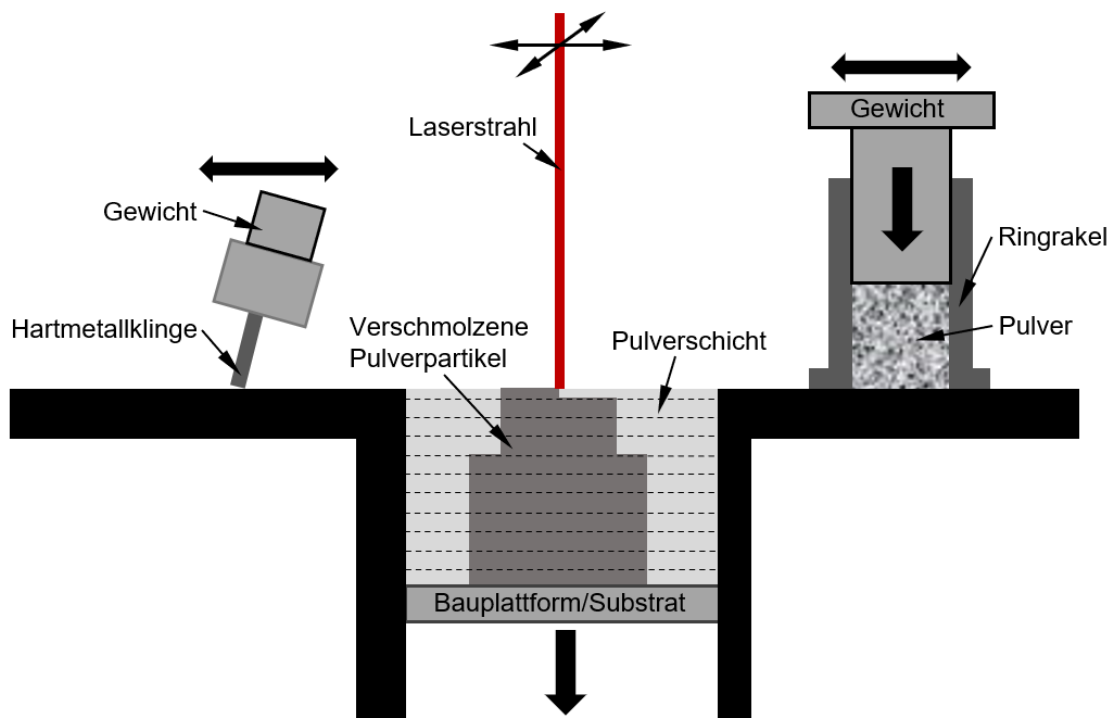


Abbildung 1: Schematische Darstellung des LMS-Prozesses.

Ziel des LMS als neues Verfahren war die Verbesserung der Auflösung gesinterter Werkstücke unter Verwendung von feinkörnigen Pulvermaterialien mit Korngrößen im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ und kleiner. Die Problematik hierbei besteht in der Handhabung des Pulvers. Je kleiner die Korngrößen, desto geringer ist die Packungsdichte des Pulvers, da die Kräfte zwischen den Partikeln die Gravitationskräfte überwiegen [6]. So besitzen Pulvermaterialien mit Korngrößen kleiner $10\ \mu\text{m}$ eine Packungsdichte von lediglich 20 %. Pulver mit Korngrößen zwischen $50\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ besitzen dagegen eine Packungsdichte von über 50 % [18]. Im konventionellen SLM sind Pulver mit Partikelgrößen zwischen $20\ \mu\text{m}$ - $50\ \mu\text{m}$ üblich [10]. Die notwendige Pulverdichte für den SLM-Prozess ist damit ohne weitere Maßnahmen gegeben. Für das LMS bedeutet das geringe Gewicht der kleineren Partikel, dass die Schwerkraft nicht ausreicht, um die für den Sinterprozess erforderliche Pulverdichte zu erreichen. Zudem neigen feinkörnige Pulver zur Agglomeration, was zusätzlich ein schlechtes Fließverhalten begünstigt [6]. Um das Pulver ausreichend zu verdichten, war daher eine Anpassung des Rakelprozesses notwendig. Eine mögliche Variante hierfür ist die Verwendung einer Ringrakel mit Gewicht zur zusätzlichen Verdichtung des Pulvers (siehe Abbildung 1). Um eine ebene Pulverschicht auf dem Substrat zu erzeugen wird diese zudem häufig mit einer Hartmetallklinge abgezogen.

Mit dem Verfahren des LMS konnten Auflösung und Oberflächenrauheit im Vergleich zu herkömmlichen laserbasierten additiven Fertigungsverfahren mit größeren Korngrößen um mehr als eine Größenordnung verbessert werden [5].

2.2 Bearbeitung unter Schutzgas

Für viele Verfahren der laserbasierten additiven Fertigung ist die Bearbeitung unter Schutzgasatmosphäre notwendig. Ein inertes Schutzgas, häufig Argon oder Stickstoff, verhindert chemische Reaktionen des erhitzten Pulvermaterials mit reaktiven Gasen der Umgebungsatmosphäre. Tritt während des Sinterprozesses Oxidation auf, so behindert diese eine zuverlässige Verbindung zwischen den einzelnen Pulverschichten. Eine Oxidschicht auf dem Substrat und der Oberfläche der Schmelze verhindert, dass die geschmolzene Pulverschicht die darunterliegende Schicht ausreichend benetzen kann. Die daraus resultierende schlechte Verbindung zwischen den einzelnen Schichten kann in Kombination mit der thermischen Belastung während des Prozesses zum Ablösen von Schichten und somit zu massiven Baufehlern führen [2].

Für die ersten Untersuchungen mittels LMS war eine strenge Überwachung der Prozessatmosphäre notwendig. Die zuerst verwendeten Pulvermaterialien mit Korngrößen im Submikrometerbereich weisen aufgrund ihrer großen Oberfläche im Vergleich zur Masse eine starke Reaktivität auf, weshalb der Sinterprozess üblicherweise unter Schutzgas durchgeführt wird. Die Verwendung von Pulvermaterialien mit Korngrößen im Bereich von 1 μm bis 10 μm ermöglichte die Bearbeitung unter Normalatmosphäre. Das Pulver zeigt eine deutlich geringere Anfälligkeit für die Oxidation. Zudem entsteht bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Pulvermaterial ein Plasma. Dieses dehnt sich schnell aus und schirmt somit das erhitzte Material während des Laserpulses vor der Umgebungsatmosphäre ab. Nach dem Kollaps des Plasmas ist das erhitzte Material bereits stark abgekühlt. Oxidation kann nur auftreten, wenn die verbleibende Energie die materialspezifische Aktivierungsenergie übersteigt. Da dies bei höheren Temperaturen wahrscheinlicher ist, tritt häufig kaum oder keine Oxidation beim LMS mit Korngrößen $> 1 \mu\text{m}$ auf [11].

Im direkten Vergleich zweier Teststrukturen aus 80Ni20Cr, erzeugt unter Normal- und unter Schutzgasatmosphäre, konnten *Regenfuss et al.* deutliche Differenzen bezüglich der strukturellen Auflösung nachweisen [12]. Unter Schutzgasatmosphäre konnte die Auflösung von 125 μm auf 60 μm verbessert werden. Bei beiden Proben war dabei keine Oxidation zu erkennen. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Bearbeitung unter Schutzgas, neben dem Verhindern der Oxidation, noch weitere positive Effekte auf das Bearbeitungsergebnis hat.

Während der Bearbeitung ist es notwendig, entstehende Abprodukte aus dem Wechselwirkungsbereich des Lasers zu entfernen und somit zu verhindern, dass sich diese auf dem Pulverbett oder bereits bestrahlten Flächen ablagern [8]. Erfolgt diese Beseitigung mangelhaft, so können Abprodukte, wie Schmelzspritzer oder Kondensate des Metaldampfes, mit deutlich größeren Partikelgrößen das Pulverbett verunreinigen und zu ungleichmäßigen Schichtdicken führen. Folglich kann es durch die variierende Schichtdicken zur fehlerhaften Verbindung der einzelnen Schichten kommen. Das Entfernen der Abprodukte kann durch eine Absaugung oder durch einen gerichteten Schutzgasstrom erfolgen.

Reijonen et al. konnten in Untersuchungen zum Verfahren LPBF Erkenntnisse zum Einfluss des Gasstromes auf die Porosität und Schmelzbadgeometrie gewinnen [14]. Unter anderem wurde eine Abnahme der Porosität mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Schutzgases festgestellt. Weiterhin ergab sich, dass mit sinkender Strömungsgeschwindigkeit die Tiefe des Schmelzbades abnimmt. Als Grund für diese Effekte wird die Wechselwirkung des Lasers mit dem Metaldampf, welcher bei der Bearbeitung entsteht, genannt. Beim Durchgang durch den Dampf wird der Laserstrahl durch Absorption, Reflexion und Streuung abgeschwächt, sodass die effektive Laserleistung, welche das Pulverbett erreicht, sinkt. Durch ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeiten des Schutzgases wird der Metaldampf aus der Wechselwirkungszone entfernt. Die auf dem Material auftreffende Laserleistung ist damit höher und es werden größere Schmelzbadtiefen und Bauteildichten erreicht. Untersuchungen dieser Eigenschaften im LMS sind bisher nicht bekannt.

3 Anlagentechnik

3.1 Laser

Die verwendete Forschungsanlage besitzt einen 20 W Multi Mode Faserlaser (JenLas® fiber ns 20 advanced) der Firma Jenoptik mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Der Laser kann sowohl im cw- als auch im Pulsbetrieb genutzt werden. Die Pulswiederholfrequenzen liegen im Bereich von 1 kHz - 1 MHz. Der Laser bietet die Möglichkeit zwischen 40 verschiedenen Pulsformen zu wählen. Die Pulsdauern reichen dabei laut Datenblatt von 3 ns - 490 ns (gemessen bei 10% des Pulses) [7]. Tabelle 1 fasst die wichtigsten Daten des Lasers zusammen.

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Laserdaten aus dem Datenblatt.

Maximale mittlere Leistung	20,7 W - 22 W
Wellenlänge	1064 nm
M²	1,6 - 2
Divergenz	95 mrad - 115 mrad
Frequenzbereich	1 kHz - 1 MHz
Bereich der Pulsdauern	3 ns - 490 ns
Maximale Pulsenergie	0,82 mJ - 0,89 mJ

Die Angaben aus dem Datenblatt des Lasers wurden in späteren Untersuchungen zur Charakterisierung der Anlage überprüft (Kapitel 4).

3.2 Scannereinheit und SCANahead Regelungstechnik

Das Ablenken des Laserstrahls erfolgt mit dem Galvanometerscanner excelliSCAN 14 der Firma Scanlab. Die Ansteuerung des Scanners erfolgt mittels RTC 6 - Ansteuerkarte. Die verwendete Fokussieroptik ist eine F-Theta-Optik (f-100C-1064) der Firma vonJan mit einer Brennweite von 100 mm. Der Fokusedurchmesser wurde in folgenden Betrachtungen untersucht und angepasst (Kapitel 4.1).

Der Scanner excelliSCAN 14 besitzt die sogenannte SCANahead Regelungstechnik. Diese ermöglicht eine volle Ausnutzung der Scannerdynamik, sowie eine sehr hohe Prozessgenauigkeit. Unabhängig von der Scangeschwindigkeit beschleunigt das System stets mit maximaler Beschleunigung. Hierfür wird in Echtzeit der Soll-Positionsverlauf im Voraus berechnet. Diesem kann die SCANahead-Regelung dann ohne Schleppverzug folgen. Im Vergleich zu konventionellen Scannersystemen mit Schleppverzug kann somit eine höhere Genauigkeit, beispielsweise durch geringere Abrundungen von Ecken oder präzises Abfahren von Kreisen, selbst bei hohen Kreisgeschwindigkeiten, erreicht werden.

Da die Scannerachsen immer maximal beschleunigen, werden zudem die notwendigen Beschleunigungs- und Abbremszeiten minimiert. Die damit einhergehende Verringerung der Laser-Off-Zeiten bewirkt eine deutliche Verkürzung der Prozesszeiten (Abbildung 2). Im Vergleich zu einem konventionellen System kann so beispielsweise bei einer Scangeschwindigkeit von 1 m/s die Laser-Off-Zeit um ca. 80 % reduziert werden [15,16].

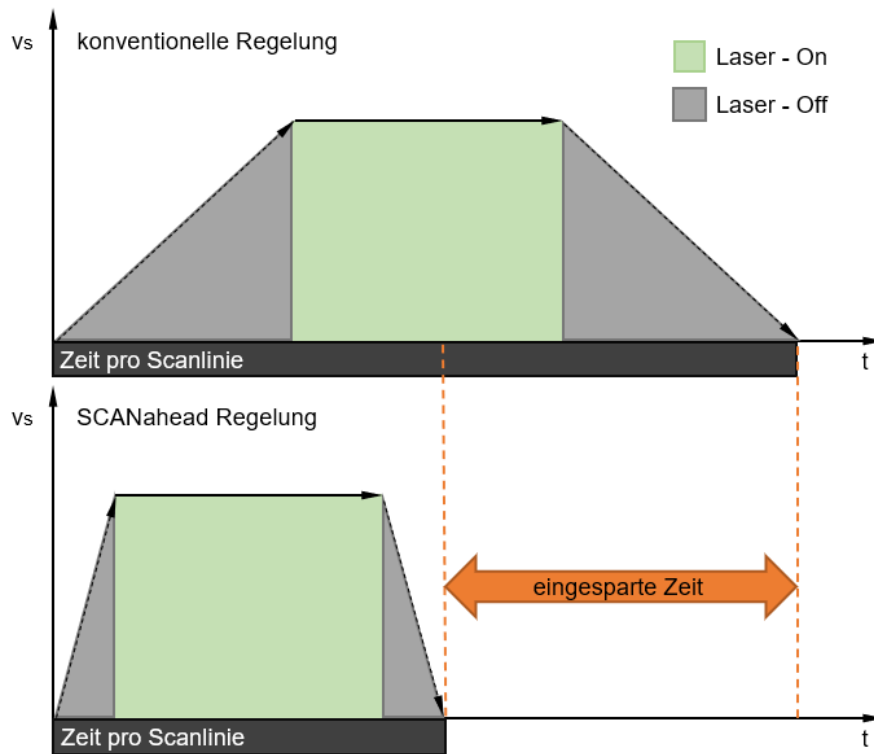


Abbildung 2: Verringerung der Prozesszeiten unter Verwendung der SCANahead Regelungstechnik im Vergleich zu konventionellen Regelungen.

Die Nutzung der SCANahead - Regelung in Verbindung mit der RTC 6 - Ansteuerkarte ermöglicht die Verwendung einer Auto-Delay-Funktion. Damit entfällt die Bestimmung der Laser- und Scannerdelays, da diese automatisch von der RTC 6 berechnet und gesetzt werden.

3.3 Rakelsystem und Bauraum

Der Bauraum der Anlage ist in Abbildung 3 zu sehen. Für den Pulveraufzug stehen zwei Rakelarme zur Verfügung, welche jeweils um 360° drehbar sind. An beiden Rakelarmen können beidseitig sowohl Pulverreservoir als auch eine Klingenhalterung befestigt werden. Den Untergrund bildet eine Keramikplatte. Als Bauplattform werden zylindrische Edelstahlsubstrate mit einem Durchmesser von 35 mm verwendet. Die Höhe der Bauplattform kann auf 0,5 µm genau eingestellt werden. Das Abziehen der Pulverschichten erfolgt durch eine Hartmetallklinge.

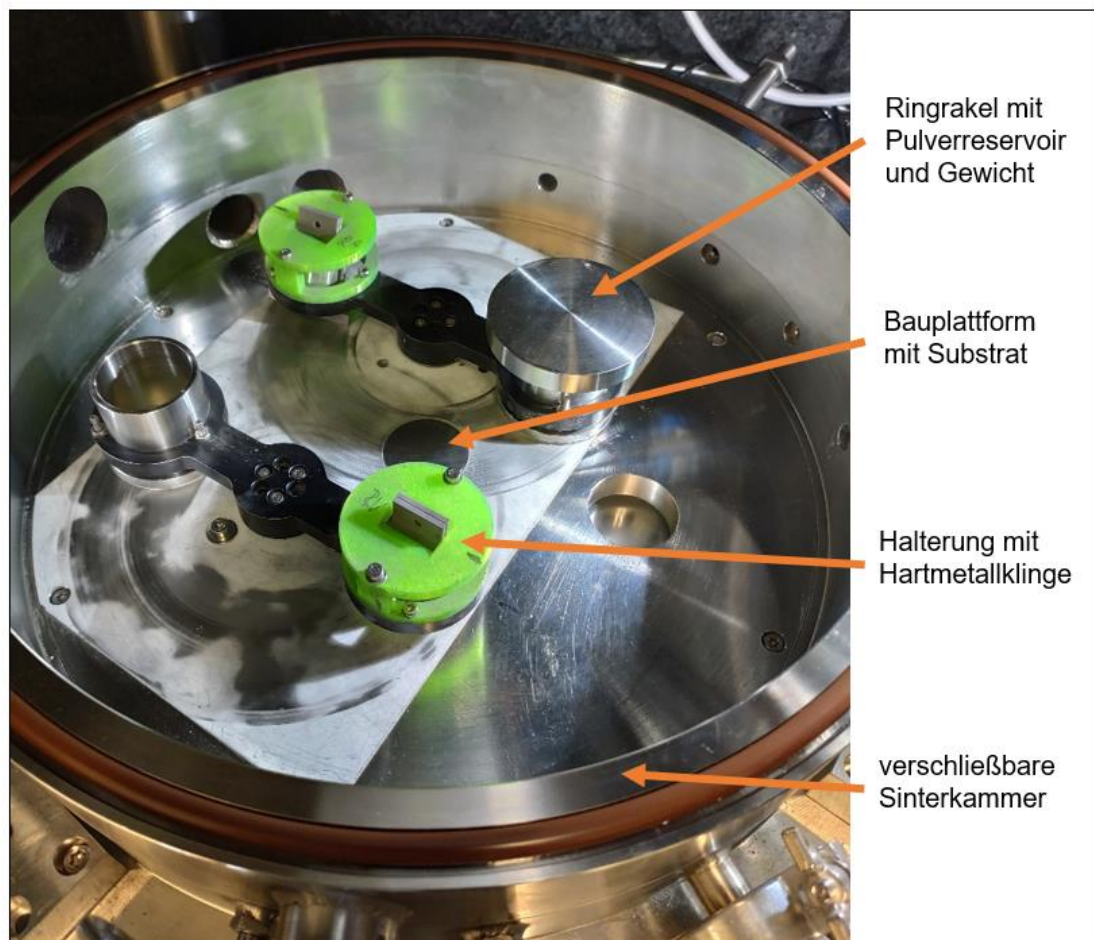


Abbildung 3: Bauraum der Forschungsanlage mit zwei Rakelarmen mit je einem Pulverreservoir und einer Klingenhalterung.

Um Versuche unter Schutzgasatmosphäre durchführen zu können, besitzt die Anlage eine Gasumwälzung. Als Schutzgas wird Argon verwendet. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Bauraum vor dem Fluten zu evakuieren, um so den Schutzgasverbrauch zu verringern.

4 Charakterisierung

4.1 Strahljustage und -diagnose

Zu Beginn der Untersuchungen an der Anlage erfolgte die Justage des Laserstrahls. Der Strahl wird von der Faserauskopplung über sechs Umlenkspiegel und zwei zusätzliche Spiegel im Galvanometerscanner zum Bearbeitungsort geführt (Abbildung 4). Ziel der Justage war es, dass der Laserstrahl in der optischen Achse der Fokussieroptik verläuft und sich die Strahlage bei Bewegung des Scanners entlang der z-Achse nicht verändert.

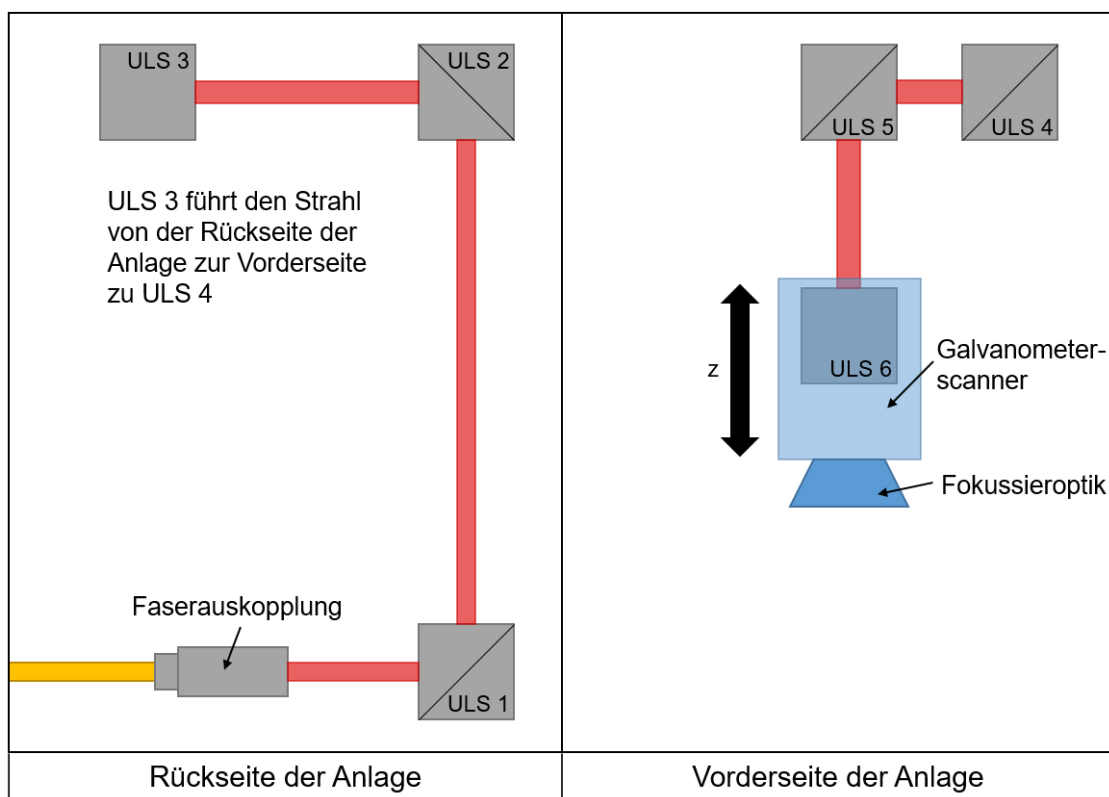


Abbildung 4: Strahlführung von der Faserauskopplung über die sechs Umlenkspiegel (ULS) bis zur Scannereinheit. ULS 6, Scanner und die daran angebrachte Fokussieroptik sind in z-Richtung beweglich.

In einem ersten Schritt wurde die Faserauskopplung so positioniert, dass der Laserstrahl mittig auf den ersten Umlenkspiegel traf. Über ein Verkippen des Spiegelsubstrates wurde der Strahl wiederum mittig auf den zweiten Umlenkspiegel ausgerichtet. Dieses Vorgehen wurde für alle sechs Umlenkspiegel wiederholt, bis das oben beschriebene Justageziel erreicht war. Anschließend wurde ein zusätzliches optisches Element zur Strahlformung (erst Strahlaufweiter, später Plankonvexlinse) in den Strahlengang eingebracht und nur darüber nachjustiert, bis der vorherige Zustand wiederhergestellt war.

Mithilfe einer Strahlvermessung sollten Aussagen über Strahleigenschaften, insbesondere den Fokusradius, sowie die Strahlqualität des Laserstrahls getroffen werden. Als Messgerät wurde der MicroSpotMonitor (MSM) der Firma PRIMES verwendet.

Ziel der Messungen war es, einen möglichst geringen Fokusradius bei hoher Strahlqualität zu erreichen. Die späteren Untersuchungen an der Anlage zum Aufbau von Volumenkörpern sollten mit den Ergebnissen einer weiteren Forschungsanlage für das Lasermikrosintern vergleichbar sein, weshalb deren Fokusradius von $w_0 = 11,5 \mu\text{m}$ angestrebt wurde. Um den geringen Fokusedurchmesser zu erreichen ist eine Aufweitung des Laserstrahles notwendig. Die notwendige Aufweitung wurde mithilfe der folgenden Formel unter Verwendung der Strahlgüte M^2 , der Wellenlänge λ und der Brennweite f der Fokussieroptik abgeschätzt.

$$w_P = \frac{M^2 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot w_0} \quad \text{Formel 1}$$

Als M^2 wurde sich für den laut Datenblatt schlechtesten Wert von 2 entschieden. Damit ergibt sich eine notwendige Aufweitung auf einen Strahlradius von $w_P = 5,98 \text{ mm}$.

Die erste Messung erfolgte am Faseraustritt, um den Rohstrahl beurteilen zu können. Die weiteren Messungen erfolgten am Bearbeitungsort mit Einfluss aller optischen Elemente im Strahlengang.

Bei den ersten Messungen wurde eine deutliche Divergenz des Laserstrahls, bereits beim Austritt aus der Faser, festgestellt. Im ersten Aufbau des Strahlenganges sollte die oben berechnete Aufweitung mittels Strahlaufweiter erreicht werden. Der verwendete Aufweiter ist nach dem Galilei-Prinzip aufgebaut. Er besitzt keinen Zwischenfokus, wodurch er für die Anwendung für Laserleistungen bis 100 W geeignet ist. Laut Datenblatt ist eine 8-fache Aufweitung möglich [9]. Die Anwendung des Strahlaufweilers stellte sich bei den Messungen jedoch als problematisch heraus. Er war nicht geeignet, um bei benötigter Aufweitung den Strahl noch ausreichend zu kollimieren. Der eintretende Rohstrahl ist für den Strahlaufweiter bereits zu divergent. Um den Aufweiter dennoch verwenden zu können, wurde dieser mit größerem Abstand zu Faserauskopplung neu positioniert (Abbildung 5). Mit dem damit verbundenen größeren Rohstrahldurchmesser sollte die benötigte Aufweitung verringert werden, wodurch die Kollimation des Aufweilers ausreichen sollte. Mit diesem Aufbau konnte ein Fokusradius von ca. $14 \mu\text{m}$ bei einer Strahlqualität von $M^2 = 1,98$ erreicht werden. Durch weitere Feineinstellung des Aufweilers konnte ein M^2 von 1,8 erzielt werden, jedoch mit größerem Fokusedurchmesser. Insgesamt erwies sich die Justage, durch den technischen Aufbau des Strahlaufweilers als sehr ungenau auf. Um dennoch einen geringen Fokusradius bei hoher Strahlgüte zu erreichen, wurde der Strahlaufweiter mit einer Plankonvexlinse ($f = 1500 \text{ mm}$) ersetzt. Der divergente Rohstrahl ist hierbei von Vorteil. Er wird durch die Linse kollimiert und durch die Wahl der Brennweite konnte schließlich ein geeigneter Rohstrahldurchmesser gewählt werden.

Eine Aufweitung auf den zuvor berechneten notwendigen Strahlradius von ca. 6 mm konnte mit der Linse jedoch nicht erreicht werden.

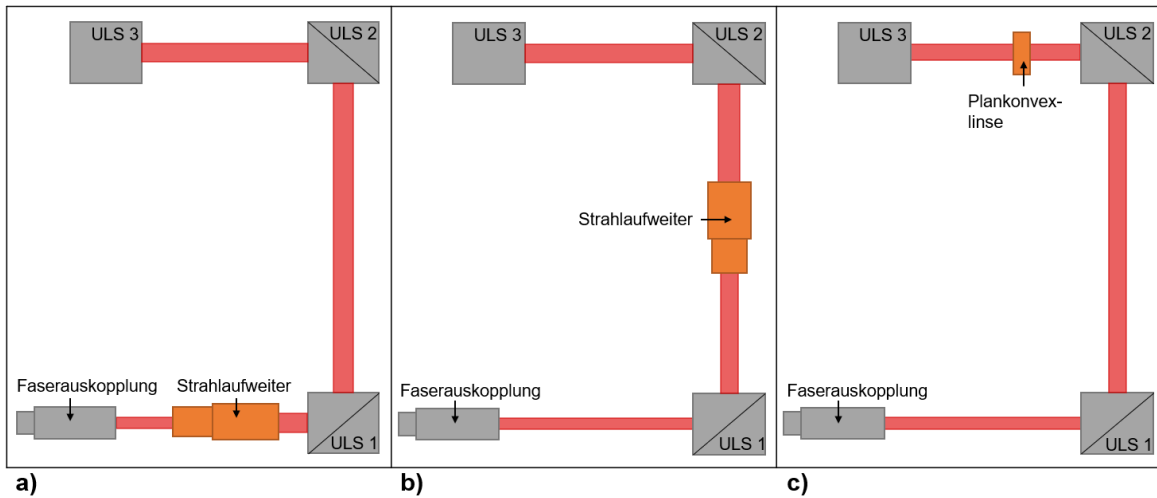


Abbildung 5: Verschiedene Positionen des Strahlaufweilers (a,b) und finale Position der Plankonvexlinse (c) im Strahlengang zur Erzielung eines geringen Fokusradius bei hoher Strahlqualität. Dargestellt sind die Faserauskopplung, sowie die ersten drei Umlenkspiegel (ULS).

Der Aufbau mit Plankonvexlinse ermöglichte einen Fokusradius von $16\text{ }\mu\text{m}$ bei $M^2 = 1,83$. Eine weitere Verringerung des Fokusradius bei gleichbleibend hoher Strahlqualität war mit den gegebenen optischen Elementen nicht möglich. Ausgewählte Messwerte der Strahldiagnose sind für die Messung an der Faser und die Messungen mit Strahlaufweiter und Plankonvexlinse in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ausgewählte Messwerte der Strahlvermessung für die Messung am Faserausgang und die Messungen mit Strahlaufweiter (Position 2) und Plankonvexlinse.

Messung	Fokusradius in μm	M^2	Divergenzwinkel in mrad	Fokus-Symmetrie (r_x/r_y)
Faserausgang	-	1,75	66,8	0,94
Mit Strahlaufweiter	13,82	1,98	96,8	1,02
Mit Plankonvexlinse	16,04	1,83	77,4	1

Zudem konnte mit dem Aufbau mit Plankonvexlinse die zuvor starke Asymmetrie des Strahles verringert werden. Abbildung 6 zeigt hierzu den Vergleich der Intensitätsverteilungen der Messungen mit Strahlaufweiter und Plankonvexlinse für verschiedene z-Positionen.

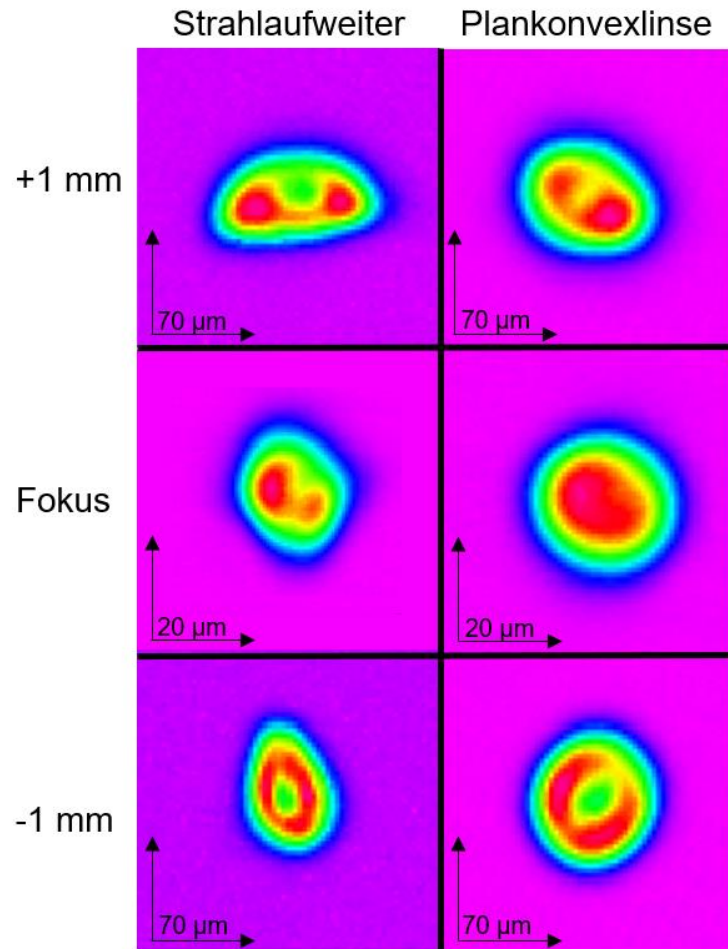


Abbildung 6: Intensitätsverteilungen an unterschiedlichen z-Positionen für den Aufbau mit Strahlaufweiter und Plankonvexlinse zum Vergleich der Asymmetrie des Laserstrahls.

Es ist deutlich zu erkennen, dass für den Aufbau mit Strahlaufweiter bereits bei geringer Defokussierung eine starke Abweichung in x- und y-Richtung auftritt. Es wird vermutet, dass der Grund hierfür im technischen Aufbau des Strahlaufweiters liegt. Bei größerer Aufweitung liegen die Linsen des Aufweiters nicht exakt in Achse, wodurch die Verformung des Strahls auftritt. Dies führt zu einer unerwünschten richtungsabhängigen Bearbeitung. Scanlinien in x- und y-Richtung weisen dabei unterschiedlich breite Schmelzspuren auf. Mit der Plankonvexlinse konnte ein nahezu rotationssymmetrischer Strahl erzeugt werden, wodurch bei der Bearbeitung keine Richtungsabhängigkeit mehr festgestellt werden kann. Aus diesem Grund wurde sich für folgende Untersuchungen für diese Variante des Strahlenganges entschieden.

4.2 Leistungsmessung

Parallel zur Strahlvermessung und den damit verbundenen Veränderungen im Strahlengang der Anlage, wurden mehrere Leistungsmessungen durchgeführt. Die Messung erfolgte mithilfe eines 300 W - Messkopfes (Coherent PM300F-50) und wurde sowohl am Faserausgang, sowie nach der Fokussieroptik am Bearbeitungsort durchgeführt. Mit den ersten Messungen sollte die Leistungsstabilität des Lasers beurteilt werden, wofür drei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten am Faserausgang durchgeführt wurden. Der Messaufbau blieb dabei unverändert. Abbildung 7 zeigt die Laserleistung in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe für diese drei Messungen.

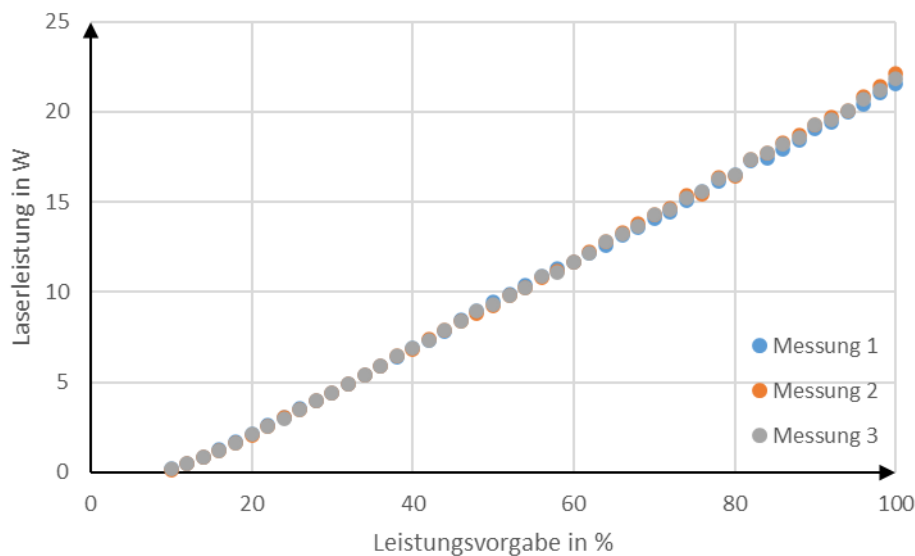


Abbildung 7: Leistungsmessung zur Überprüfung der Leistungsstabilität des Lasers durch dreifache Messung am Faserausgang.

Die Abweichungen zwischen den Messungen sind mit einer maximalen Standardabweichung von 0,17 W sehr gering. Die mittlere Standardabweichung liegt lediglich bei 0,06 W, sodass man von einer Leistungsstabilität des Lasers ausgehen kann.

Es folgte die Messung der Laserleistung am Bearbeitungsort. Dies ist wichtig für spätere Berechnungen der Leistung für die Versuchsdurchführung. Mit den Messungen konnte zudem die Abschwächung der Laserleistung durch die optischen Komponenten ermittelt werden. Eine sehr starke Abschwächung könnte Hinweis auf eventuelle Verunreinigungen der optischen Elemente sein. Weiterhin kann eine starke Abschwächung entstehen, wenn ein Teil des Strahles, beispielsweise durch unvollständiges Auftreffen auf einen Spiegel, abgeschnitten wird. Um dies auszuschließen erfolgten Messungen mit den verschiedenen optischen Komponenten im Strahlengang. Zunächst erfolgte die Leistungsmessung mit Strahlaufweiter. Nach Austausch des Aufweilers mit der Plankonvexlinse wurde die Messung am Bearbeitungsort wiederholt. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Messungen in Abhängigkeit des Messortes und der verwendeten optischen Komponenten.

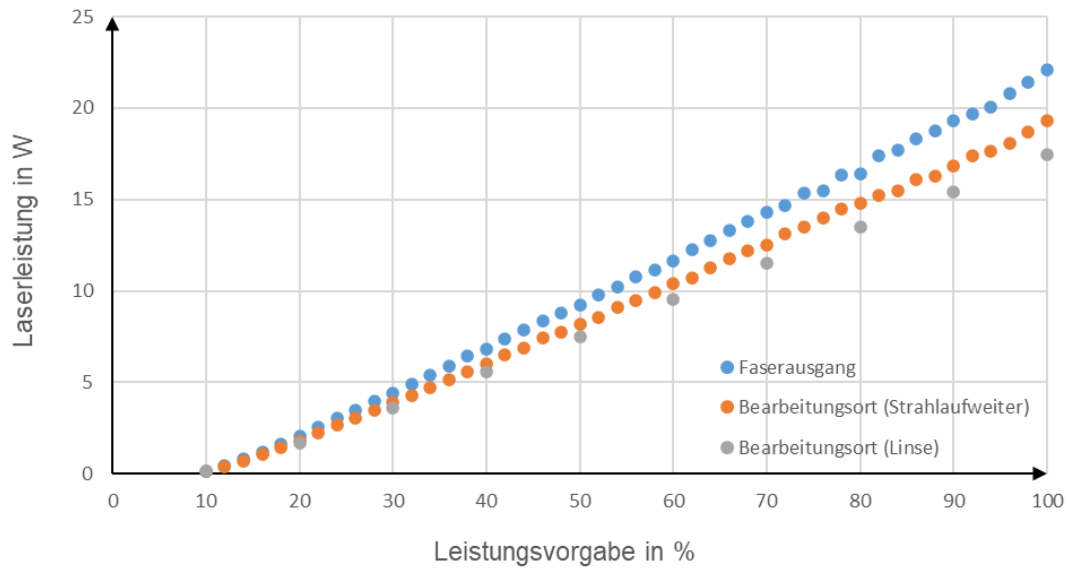


Abbildung 8: Laserleistung in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe und des Messortes für den Aufbau mit Strahlaufweiter (orange) und mit Plankonvexlinse (grau).

Für alle Messungen verhalten sich die Messwerte linear. Die maximalen Leistungen, sowie die Abschwächung durch die optischen Komponenten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Maximale Leistung und Abschwächung für die Messung am Faserausgang, sowie am Bearbeitungsort für den Aufbau mit Strahlaufweiter und mit Plankonvexlinse.

Messort	Maximale Leistung in W	Mittlere Abschwächung in %
Faserausgang	22,1	-
Bearbeitungsort mit Strahlaufweiter	19,3	12
Bearbeitungsort mit Plankonvexlinse	17,5	17

Während am Faserausgang eine maximale Leistung von 22,1 W gemessen wurde, sind die maximalen Leistungen am Bearbeitungsort mit 19,3 W für den Aufbau mit Strahlaufweiter und 17,5 W mit der Plankonvexlinse deutlich geringer. Die Abschwächung durch optische Elemente im Strahlengang ist somit beim Aufbau mit der Plankonvexlinse mit 17 % am stärksten. Da außer dem Austausch des Aufweiters mit der Linse keine Veränderungen am Aufbau des Strahlenganges vorgenommen wurden, muss die größere Abschwächung durch die Linse erzeugt werden. Entgegen dieser Messwerte wurde eine größere Abschwächung bei Verwendung des Strahlaufweiters erwartet, da dieser aus zwei Linsen besteht. Mit Verwendung der Plankonvexlinse wurde demnach die Anzahl der Linsen im Strahlengang und damit die Anzahl der zur Abschwächung beitragenden Komponenten verringert. Die starke Abschwächung kann lediglich aus einer erhöhten Absorption durch die Plankonvexlinse resultieren. Die Linse besteht aus UV-Quarzglas (UVFS), welches für gewöhnlich einen hohen Transmissionsgrad für die genutzte Wellenlänge von 1064 nm besitzt (Abbildung 9).

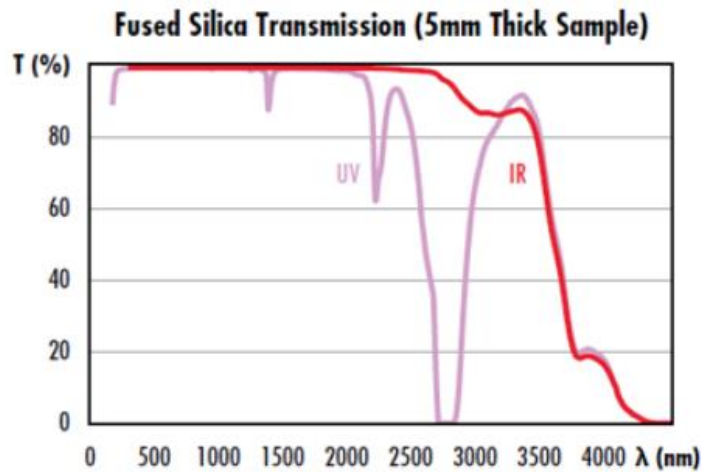


Abbildung 9: Transmissionskurven im Wellenlängenbereich von 0 bis 4000 nm für UV- und IR-Quarzglas [4].

Eine mögliche Erklärung für die verstärkte Absorption ist eine erhöhte Konzentration von Verunreinigungen im Quarzglas, welche durch den Fertigungsprozess der Linse entstehen kann. Der tatsächliche Grund der erhöhten Abschwächung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden. Trotz der erhöhten Abschwächung wurde final der Aufbau mit Plan-konvexlinse gewählt. Ausschlaggebend hierfür war die Realisierung einer richtungsunabhängigen Bearbeitung, welche nur mit der Linse, nicht aber mit dem Strahlaufweiter erreicht werden konnte.

Weiterhin wurde die Frequenzabhängigkeit der Leistung für verschiedene Pulsformen untersucht. Dabei wurden bei jeweils maximaler Leistungsvorgabe Frequenzen von 100 kHz bis 1 MHz in 100 kHz-Schritten, sowie die Frequenzen 50 kHz, 20 kHz und 10 kHz betrachtet. In Abbildung 10 sind die Abhängigkeiten von Frequenz und Leistung für ausgewählte Pulsformen grafisch dargestellt.

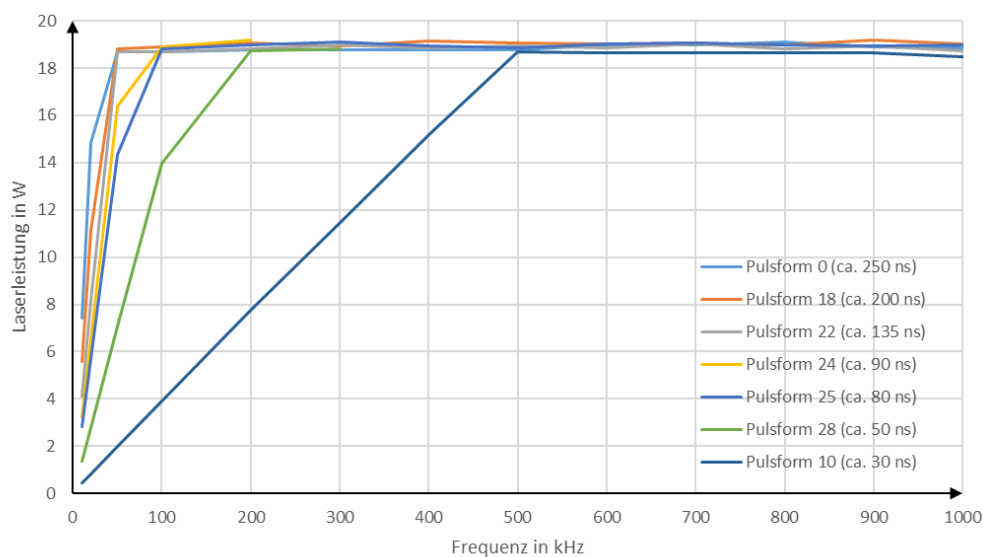


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Leistung für Pulsformen mit Pulsdauern im Bereich von 250 ns bis 30 ns (Pulsdauer gemessen bei 10 % des Pulses).

Für geringe Frequenzen nimmt die maximale Leistung stark ab. Mit sinkender Pulsdauer verschiebt sich diese Leistungsabnahme zu höheren Frequenzen. Während bei einer Pulsdauer von 250 ns die Leistungsabnahme für Frequenzen ab 20 kHz und kleiner auftritt, sinkt die Leistung bei einer Pulsdauer von 30 ns bereits ab einer Frequenz kleiner 500 kHz.

Grund hierfür ist eine Begrenzung der Pulsenergie durch den Laser. Die Pulsenergie Q_p kann mithilfe der mittleren Laserleistung P_{av} und Pulswiederholfrequenz f_p wie folgt berechnet werden.

$$Q_p = \frac{P_{av}}{f_p} \quad \text{Formel 2}$$

Mit sinkender Pulswiederholfrequenz wächst die Energie der einzelnen Pulse. Für jede Pulsform ist eine kleinste Pulswiederholfrequenz PRF_0 definiert, bei welcher die maximale Leistung erreicht wird. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die festgelegten PRF_0 für ausgewählte Pulsdauern.

Tabelle 4: Definierte kleinste Pulswiederholfrequenzen PRF_0 zum Erreichen der maximalen Leistung für Pulsdauern von 241 bis 30 ns (Angaben aus dem Datenblatt des Lasers).

Pulsdauer in ns (10 % Pulsbreite)	PRF_0 in kHz
241	23
202	27
131	34
90	43
80	45
50	61
30	90

Für Pulswiederholfrequenzen kleiner PRF_0 werden die Laserdioden moduliert, d.h. die Pulsenergie wird begrenzt, um eine Zerstörung des Lasers durch zu hohe Pulsenergien zu verhindern. Die Begrenzung der Pulsenergie bewirkt schließlich den Leistungsabfall bei kleinen Pulswiederholfrequenzen. Für kurze Pulsdauern wächst PRF_0 , weshalb hier der Leistungsabfall bereits bei höheren Pulswiederholfrequenzen beginnt.

Mit den durchgeführten Messungen konnten die Angaben aus dem Datenblatt des Lasers (Vgl. Tabelle 4) nicht bestätigt werden. Bei geringen Pulsdauern beginnt der Leistungsabfall aufgrund der Pulsenergiebegrenzung bereits bei deutlich höheren Pulswiederholfrequenzen als die angegebenen PRF_0 erwarten lassen.

4.3 Pulsformen

Der genutzte Laser bietet die Möglichkeit zwischen 40 verschiedenen Pulsformen zu wählen. Damit können Prozessparameter wie Pulsenergie, Pulsspitzenleistung und Pulsbreite auf den Bearbeitungsprozess angepasst werden. Um einen Überblick über die Charakteristiken der wählbaren Pulsformen geben zu können wurden diese in Abhängigkeit von Pulswiederholfrequenz und mittlerer Laserleistung ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 11 zu sehen. Eine Fotodiode zur Aufnahme des Lasersignals wurde hinter einem Umlenkspiegel platziert. Die dielektrischen Spiegel besitzen einen Reflexionsgrad $> 99\%$. Der sehr geringe transmittierende Anteil der Strahlung ist für die Signalaufnahme mittels Fotodiode ausreichend abgeschwächt.

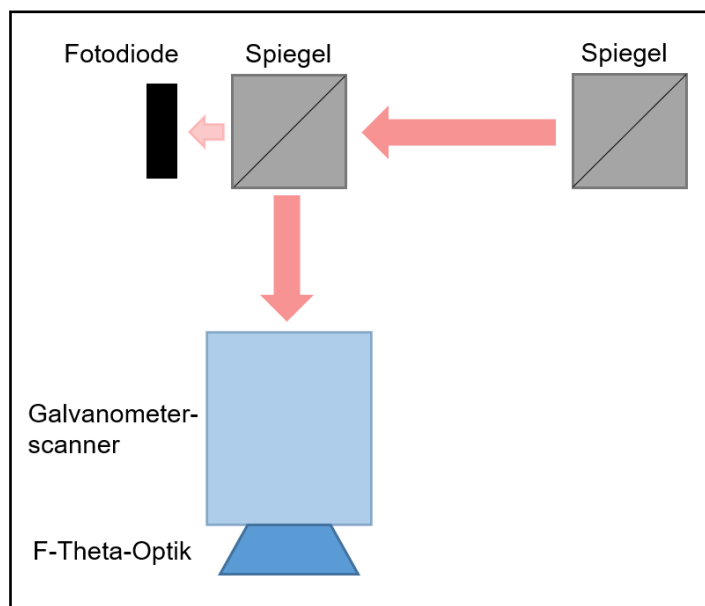


Abbildung 11: Messanordnung zur Ermittlung der Pulsformen 0 bis 39 in Abhängigkeit von mittlerer Laserleistung und Pulswiederholfrequenz.

Die verwendete Fotodiode besitzt eine Anstiegszeit kleiner 300 ps. Das Signal wurde mittels eines Oszilloskops (RIGOL MSO2302A) dargestellt und ausgewertet. Die Pulsformen 0 bis 39 wurden jeweils für die Frequenzen von 20 kHz und 1 MHz bei maximaler mittlerer Laserleistung (17,5 W) untersucht. In Abbildung 12 sind ausgewählte Pulsformen für die beiden verwendeten Frequenzen grafisch dargestellt.

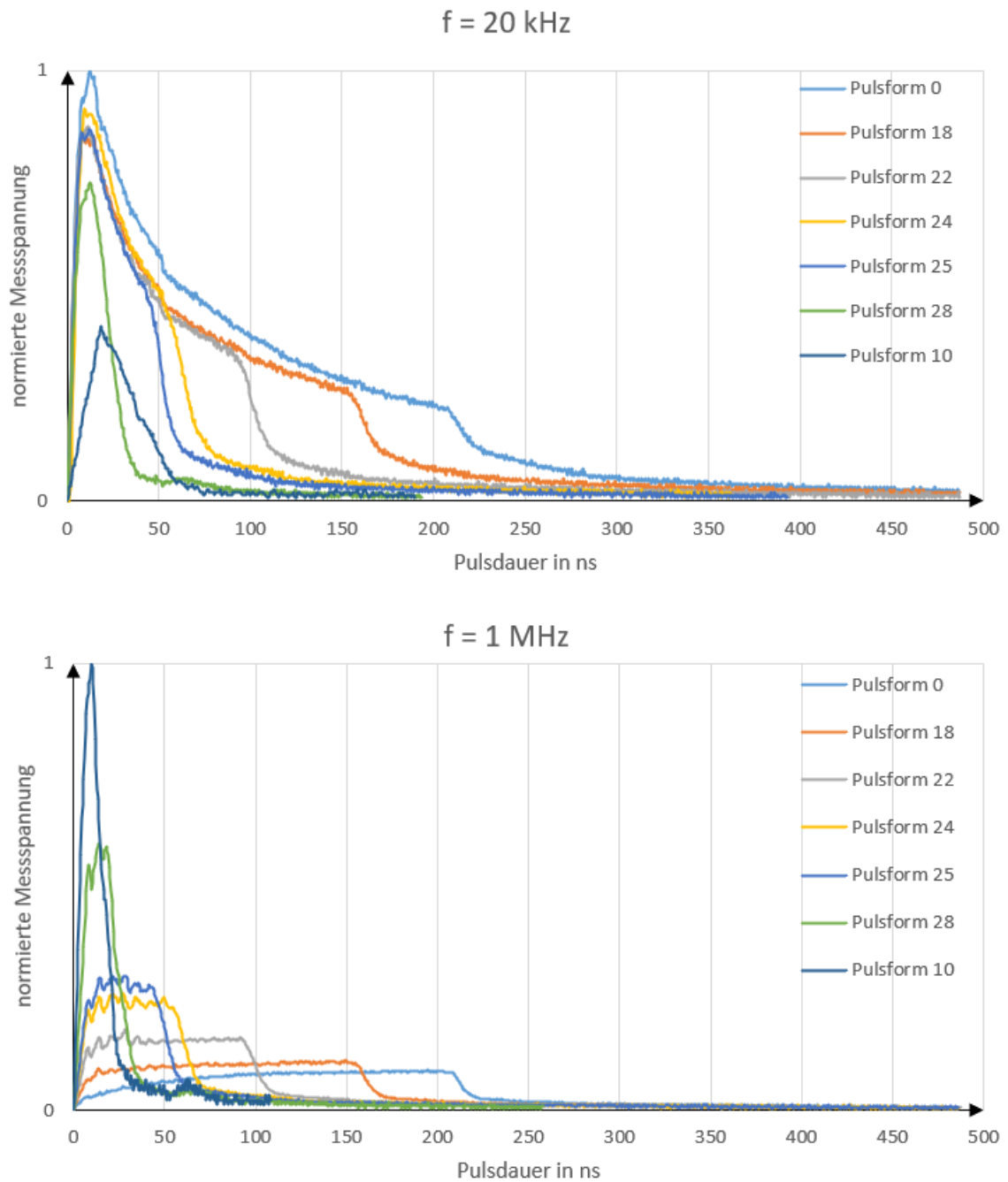


Abbildung 12: Grafische Darstellung ausgewählter Pulsformen in Abhängigkeit ihrer Pulsdauer für die Pulswiederholfrequenzen 20 kHz (oben) und 1 MHz (unten).

Die Pulsformen weisen bei den beiden Frequenzen ein unterschiedliches Verhalten auf. Bei hohen Frequenzen wächst mit sinkender Pulsdauer die Pulsspitzenleistung. Die Pulsenergie, gekennzeichnet durch die Fläche unter dem Graphen, bleibt demnach annähernd konstant. Bei der geringen Frequenz von 20 kHz sinkt dagegen mit abnehmender Pulsdauer die Pulsenergie.

Die Ergebnisse der frequenzabhängigen Leistungsmessung in Kapitel 4.2 haben bereits gezeigt, dass bei geringen Frequenzen die Pulsenergie vom Laser begrenzt wird, um zerstörende Pulse mit hohen Pulsenergien zu verhindern. Bei kürzerer Pulsdauer erfolgt diese Begrenzung bereits bei höheren Frequenzen. Die maximale Pulsenergie ist demnach bei sehr geringen Frequenzen für kürzere Pulse geringer. Dieses Verhalten ist in obiger Grafik nochmals zu erkennen.

Bei der hohen Pulswiederholffrequenz von 1 MHz erfolgt dagegen keine Begrenzung der Pulsenergie, weshalb diese unabhängig von der Pulsdauer bei konstanter mittlerer Laserleistung und Pulswiederholffrequenz ebenfalls konstant bleibt.

Die minimalen, sowie maximalen Pulsbreiten, gemessen bei 10 % und 50 % des Pulses, sind für beide Frequenzen in Tabelle 5 zusammengefasst. Üblich ist die Angabe der Pulshalbwertsbreite. Da jedoch die Werte aus dem Datenblatt des Lasers überprüft werden sollten und die Angabe der Pulsbreite dort bei 10 % des Pulses erfolgte, wurden auch in den Untersuchungen Pulsdauern bei 10 % aufgenommen. Hierbei ist anzumerken, dass es sich dabei lediglich um eine Schätzung der 10 % Pulsdauer handelt. Es ist nicht sicher festzustellen, ob es sich beim Auslaufen der Pulse (siehe Abbildung 12) um den tatsächlichen Pulsverlauf oder um ein langsames Entladen der Fotodiode handelt.

Tabelle 5: Minimale und maximale Pulsdauern, gemessen bei 10 % und 50 % des Pulses, für die Frequenzen 20 kHz und 1 MHz.

	10 % Pulsbreite in ns		Pulshalbwertsbreite in ns	
Frequenz in kHz	Min.	Max.	Min.	Max.
20	27	271	12,4	68,5
1000	31	250	11,5	201,5

Die im Datenblatt angegebenen Pulsdauern konnten mit den durchgeführten Messungen nicht bestätigt werden. Weder die minimale Pulsdauer von 3 ns noch die maximale Pulsdauer von 490 ns konnten gemessen werden. Für die weiteren Untersuchungen wurde sich daher bei der Wahl der Pulsform auf die eigenen Messungen bezogen.

Weiterhin wurde untersucht, ob eine Frequenzabhängigkeit der Pulsformen besteht. Abbildung 13 stellt dazu die Pulsform von Pulsen mit einer Pulsdauer von ca. 200 ns in Abhängigkeit der Frequenz grafisch dar.

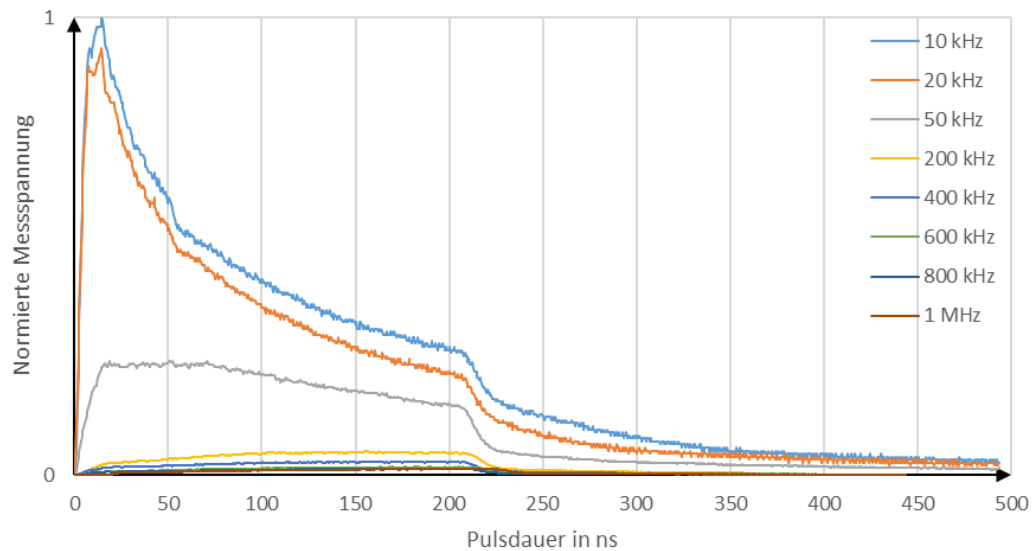


Abbildung 13: Grafische Darstellung der Frequenzabhängigkeit von Pulsen mit ca. 200 ns Pulsdauer (Pulshalbwertsbreite).

Mit sinkender Frequenz wächst entsprechend der Theorie die Pulsenergie. Es sind außerdem zunehmende Pulsüberhöhungen zu Beginn des Pulses zu erkennen. Für Frequenzen im Bereich von 200 kHz - 1 MHz sind kaum Veränderungen bezüglich der Pulsform festzustellen. Eine signifikante Frequenzabhängigkeit der Pulsform besteht somit nur für Frequenzen kleiner 200 kHz. Da im späteren Prozess vorwiegend höhere Frequenzen genutzt werden, ist die Pulsüberhöhung bei niedrigen Frequenzen nicht prozessrelevant.

Für folgende Bearbeitungsprozesse wurde sich für eine Pulsform mit einer Pulshalbwertsbreite von 201,5 ns entschieden. Dabei wurde sich an der Pulsdauer von 205 ns einer weiteren Forschungsanlage orientiert, um spätere Bearbeitungsergebnisse möglichst vergleichbar zu gestalten.

4.4 Verzögerung zwischen Lasersignal und Laserpuls

Mit derselben Messanordnung wie in Kapitel 4.3 wurde die Verzögerung zwischen Lasersignal und Laserpuls in Abhängigkeit der Frequenz gemessen (Tabelle 6). Dazu wurde das LaserOn-Signal und das mittels Fotodiode aufgenommene Signal auf dem Oszilloskop dargestellt. Die Messung wurde pro Frequenzwert mindestens 10-mal durchgeführt. Die Messung erfolgte zudem bei drei mittleren Laserleistungen (1,7 W; 7,5 W; 17,5 W). Die gemessenen Verzögerungen stimmen bei allen drei Leistungen überein. Die Verzögerung ist somit unabhängig von der mittleren Laserleistung.

Tabelle 6: Verzögerung zwischen Lasersignal und Laserpuls in Abhängigkeit der Frequenz.

Frequenz in kHz	Verzögerung in μs
1000	1,036
500	1,52
250	2,54
125	4,54
50	10,56
20	25,6
	15,7
	5,6

Mit sinkender Frequenz nimmt die Verzögerungszeit zu. Es können mehrere Gründe für das Auftreten der Verzögerungen genannt werden. Teils resultiert die Verzögerung aus dem zeitlichen Pulsabstand. Bei einer Frequenz von 1 MHz beträgt die Zeit zwischen zwei Pulsen 1 μs , was genau der gemessenen Verzögerung entspricht. Bei geringen Frequenzen ist der zeitliche Pulsabstand entsprechend größer, weshalb auch eine größere Verzögerung auftreten kann. Weiterhin benötigt die Elektronik Zeit zur Datenübertragung, weshalb es zwischen Ansteuerung des Lasers und dessen tatsächlicher Zuschaltung zu einer Verzögerung kommt.

Für eine Frequenz von 20 kHz variiert die Verzögerung zwischen drei Werten. Für Frequenzen größer 20 kHz blieb die Verzögerung während der 10 Messungen pro Frequenz konstant. Die Anlage arbeitet demnach für diesen Frequenzbereich pulssynchron. In späteren Untersuchungen werden ausschließlich Frequenzen größer 20 kHz verwendet. Es sind folglich keine Fehler durch variierende Verzögerungen zwischen Lasersignal und Laserpuls zu erwarten.

4.5 Scannerdynamik

4.5.1 Manuelle Delaybestimmung

Die Anlage besitzt mit dem excelliSCAN 14 einen neuen dynamischen Scanner. Dieser verspricht durch Nutzung der Auto-Delay-Funktion, welche Delays automatisch berechnet und setzt, eine deutliche Verringerung der Prozesszeiten. In folgenden Untersuchungen sollte überprüft werden, wie groß die Zeitersparnis durch die Anwendung der Auto-Delay-Funktion ist.

Um einen späteren Vergleich zwischen manuell und automatisch gesetzten Delays zu ermöglichen wurden zunächst On- und Offdelay für verschiedene Scangeschwindigkeiten bestimmt.

Ohne das Setzen geeigneter Delays, treten an Start- und Endpunkten von Bearbeitungsvektoren Einbrenneffekte auf. Die Scannerspiegel benötigen Zeit, um auf die Bearbeitungsgeschwindigkeit zu beschleunigen und am Ende eines Vektors wieder abzubremesen. Ohne geeignete Delays ist der Laserstrahl während der gesamten Scannerbewegung an. Das Ondelay verzögert das Einschalten des Laserstrahls so lange, bis die Scannerspiegel auf Bearbeitungsgeschwindigkeit beschleunigt haben. Analog verhindert das Offdelay die Entstehung von Einbrenneffekten am Endpunkt der Scanlinien, durch rechtzeitiges Ausschalten des Laserstrahls. Ein zu lang gewähltes Ondelay, sowie ein zu kurzes Offdelay bewirken ein Abschneiden von Teilen des Scanvektors.

Voraussetzung für die Bestimmung der Delays ist die Bestimmung der Beschleunigungs- und Bremsstrecken der Scannerspiegel. Hierfür wurden mit niedrigen Pulswiederholffrequenzen für Scangeschwindigkeiten von 1 m/s bis 10 m/s einzelne Scanlinien erzeugt. Haben die Scannerspiegel auf die Bearbeitungsgeschwindigkeit beschleunigt, so treten konstante Pulsabstände auf. Durch Messen der Pulsabstände konnten somit anschließend die Beschleunigungsstrecken ermittelt werden. Abbildung 14 zeigt die gemessenen Beschleunigungsstrecken in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit grafisch. Analog verringern sich während der Bremsbewegung der Spiegel die Pulsabstände. Die Bremsstrecken sind bei dem genutzten Scanner jedoch so gering, dass ein Messen nicht möglich war. Für folgende Anwendungen bei einer Scangeschwindigkeit von 1-2 m/s wurde eine Bremsstrecke von 100 μm angenommen.

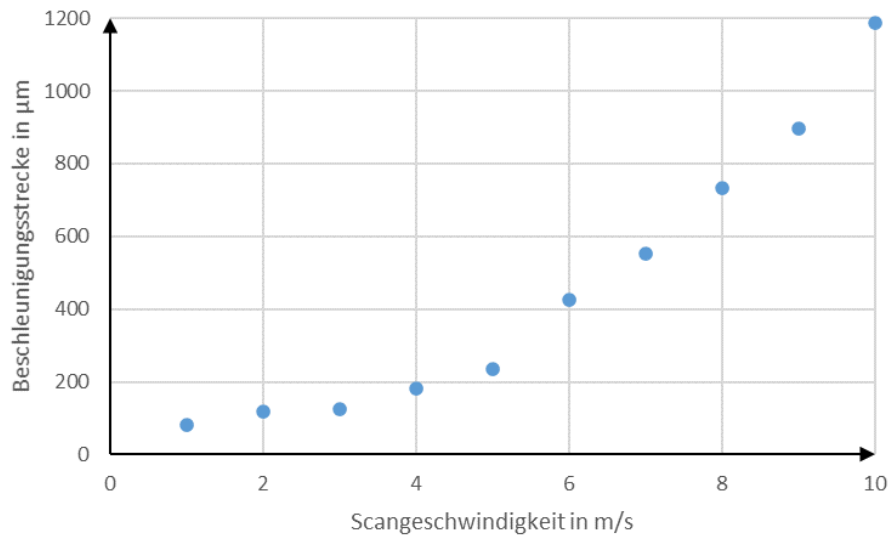


Abbildung 14: Grafische Darstellung der ermittelten Beschleunigungsstrecken in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s bis 10 m/s.

Die sehr kurzen Beschleunigungsstrecken weisen bereits darauf hin, dass es sich hierbei um einen sehr schnellen Scanner handelt.

Anschließend wurden die On- und Offdelays für verschiedene Scangeschwindigkeiten bestimmt. Abbildung 15 zeigt das Testfeld für 6 m/s. Die einzelnen Scanlinien wurden um die zuvor ermittelten Beschleunigungs- und Bremsstrecken erweitert. Als On- und Offdelay wurde der Wert gewählt, bei welchem die Scanlinie mit konstanten Pulsabständen an der zuvor definierten senkrechten Scanlinie beginnt bzw. endet.

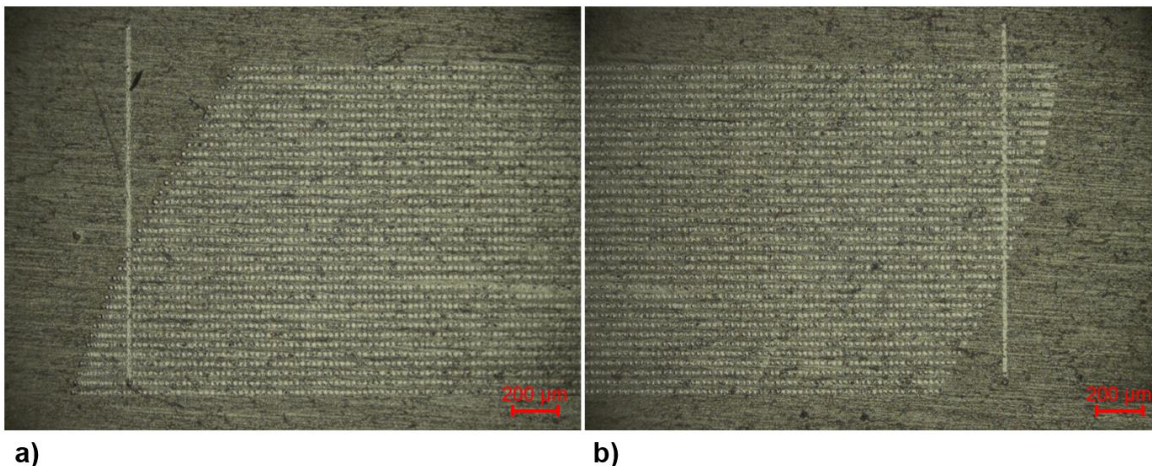


Abbildung 15: Testfeld für die Delaybestimmung für 6 m/s Scangeschwindigkeit. a) Ondelaybestimmung; b) Offdelaybestimmung (Parameter: Startwert Ondelay: 1200 ms; Startwert Offdelay: 1100 ms; pro Scanlinie wurden beide Delays um 5 ms verlängert)

Für die Scangeschwindigkeiten 1 m/s bis 4 m/s wurden die Delays mittels eines weiteren Testfeldes (Abbildung 16) noch genauer bestimmt. Hierbei wurden Beschleunigungs- und Bremsstrecken, sowie das On- und Offdelay angepasst, bis alle Start- und Endpunkte übereinstimmten.

Da für die späteren Prozesse lediglich die Verwendung geringer Scangeschwindigkeiten geplant war, erfolgten keine weiteren Delaybestimmungen für höhere Scangeschwindigkeiten.

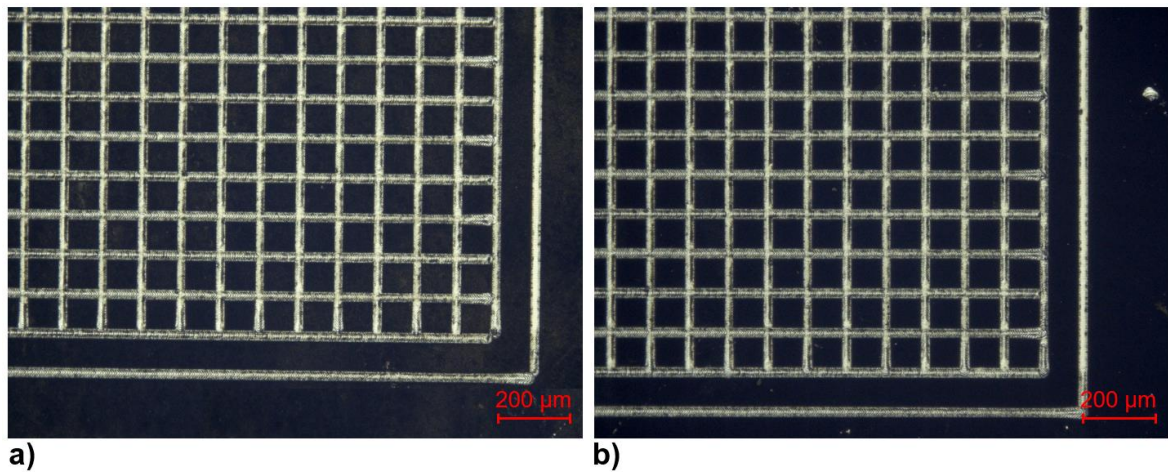


Abbildung 16: Testfeld zur feineren Anpassung der Laserdelays, sowie der Beschleunigungs- und Bremsstrecken für 3 m/s. a) Testfeld mit grob bestimmten Delays; b) angepasste Werte: es wurden Beschleunigungsstrecke, sowie On- und Offdelay verlängert

Die bestimmten On- und Offdelays mit zugehörigen Beschleunigungs- und Bremsstrecken sind für die Scangeschwindigkeiten von 1 m/s bis 4 m/s in Tabelle 7 gegeben. Auffällig sind hierbei die langen On- und Offdelays. Da die zuvor bestimmten kurzen Beschleunigungsstrecken bereits einen schnellen Scanner vermuten ließen, wurden ebenso kurze On- und Offdelays erwartet. Die Ursache der langen Delays konnte bisher nicht geklärt werden.

Tabelle 7: Ermittelte On- und Offdelays mit zugehörigen Beschleunigungs- und Bremsstrecken für Scangeschwindigkeiten von 1 m/s bis 4 m/s.

Scangeschwindigkeit in m/s	Ondelay in ms	Offdelay in ms	Beschleunigungsstrecke in μm	Bremsstrecke in μm
1	1320	1114	120	100
2	1265	1155	118	100
3	1271	1173	200	100
4	1268	1173	250	150

4.5.2 Auto-Delay-Funktion

Die vorhandene Auto-Delay-Funktion ermöglicht eine deutliche Vereinfachung des Bearbeitungsprozesses. Ohne diese Funktion müssen für jede verwendete Scangeschwindigkeit die Delays, sowie Beschleunigungs- und Bremsstrecken, wie im vorhergehenden Kapitel manuell ermittelt werden. Diese zeitaufwändige Arbeit entfällt mit Nutzung der Auto-Delay-Funktion. Im Folgenden wurde die Zuverlässigkeit der automatischen Delayberechnung untersucht und mit den in Kapitel 4.5.1 ermittelten Delays verglichen. Abbildung 17 zeigt ein Testfeld erzeugt unter der Nutzung der Auto-Delay-Funktion im Vergleich mit demselben Testfeld mit zuvor manuell bestimmten Delays.

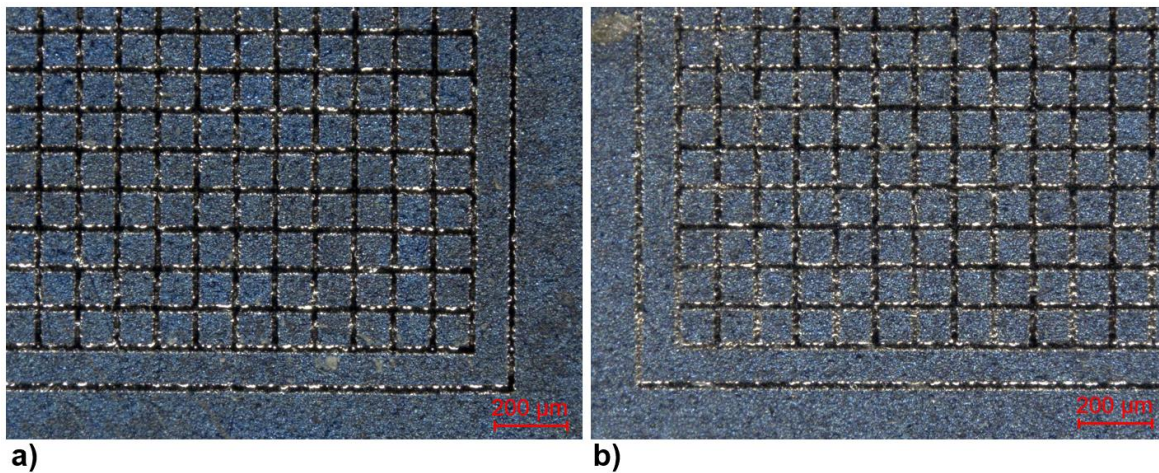


Abbildung 17: Vergleich zweier Testfelder, erzeugt mit 2 m/s Scangeschwindigkeit. a) mit Auto-Delay-Funktion der SCANahead-Regelung mit der RTC 6 Steuerkarte, b) ohne Auto-Delay, mit zuvor bestimmten Delays.

Die Testfelder weisen keine erkennbaren Unterschiede auf. Auch für weitere getestete Scangeschwindigkeiten erfolgte die Berechnung der Delays zuverlässig.

4.5.3 Vergleich der Scannerdynamik mit und ohne Verwendung der Auto-Delay-Funktion

Weiterhin sollte die Dynamik des Scankopfes hinsichtlich der Bearbeitung mit und ohne Nutzung der Auto-Delay-Funktion untersucht werden. Für beide Varianten wurde ein Testfeld für 1000 Schichten abgearbeitet. Das Testfeld bestand dabei aus einem Würfel mit 5 x 5 mm Bestrahlungsfläche. Die Scanlinien wurden für die Messung ohne Auto-Delay-Funktion um die zuvor bestimmten Beschleunigungs- und Bremsstrecken erweitert. Auch das On- und Offdelay wurde entsprechend der vorangegangenen Untersuchungen gesetzt. In Tabelle 8 sind die verwendeten Delays und Beschleunigungs- und Bremsstrecken aufgeführt. Für Poly-, Jump- und Markdelay wurden übliche Werte von vergleichbaren Anlagen angenommen. Diese sollten für ein bestmögliches Bearbeitungsergebnis noch optimiert werden.

Tabelle 8: Verwendete Parameter zur Untersuchung der Scannerdynamik ohne Nutzung der Auto-Delay-Funktion.

Parameter	Anlage (Scankopf)	Forschungsanlage (excelliSCAN 14)
Ondelay (ms)		1265
Offdelay (ms)		1155
Polydelay (ms)		50
Jumpdelay (ms)		1000
Markdelay (ms)		1000
Beschleunigungsstrecke (µm)		118
Bremsstrecke (µm)		100
Scanstrecke pro Schicht (mm)		516,6
Scangeschwindigkeit (m/s)		2

Abbildung 18 zeigt die benötigte Zeit pro Schicht für die Messung mit und ohne Auto-Delays.

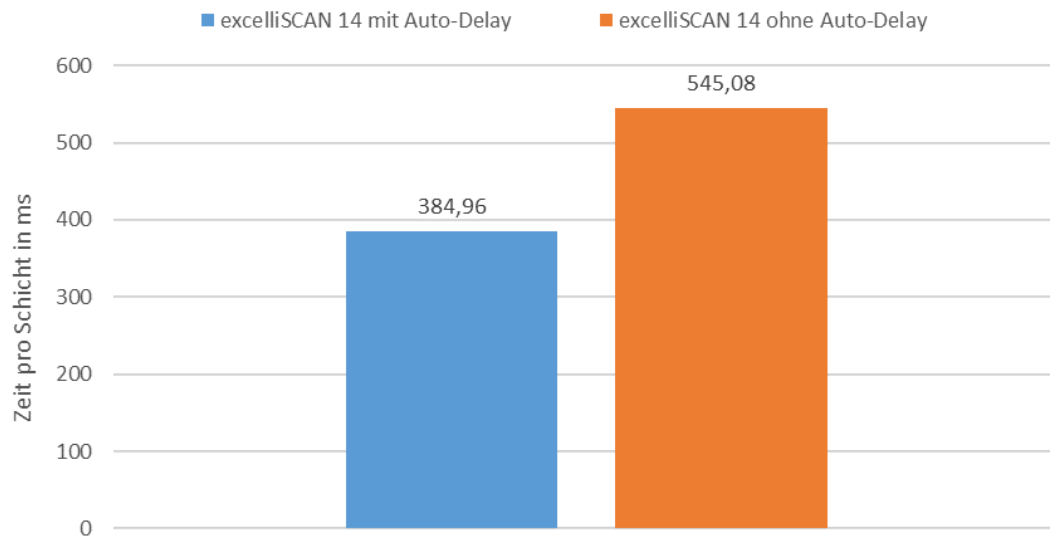


Abbildung 18: Vergleich der benötigten Zeit pro Schicht zur Erzeugung des gleichen Bearbeitungsergebnisses für den excelliSCAN 14, mit und ohne Verwendung der Auto-Delay-Funktion.

Unter Nutzung der manuell gesetzten Delays und Beschleunigungs- und Bremsstrecken benötigt der excelliSCAN 14 deutlich mehr Zeit im Vergleich zur Nutzung der Auto-Delay-Funktion. Dies ist auf die bisher ungeklärten langen On- und Offdelays zurückzuführen. Mithilfe der automatisch berechneten und gesetzten Delays kann die benötigte Zeit pro Schicht um ca. 30 % reduziert werden. Unter Nutzung der Auto-Delay-Funktion kann demnach, wie vom Hersteller angegeben, eine deutliche Verringerung der Prozesszeiten erwirkt werden. Für alle weiteren Versuche wurde sich daher für die Verwendung der Auto-Delay-Funktion entschieden.

5 Parameteroptimierung

5.1 Vorversuche

In ersten Versuchen an der Anlage sollten Parameter gefunden werden, mit denen ein zuverlässiger Aufbau von Testkörpern erfolgen kann. Bevor hierfür die Laserparameter, wie Laserleistung, Pulswiederholfrequenz und Scangeschwindigkeit betrachtet wurden, war es notwendig den Rakelprozess zu verbessern. Für die Herstellung der Sinterstrukturen ist ein gleichmäßiger Pulveraufzug über die gesamte Substratfläche mit definierter Schichtdicke notwendig. Vor jedem ersten Pulveraufzug wurde die Substratoberfläche angeraut, um eine Haftung des Pulvers auf dem Substrat zu erzielen. In den ersten Untersuchungen erfolgte der Pulveraufzug nur mittels Ringrakel, ohne das übliche zusätzliche Abziehen der Pulverschicht mit der Hartmetallklinge. Die auf dem Substrat erzeugte Pulverschicht war damit jedoch sehr ungleichmäßig. Außerdem war an der erzeugten Pulverschicht deutlich zu erkennen, aus welcher Richtung sich die Ringrakel über das Substrat bewegte (Abbildung 19). An der hinteren Kante blieb stets überschüssiges Pulver zurück, da das Abscheren des Pulvers durch die Ringrakel über dem Substrat nicht optimal erfolgte.

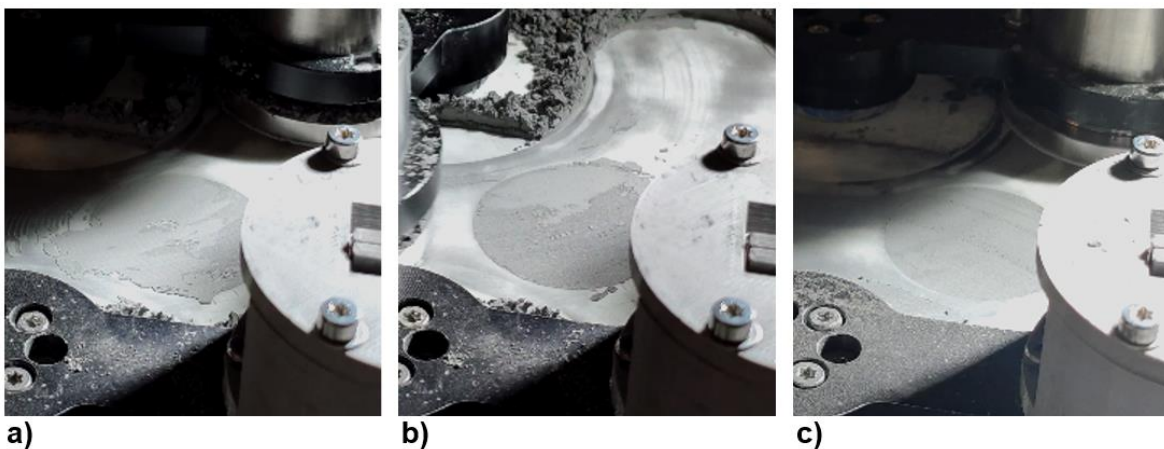


Abbildung 19: Ungleichmäßige Pulverschichten durch alleinige Verwendung der Ringrakel und Verbesserung des Pulveraufzuges durch zusätzliches Abziehen der Pulverschicht mit einer Hartmetallklinge. a) Pulverschicht nach Bewegung der Ringrakel von links nach rechts über das Substrat; b) Pulverschicht nach Bewegung der Ringrakel von rechts nach links über das Substrat; c) Pulverschicht nach Abziehen in beide Richtungen mit einer Hartmetallklinge

Durch das zusätzliche Abziehen des überschüssigen Pulvers mit einer Hartmetallklinge konnte eine gleichmäßige Pulverschicht über dem gesamten Substrat mit gewünschter, geringer Schichtdicke erzeugt werden.

Mit den gegebenen Komponenten wurden anschließend unterschiedliche Rakelstrategien untersucht. Dabei wurden beide Rakelarme verwendet. An jedem Rakelarm befand sich jeweils eine Ringrakel als Pulverreservoir, sowie eine Hartmetallklinge zum Abziehen des überschüssigen Pulvers. Für den Prozess wurde jedoch nur ein Pulverreservoir und eine Klinge verwendet. Abbildung 20 zeigt die genutzte Rakelstrategie für den Aufbau der Testwürfel aus Kapitel 5.2. Die Bewegung von Pulverreservoir und Klinge sind zum besseren Verständnis mit und entgegen des Uhrzeigersinns (UZS) angegeben.

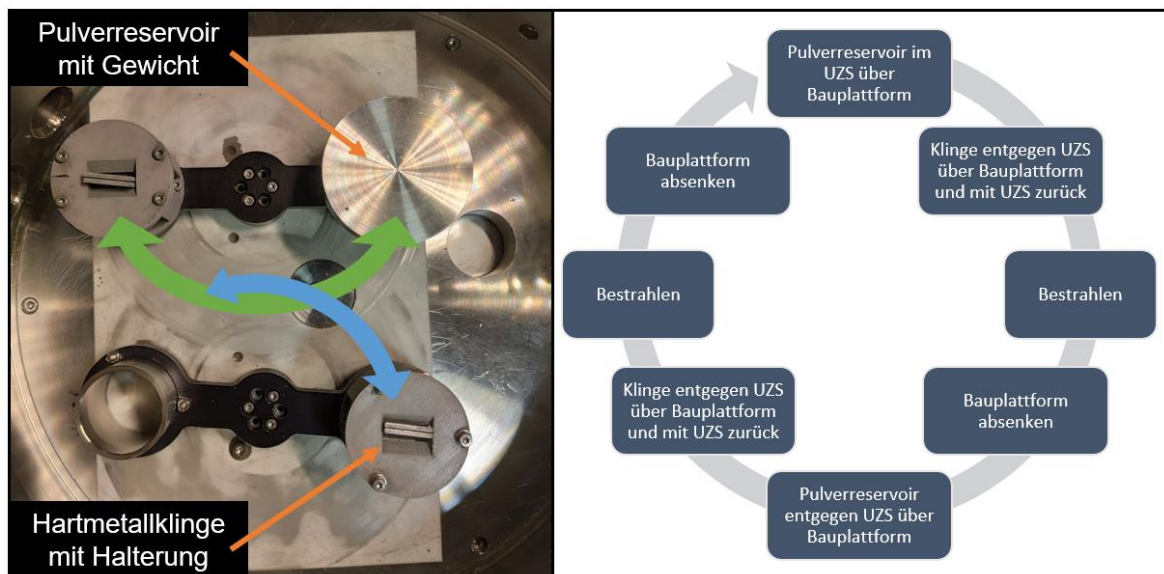


Abbildung 20: Rakelprozess. Links: Rakelarme mit Pulverreservoir und Hartmetallklinge. Die Pfeile geben die Bewegung der Komponenten an (grün: Pulverreservoir, blau: Klinge). Rechts: Rakelstrategie für den Aufbau der Testwürfel aus Kapitel 5.2.

Nachdem ein geeigneter Rakelprozess gefunden war, erfolgten Untersuchungen zu den Laserparametern, mit welchen ein Aufbau von Teststrukturen möglich ist. Als Ausgangspunkt wurden Parameter einer vergleichbaren Anlage für das Lasermikrosintern verwendet. Mit einer Pulswiederholfrequenz von 500 kHz und einer Scangeschwindigkeit von 2 m/s konnten trotz ähnlicher Volumenenergiedichten zur Vergleichsanlage keine relevanten Strukturen erzeugt werden. Nach geringer Schichtanzahl stieß die Rakel an Überhöhungen des Bauteils an, wodurch der Prozess abgebrochen werden musste. Die entstandenen Baufehler weisen auf einen ungenügenden Energieeintrag in das Material hin. Die Strahl-diagnose ergab, dass die Anlage einen deutlich größeren Fokusbereich (32 μm) als die Vergleichsanlage (23 μm) besitzt. Resultat des größeren Fokusbereichs ist ein Mangel an Intensität. Um diesen zu kompensieren wurden die Parameter angepasst. Darauf wurde der Aufbau mit halber Pulswiederholfrequenz (250 kHz) und Scangeschwindigkeit (1 m/s) getestet. Durch das Verringern der Frequenz wurde eine Erhöhung der Pulsenergien realisiert. In Kombination mit der verlängerten Wechselwirkungszeit durch die reduzierte Scangeschwindigkeit konnte die zuvor mangelhafte Intensität erfolgreich kompensiert werden. Die angepassten Parameter ermöglichten den Aufbau von Teststrukturen bei verschiedenen mittleren Laserleistungen.

Ein weiteres Problem stellte die Anbindung an das Substrat dar. Da die Substrathöhe zu Prozessbeginn händisch eingestellt wird, treten anfangs häufig größere Schichtdicken auf. Um dennoch ein ausreichendes Aufschmelzen dieser zu gewährleisten, erfolgte die Anbindung mit geringeren Frequenzen und daraus resultierenden höheren Pulsenergien. Begonnen bei 150 kHz wurde die Frequenz nach ca. 30 Schichten auf 200 kHz und schließlich auf 250 kHz erhöht. Als geeignete Laserleistung für die Anbindung wurden 14,4 W gewählt. Mit dieser Variante war eine verlässliche Methode für die Anbindung aller folgenden Versuche gefunden.

5.2 Dichteuntersuchungen

5.2.1 Stand der Technik am LHM

Laserbasierte additive Fertigungsverfahren ermöglichen neben der Erzeugung definierter poröser Strukturen auch die Herstellung von Bauteilen mit hoher Dichte. Die Maximierung der erreichbaren Dichte gesinterter Strukturen stellt einen Schwerpunkt zahlreicher Untersuchungen dar. Mit Erweiterung der realisierbaren Dichten vergrößert sich auch der Einsatzbereich der hergestellten Strukturen.

Durch die stetige Weiterentwicklung des LMS seit dessen Entwicklung, konnten neben weiteren Eigenschaften auch die maximale Bauteildichte verbessert werden. In ersten Untersuchungen konnten unter Verwendung von Pulvermaterial mit Korngrößen im Submikrometerbereich lediglich relative Dichten zwischen 60 % - 70 % erzielt werden. *Exner et al.* gelang die Erzeugung maximaler Dichten von über 90 % mit einem Pulvergemisch aus Kupfer und Wolfram mit Korngrößen zwischen 0,3 μm und 10 μm [6]. Da die Anzahl verfügbarer Pulvermaterialien im Submikrometerbereich begrenzt war, erforschte *Regenfuss et al.* die Verwendung von Pulver mit Korngrößen von 1 μm und größer [13]. 2008 konnten damit die Werte für die relative Dichte der Sinterkörper für eine Vielzahl verschiedener Pulvermaterialien auf mehr als 95 % erhöht werden [4]. Ein Jahr später gelang die Realisierung einer maximalen Sinterdichte von 97 % aus Molybdänpulver mit Korngrößen kleiner 5 μm [17].

Aus neueren Untersuchungen an einer Forschungsanlage des LHM ging hervor, dass mit Edelstahlpulver 316L maximale relative Dichten > 99,5 % möglich sind. Diese Dichten wurden mit einer Schichtdicke von 3 μm bei einem Linienabstand von 30 μm unter Normalatmosphäre erzielt.

Die Erzeugung dichter Sinterstrukturen erfordert die Anpassung der Laserparameter. Dazu gehören unter anderem die mittlere Laserleistung P_{av} , die Scangeschwindigkeit v_s , der Linienabstand h_s zweier benachbarter Scanlinien sowie die verwendete Schichtdicke l_z . Diese Parameter können zur Volumenenergiedichte (VED) zusammengefasst werden.

Nach VDI 3405 ist die Volumenenergiedichte definiert als:

$$E_V = \frac{P_{av}}{v_s \cdot h_s \cdot l_z} \quad \text{Formel 3}$$

Für Prozesse mit gepulsten Lasern sind jedoch noch weitere Parameter, wie Pulsenergie, Pulsdauer, Pulsform und Pulsspitzenintensität von großer Bedeutung und müssen berücksichtigt werden. Die alleinige Betrachtung der VED genügt daher nicht aus, um gepulste Prozesse ausreichend zu beschreiben.

5.2.2 Versuchsaufbau

Ziel der Untersuchungen war es, die erreichbare relative Dichte der Bauteile bei variierenden Volumenenergiedichte und Pulsenergie zu ermitteln. Versuche unter Schutzgasatmosphäre sollten zusätzlich zeigen, ob ein signifikanter Einfluss des Schutzgases auf das Bearbeitungsergebnis, bezüglich mechanischer Eigenschaften, der Dichte, dem Schmelzverhalten oder dem Oxidgehalt der Proben festzustellen ist.

Ursprünglich sollten die Bearbeitungsergebnisse mit den Ergebnissen einer weiteren Forschungsanlage für das LMS am LHM verglichen werden. Die Erkenntnisse aus der Charakterisierung der Anlage sowie die Vorversuche haben jedoch gezeigt, dass ein direkter Vergleich, aufgrund unterschiedlicher Strahleigenschaften nicht sinnvoll ist. Besonders die großen Abweichungen bezüglich des Fokusedurchmessers verhindern eine Übertragung der Prozessparameter der Vergleichsanlage auf die hier durchgeführten Versuche. Demnach mussten geeignete Prozessparameter neu ermittelt werden.

Der Aufbau der Proben erfolgte zunächst ohne Schutzgas. Pro Substrat wurden dabei vier Würfel mit Grundflächen von 5 mm x 5 mm erzeugt (Abbildung 21). Für eine spätere Mittelwertbildung wurden alle vier Würfel mit den gleichen Parametern generiert. Die Schichtdicke betrug für alle Versuche 3 µm. Der Aufbau der Würfel erfolgte ohne zusätzliche Bestrahlung der Kontur. Diese dient hauptsächlich zur genauen Definition des Bauteilumrisses und wird zur Verbesserung der Oberflächenrauheit genutzt, was jedoch für die Dichtebestimmung nicht relevant ist. Als Pulvermaterial wurde Edelstahl 316L der Firma Sandvik mit Korngrößen kleiner 10 µm verwendet ($d_{90} < 10 \mu\text{m}$).

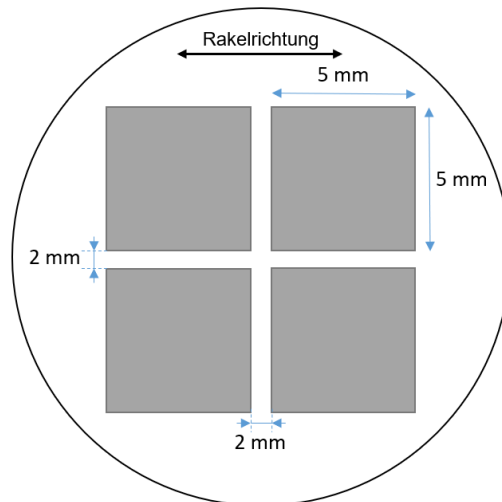


Abbildung 21: Anordnung der Testwürfel zur Dichteuntersuchung auf dem Edelstahlsubstrat mit 35 mm Durchmesser.

Die Anbindung an das Substrat erfolgte gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1 mit 14,4 W mittlerer Laserleistung bei einer Scangeschwindigkeit von 1 m/s. Die Pulswiederholfrequenz wurde dabei schrittweise von 150 kHz bis auf 250 kHz erhöht. Sobald der Prozess mit diesen Parametern stabil lief, wurde die Laserleistung variiert. Pulswiederholfrequenz und Scangeschwindigkeit blieben nach der Anbindung für alle Teststrukturen konstant ($f_p = 250 \text{ kHz}$, $v_s = 1 \text{ m/s}$). Zunächst wurde die minimal nutzbare mittlere Leistung zum Aufbau der Versuchswürfel ermittelt. Dazu wurde aller 167 Schichten, was einer Bauhöhe von 500 μm entspricht, die mittlere Laserleistung um 1 W verringert, bis der Prozess aufgrund von auftretenden Baufehlern abgebrochen werden musste. Durch mangelnde Leistung erfolgte eine unzureichende Anbindung der Pulverschicht mit dem Untergrund, wodurch eine unregelmäßige Oberfläche entstand. Im weiteren Prozess führten diese Unebenheiten schließlich zum Hängenbleiben der Rakel, worauf der Abbruch des Prozesses folgte. Anschließend wurde auf einem weiteren Substrat, nach erneuter Anbindung mit 14,4 W, die maximal nutzbare mittlere Laserleistung ermittelt. Dazu erfolgte analog aller 167 Schichten eine Erhöhung der Laserleistung um 1 W bis zum Erreichen der maximalen mittleren Laserleistung von 17,5 W. Durchgeführt wurden diese Versuche für einen Hatch von 35 μm und 40 μm . Der Hatch beschreibt den Abstand benachbarter Scanlinien. Die Bestrahlung erfolgte stets bidirektional. Dabei scannt der Laserstrahl gegenläufig über das Material. Im Gegensatz zur unidirektionalen Bestrahlung, bei welcher der Strahl stets nur in eine Richtung über das Pulverbett geführt wird, bewirkt die Verwendung der bidirektionalen Bestrahlung eine Verringerung der Prozesszeit.

Tabelle 9 fasst die verwendeten Parameter zusammen, welche während der Bearbeitung (mit Ausnahme der Anbindung) konstant blieben. Variiert wurden die mittlere Laserleistung sowie der Hatch.

Tabelle 9: Konstante und variierte Parameter zur Erzeugung der Testkörper für die Dichteuntersuchungen.

Konstante Parameter	Scangeschwindigkeit in m/s	1
	Frequenz in kHz	250
	Pulsdauer in ns (Pulshalbwertsbreite)	201,5
	Drehwinkel pro Schicht in °	139
	Schichtdicke in μm	3
	Fokusbereich in μm	32
	Bestrahlung	bidirektional, flächige Bestrahlung
Varierte Parameter	Leistungsbereich in W	8,6 - 17,5
	Volumenenergiedichte in J/mm^3	81,9 - 165,2
	Pulsenergien in μJ	34,4 - 69,4
	Hatch in μm	35, 40

Analog wurden Proben unter der Verwendung von Argon als Schutzgas erzeugt. Der Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer wurde dazu auf 0,1 - 0,2 % verringert. Um den Verbrauch an Argon zu senken, wurde die Kammer zu Beginn evakuiert. Somit wird beim anschließenden Fluten weniger Argon benötigt, um den gewünschten niedrigen Sauerstoffgehalt zu erreichen.

Unterbrochen wurde der Bauprozess jeweils lediglich zum Nachfüllen des Pulverreservoirs. Bei den Versuchen unter Schutzgas, war hierfür das Öffnen der Prozesskammer nötig, wodurch jedes Pulvernachfüllen ein erneutes Fluten der Kammer mit Argon erforderte. Neben einer Erhöhung der Prozessdauer, durch die für das Fluten benötigte Zeit, bewirkt dies auch einen erhöhten Argonverbrauch und damit höhere Prozesskosten.

5.2.3 Probenpräparation und Dichtemessungen

Die erzeugten Proben wurden für die weitere Auswertung in mehreren Schritten bearbeitet. Zuerst erfolgte eine Reinigung der Proben im Ultraschallbad mit Ethanol. Hierbei wurde überschüssiges, anhaftendes Pulver von den Strukturen gelöst. Anschließend wurden die Proben mit der Trenneinrichtung Secotom-50 der Firma Struers getrennt und nachfolgend in Epoxidharz eingebettet. Das Trennen erfolgte dabei entsprechend Abbildung 22, wodurch in der nachfolgenden Auswertung Rückschlüsse auf den Einfluss der Rakelrichtung gezogen werden konnten. Darauf folgten das Schleifen und Polieren mit der Schleif- und Poliereinrichtung Tegramin-25 von Struers. Das Polieren wurde teils mehrfach wiederholt, um möglichst gute Schliffbilder ohne Kratzer zu erzielen. Dennoch blieben zum Teil erkennbare Kratzer auf den Proben zurück.

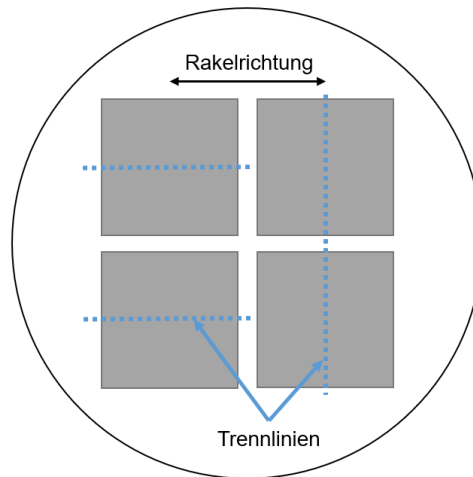


Abbildung 22: Schematische Darstellung einer Probe mit gekennzeichneten Trennlinien, senkrecht und waagrecht zur Rakelrichtung.

Für die Messung der Dichte wurden mit einem Laserscanningmikroskop (Olympus LEXT OLS4000) Aufnahmen der Schlitze bei 10-facher Vergrößerung gemacht. Das verwendete Mikroskop bietet die Möglichkeit, größere Probenausschnitte durch Bildzusammensetzung (Stitching) zu erfassen. Zusätzlich wurden die Proben mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Hierbei wurden sowohl Aufnahmen der Querschnitte und Deckflächen bei 100- und 600-facher Vergrößerung gemacht, sowie eine Analyse der Stoffzusammensetzung mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt.

Die relative Dichte wurde aus den Querschliffaufnahmen mithilfe des Bildverarbeitungsprogrammes ImageJ ermittelt. Hierfür wurden zunächst Helligkeit und Kontrast der Aufnahmen so angepasst, dass alle Poren deutlich erkennbar waren. Anschließend wurde ein Schwellwert festgelegt, wodurch alle Pixel oberhalb des Wertes markiert wurden (Abbildung 23). Auch dieser Schwellwert wurde solange angepasst, bis die Poren möglichst gut zu erkennen waren. Anschließend gibt das Programm in einem festgelegten Messbereich den prozentualen Anteil der markierten Pixel bezogen auf die Gesamtfläche des Messbereichs an. Für jeden Parameter konnten somit aus den jeweils vier Testwürfeln pro Substrat vier Messwerte ermittelt werden, woraus anschließend der arithmetische Mittelwert berechnet wurde.

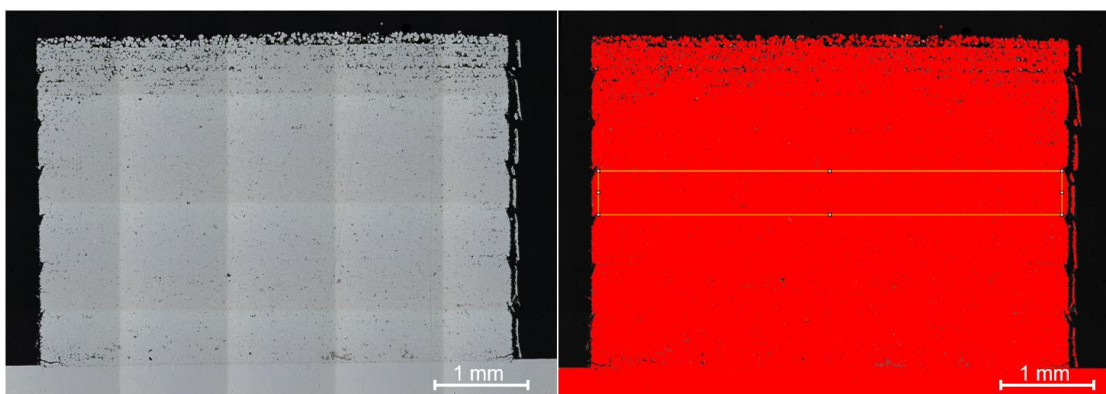


Abbildung 23: Dichtebestimmung; links: Originalbild des Querschliffs; rechts: selbe Aufnahme mit ImageJ bearbeitet (gelb: Messbereich).

Ein Problem bei dieser Methode zur Bestimmung der Dichte stellen Kratzer oder Schlieren auf den Querschliffen dar. Diese werden vom Programm fälschlicherweise als Poren aufgefasst. Nach der ersten Auswertung wurde sich daher entschieden, die Proben ein weiteres Mal zu schleifen und polieren und eine zweite Dichtemessung durchzuführen. Hierbei fiel auf, dass die Querschliffe nach dem zweiten Polieren deutliche Differenzen aufwiesen (Abbildung 24).

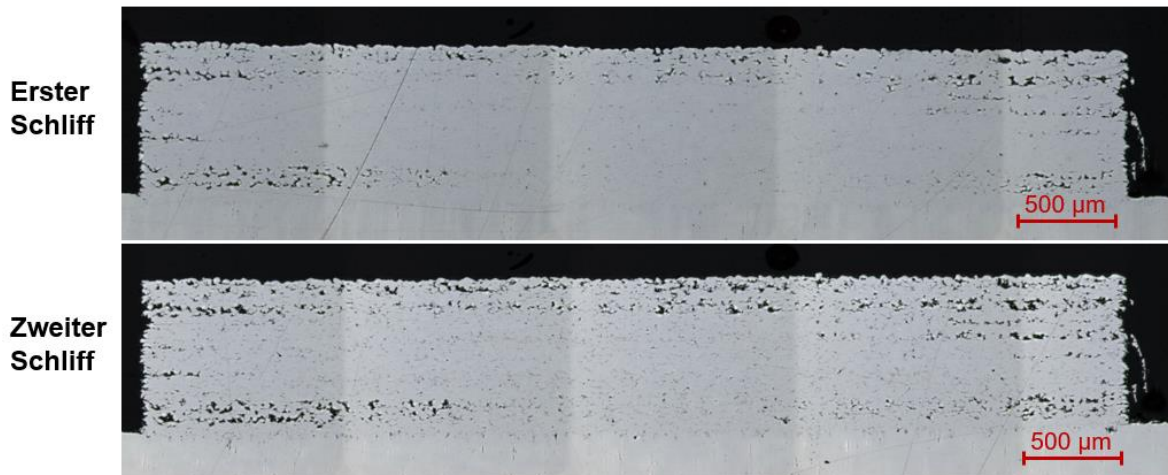


Abbildung 24: Unterschiede der Schliffbilder nach dem ersten und zweiten Schliff.

Insgesamt wurden bei der Dichtemessung nach erneutem Schleifen und Polieren geringere relative Dichten im Vergleich zu den vorherigen Messungen festgestellt. Die mittleren Abweichungen der relativen Dichte betragen 3,1 % für Proben hergestellt unter Normalatmosphäre, sowie 0,9 % für Proben hergestellt unter Schutzgasatmosphäre. Es ist anzunehmen, dass bei jedem Schleif- und Polierprozess Poren verschieden stark zugeschmiert werden, wodurch die Unterschiede der Schliffbilder entstehen. Die geringere mittlere Abweichung der Proben hergestellt unter Schutzgas ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass die Proben eine höhere Dichte und damit weniger Poren besitzen, welche verschmiert werden können. Es kann ausgeschlossen werden, dass es sich hierbei nur um ein einmaliges Vorkommnis handelt, da die Proben in mehreren Durchgängen poliert wurden und das Problem dennoch bei allen Proben auftrat. Die Ermittlung der relativen Dichte mit ImageJ stellt somit kein zuverlässiges Verfahren zur Bestimmung von Dichtewerten dar. Zum Vergleich der relativen Dichten innerhalb eines Querschliffs ist es dennoch geeignet und ausreichend genau.

5.2.4 Ergebnisse und Diskussion

Mit dem Aufbau der Testwürfel konnte der nutzbare Leistungsbereich für die untersuchten Hatches 35 μm und 40 μm festgelegt werden. Der Aufbau unter Normalatmosphäre konnte bis zum Erreichen der maximalen mittleren Laserleistung von 17,5 W erfolgreich realisiert werden. Als untere Grenze waren 9,6 W notwendig, um einen zuverlässigen Prozess zu gewährleisten. Für geringere Laserleistungen reichte der Energieeintrag in das Material nicht aus, um die Pulverschicht ausreichend aufzuschmelzen und eine stoffschlüssige Verbindung zu erzeugen. Durch Unregelmäßigkeiten der Oberfläche blieb schließlich die Rakel an den erzeugten Strukturen hängen, wodurch der Prozess abgebrochen werden musste. Der ermittelte Leistungsbereich stimmt für beide Hatches überein.

Für den Aufbau der Würfel unter Schutzgasatmosphäre konnte ein ähnlicher Leistungsbereich verwendet werden. Lediglich wurde die untere Grenze bei 40 μm Hatch bereits bei einer mittleren Laserleistung von 10,6 W erreicht. Tabelle 10 fasst die nutzbaren Leistungen, sowie Pulsenergien und VED für den Aufbau unter Normalatmosphäre und unter Schutzgasatmosphäre zusammen.

Tabelle 10: Bereich der nutzbaren mittleren Leistung, Pulsenergien und VED für die Bearbeitung unter Normalatmosphäre und unter Schutzgasatmosphäre in Abhängigkeit des Hatches.

	Normalatmosphäre		Schutzgasatmosphäre	
Hatch in μm	35	40	35	40
mittlere Laserleistung in W	9,6 - 17,5	9,6 - 17,5	9,6 - 17,5	10,6 - 17,5
Pulsenergien in μJ	38,3 - 69,4	38,3 - 69,4	38,3 - 69,4	42,2 - 69,4
VED in J/mm^3	91,2 - 165,2	79,8 - 144,6	91,2 - 165,2	87,9 - 144,6

Sowohl bei der Bearbeitung unter Normalatmosphäre als auch bei der Verwendung des Schutzgases wurde im Bereich höherer Leistungen, beginnend ab 15,4 W mittlerer Laserleistung, ein zunehmender Pulveraufschub festgestellt. Es ist anzunehmen, dass bei erhöhter Leistung der bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Material entstehende Gasdruck loses Pulver in unmittelbarer Nähe verdrängt. Das lose Pulver wird somit vor dem Laserstrahl in Scanrichtung aufgeworfen. Nimmt der Pulveraufschub immer weiter zu, so kann es dazu kommen, dass der Laserstrahl über das aufgeschobene Pulver scannt. Die erhöhte Schichtdicke führt zu einer ungleichmäßigen Durchschmelzung des Pulvers und damit zum Auftreten von Baufehlern. Im ungünstigsten Fall ist die Schichtdicke durch das aufgeworfene Pulver so hoch, dass der Energieeintrag nicht genügt, um die Pulverschicht vollständig aufzuschmelzen. Es kann demnach auch keine Anbindung an die unterliegende Schicht erfolgen, was einen Prozessabbruch erfordert. Beim Aufbau der Testwürfel konnten jedoch keine signifikanten Baufehler durch den Pulveraufschub festgestellt werden. Dennoch beeinflusst die Veränderung der Schichtdicke das Bearbeitungsergebnis, weshalb der Pulveraufschub bei der Auswertung berücksichtigt werden muss.

Dichteuntersuchungen

Für die Bearbeitung unter Normalatmosphäre konnten relative Dichten $> 96\%$ mit VED im Bereich von $96 - 138 \text{ J/mm}^3$ erreicht werden. Eine maximale relative Dichte von $97,64\%$ konnte bei einem Hatch von $40 \mu\text{m}$ erreicht werden. Durch die Bearbeitung unter Schutzgasatmosphäre konnte die relative Dichte der Teststrukturen erhöht werden. Werte $> 99\%$ wurden mit VED von $100 - 138 \text{ J/mm}^3$ erreicht. Als maximale relative Dichte bei der Bearbeitung unter Schutzgas wurden $99,74\%$ bei $35 \mu\text{m}$ Hatch gemessen. Damit konnten die am LHM bisher erreichten Dichten $> 99,5\%$ bestätigt werden. Abbildung 25 zeigt die bestimmten relativen Dichten in Abhängigkeit der VED für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas. In Anlage I sind die Ergebnisse noch einmal in tabellarischer Form gegeben.

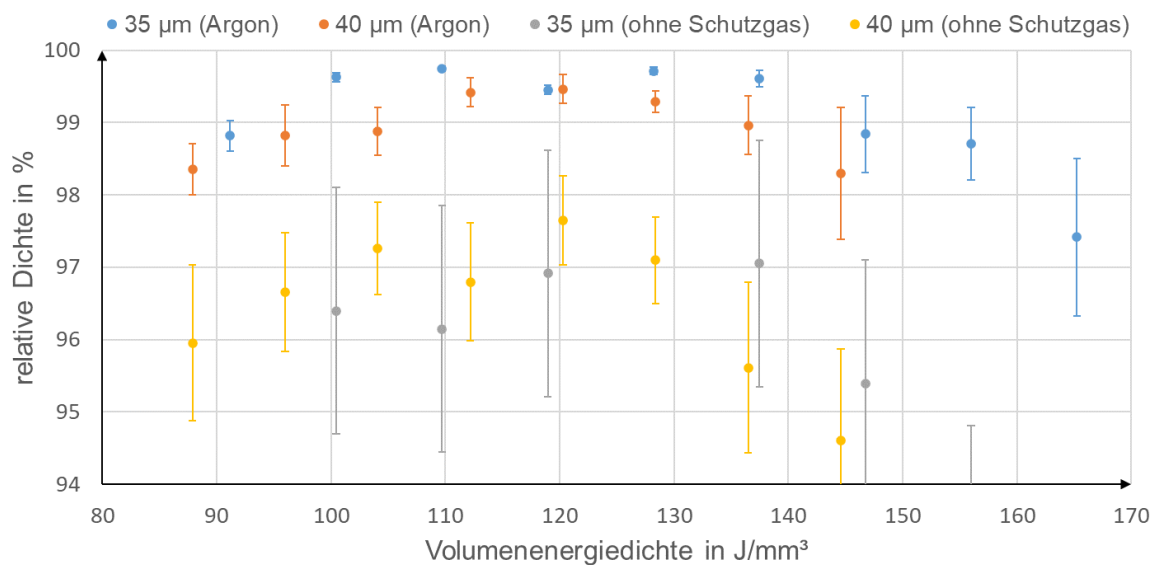


Abbildung 25: Grafische Darstellung der relativen Dichten in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas. Zusätzlich ist die Standardabweichung der Dichtewerte dargestellt.

Insgesamt konnten unter Schutzgasatmosphäre bei ähnlichen VED höhere Dichten realisiert werden als unter Normalatmosphäre. Die Schwankungen der Dichtewerte sind für die Proben ohne Schutzgasatmosphäre wesentlich größer. Dies wurde bereits in Kapitel 5.2.3 zu den aufgetretenen Schlißproblemen diskutiert. Für beide Umgebungsatmosphären liegen die höchsten relativen Dichten in einem ähnlichen Bereich der VED. Verlässt man diesen Bereich, entweder durch Erhöhen oder Verringern der mittleren Laserleistung und damit der Pulsenergie, nimmt die relative Bauteildichte schnell ab. Ist die Pulsenergie zu gering, so reicht der Energieeintrag in das Material nicht aus, um das Pulver und die vorangegangene Schicht ausreichend aufzuschmelzen. Die Verbindung zwischen den einzelnen Schichten ist damit weniger stark, woraus die abnehmende Dichte resultiert.

Zu hohe Pulsenergien bewirken ebenso eine Verringerung der Dichte. Ein großer Teil des Pulvers wird bei hohen Pulsenergien verdampft, wodurch der Anteil an aufgeschmolzenem Pulver zur Erzeugung der stoffschlüssigen Verbindung sinkt. Zusätzlich wird Pulver durch den Gasdruck verdrängt. Der zuvor beschriebene Pulveraufschub trägt somit auch zur verringerten Dichte bei hohen Pulsenergien bei.

Da die Dichteabnahme bei allen Proben in Richtung kleiner und großer VED zu erkennen ist, kann man davon ausgehen, dass die maximal erreichbaren Dichten innerhalb des untersuchten Bereichs der VED liegen. Eine Abhängigkeit der relativen Dichte von der Rakelrichtung konnte nicht festgestellt werden.

Um eine Aussage über die Übertragbarkeit der gemessenen relativen Dichten auf ein größeres Volumen treffen zu können, wurden unter Schutzgasatmosphäre Volumenkörper mit konstanter Pulsenergie aufgebaut. Es wurden je zwei Würfel mit Kantenlängen von 5 mm mit einem Hatch von 35 μm und 40 μm erzeugt. Als Laserleistung wurden 14,4 W gewählt, da hiermit in den vorangegangenen Untersuchungen die höchste relative Dichte erzeugt werden konnte. Zudem wurde für den Aufbau der Volumenkörper die Rakelstrategie angepasst. Mit der zuvor verwendeten Strategie entstanden durch mangelhaften Pulveraufzug teils kleine Fehlstellen auf den Versuchskörpern, welche dann beim nächsten Pulveraufzug geschlossen wurden. Die neue Rakelstrategie führt das Pulverreservoir pro Zyklus zweimal über das Substrat. Anschließend erfolgt das Abziehen der Pulverschicht mit der Hartmetallklinge analog zur ursprünglichen Rakelstrategie. Mit dieser Anpassung konnten während des Aufbaus keine Fehlstellen von Pulver mehr festgestellt werden. Die erzeugten Würfel weisen über den gesamten Querschnitt lediglich wenige, sehr kleine Poren auf. Als maximale relative Dichte wurden 99,76 % bei einem Hatch von 35 μm erreicht. Für die Testwürfel erzeugt mit 40 μm Hatch wurde eine relative Dichte von 99,58 % gemessen. Abbildung 26 zeigt REM-Aufnahmen der Strukturen hergestellt mit gleicher Pulsenergie von 57,7 μJ für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas.

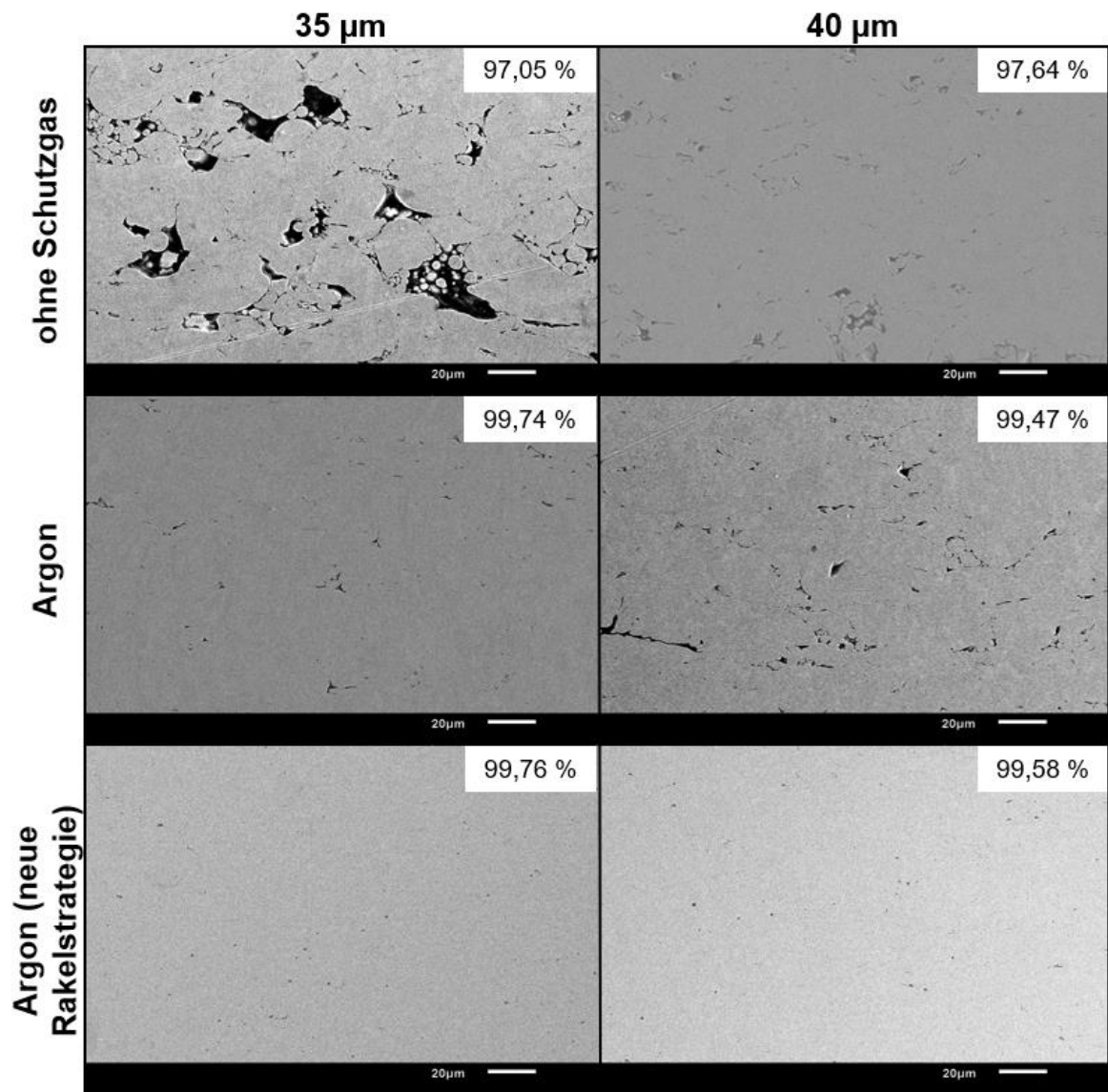


Abbildung 26: REM-Aufnahmen der Querschliffe mit Angabe der relativen Dichte für die Bearbeitung mit und ohne Schutzgas, sowie mit verbesserter Rakelstrategie für die beiden Hatches 35 µm und 40 µm. (600-fache Vergrößerung)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Porenanzahl und -größe unter Verwendung von Schutzgas reduziert werden konnte. Die Aufnahmen der Proben, welche ohne Schutzgas hergestellt wurden, weisen große Poren mit teils noch ungeschmolzenen Pulverresten auf. Die Anpassung der Rakelstrategie bewirkte nochmals eine sichtbare Verbesserung. Auf den REM-Aufnahmen der unter Schutzgas und Anpassung der Rakelstrategie hergestellten Proben sind kaum noch Poren zu erkennen. Auf die gemessene relative Dichte zeigt die veränderte Rakelstrategie jedoch keine Wirkung. Es ist anzunehmen, dass es sich hierbei um Fehler bei der Dichtebestimmung mittels ImageJ handelt. Da die REM-Aufnahmen der Proben mit angepasster Rakelstrategie sichtbar weniger und deutlich kleinere Poren aufweisen als die Aufnahmen der Proben mit ursprünglicher Rakelstrategie, wird davon ausgegangen, dass bei Letzteren eine zu hohe relative Dichte gemessen wurde.

Aufgrund mangelnder Auflösung der Querschliffbilder erkennt das Bildverarbeitungsprogramm kleinere Poren teils nicht, weshalb fälschlicherweise eine zu hohe relative Dichte ausgegeben wird. Auf den REM-Aufnahmen ist zu sehen, dass die Proben mit ursprünglicher Rakelstrategie eine größere Anzahl dieser Poren besitzen, welche vom Programm nicht erkannt werden können. Demnach ist der Fehler bei der Dichtebestimmung hier größer. Um diesen Fehler zu minimieren sollten für künftige Untersuchungen Querschliffbilder für die Dichtebestimmung mit höherer Auflösung aufgenommen werden.

Unter Verwendung von Schutzgas wurden höhere Dichten bei dem geringeren Hatch von 35 μm erzielt. Grund ist der größere Überlapp der Schmelzspuren im Vergleich zu einem Hatch von 40 μm . Es besteht die Möglichkeit, dass eine weitere Verringerung des Hatches und die damit einhergehende Vergrößerung des Überlapps der Schmelzspuren noch höhere Bauteildichten bewirken könnte. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dies jedoch aus Zeitgründen nicht weiter untersucht werden.

Um den Einfluss des Schutzgases besser beurteilen zu können, wurde die Stoffzusammensetzung der Proben mittels EDX analysiert. Pro Probe wurden sechs Punktanalysen an verschiedenen Stellen durchgeführt. Die Messung erfolgte im Querschliff und auf der Deckfläche. Von Bedeutung war hierbei der enthaltene Sauerstoff in den Proben. Tabelle 11 fasst die Messwerte zusammen.

Tabelle 11: Sauerstoffanteil in den Proben erfasst mittels EDX, gemessen im Schliff und auf der Deckfläche. Angegeben sind der mittlere Sauerstoffgehalt und die Standardabweichung aus jeweils 6 Messungen.

	enthaltener Sauerstoff in %	
	Schliff	Deckfläche
mit Schutzgas	1,76 (0,58)	2,29 (0,29)
ohne Schutzgas	1,5 (0,6)	5,27 (0,25)

Die Messungen im Schliff ergaben für beide Umgebungsatmosphären einen geringen Sauerstoffgehalt. Auf den Deckflächen konnten größere Differenzen festgestellt werden.

Die Messungen auf den Deckflächen geben den letzten Zustand des Prozesses wieder. Bei beiden Umgebungsatmosphären hat sich eine Oxidschicht auf der Materialoberfläche gebildet. Bei der unter Schutzgas hergestellten Probe ist anzunehmen, dass die Oxidschicht erst nach dem Bearbeitungsprozess entstand. Während des Prozesses wird die Oxidation durch das inerte Schutzgas Argon verhindert. Das Material war bei dem anschließenden ersten Kontakt mit Sauerstoff nach beendetem Prozess bereits stark abgekühlt, weshalb die Oxidschicht geringer als bei der ohne Schutzgas hergestellten Probe ist. Da die Umgebungsatmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die relative Bauteildichte aufwies, wird folgendes vermutet:

Bei der Bearbeitung unter Normalatmosphäre bildet sich nach jeder Schicht nach dem Aufschmelzen des Pulvers eine Oxidschicht auf der Materialoberfläche. Es folgt der Pulveraufzug und ein erneutes Bestrahlen.

Die Oxidschicht wird dabei mit aufgeschmolzen und teils verdampft. Das Aufschmelzen der Oxidschicht bedarf einen Anteil der eingebrachten Energie. Folglich steht für das Aufschmelzen der unterliegenden Schicht weniger Energie zu Verfügung. Da sich bei der Bearbeitung unter Schutzgas keine Oxidschicht auf der Materialoberfläche bilden kann, reicht die eingebrachte Energie aus, um die unterliegende Schicht ausreichend aufzuschmelzen und somit eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Schichten und eine hohe Bauteildichte zu erzeugen. Für das Aufschmelzen der gebildeten Oxidschichten unter Normalatmosphäre ist ein höherer Energieverbrauch zu erwarten. Die Restenergie ist damit so gering, dass die unterliegende Schicht nur weniger stark aufgeschmolzen wird. Die Verbindung zwischen den Schichten unter Normalatmosphäre ist damit weniger ausgeprägt, wodurch die geringere Dichte der Bauteile erklärt werden kann.

Untersuchungen von *Das et al.* zur Prozesskontrolle beim selektiven Lasersintern von Metallen stützen diese Vermutungen [2]. Es wurde festgestellt, dass die Oxidation des geschmolzenen Pulvermaterials die Haftung zwischen den einzelnen Schichten behindert. Ist eine Oxidschicht auf dem Substrat und der Schmelzoberfläche vorhanden, so kann die Schmelze die unterliegende Schicht nicht ausreichend benetzen.

Woher der geringe Sauerstoffanteil gemessen im Schliff der Proben resultiert kann bisher nicht erklärt werden.

Auch die Betrachtung der Deckflächen zeigten einen sichtbaren Einfluss der Umgebungsatmosphäre auf die Bearbeitung. Das Schutzgas wirkt sich positiv auf die Ausbildung der Schmelzspuren aus (Abbildung 27).

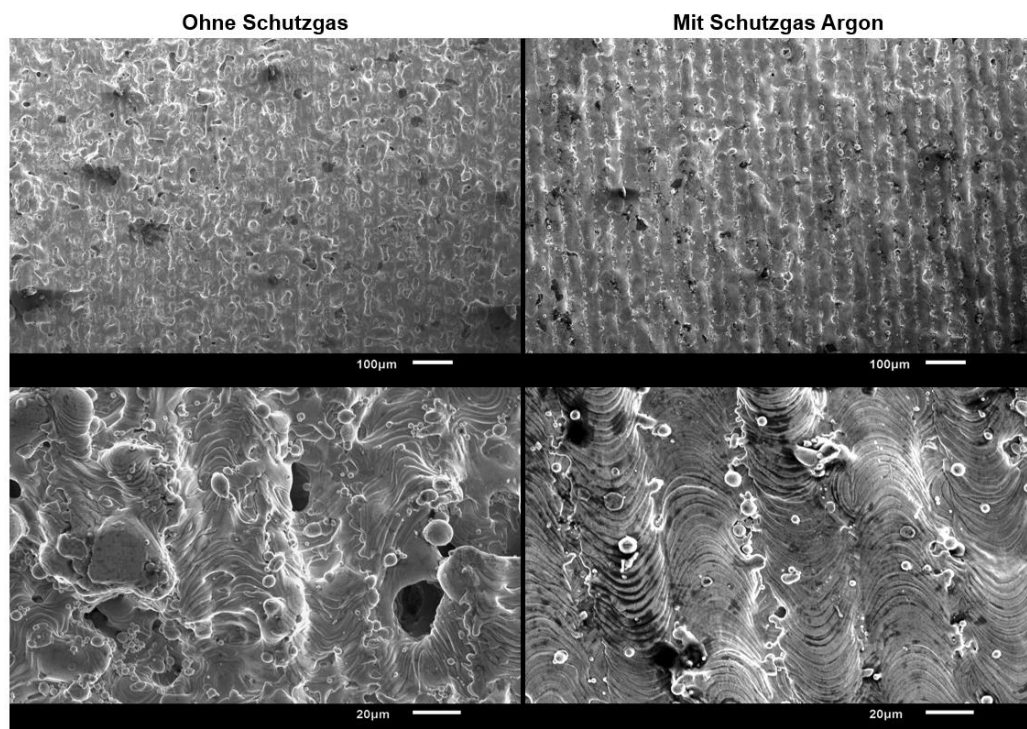


Abbildung 27: REM-Aufnahmen der Deckflächen, hergestellt unter Normal- und Schutzgasatmosphäre (100- und 600-fach vergrößert).

Bei der unter Schutzgas hergestellten Probe sind die einzelnen Schmelzspuren gleichmäßig zu erkennen. Unter Normalatmosphäre erstarrten die Schmelzspuren wesentlich unregelmäßiger. Es sind deutliche Poren sichtbar. Die Bildung von Oxidschichten auf der Materialoberfläche bei der Bearbeitung ohne Schutzgas behindert das Fließverhalten der Schmelze. Als Grund wird hier eine höhere Oberflächenspannung der gebildeten Oxidschicht vermutet. Das Material erstarrt, bevor sich gleichmäßige Schmelzspuren bilden können.

5.3 Zugversuch

Mit den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Dichteuntersuchungen wurden Zugproben unter Normalatmosphäre und unter Schutzgas hergestellt. Beide Proben wurden mit den gleichen Parametern und einer VED von $120,3 \text{ J/mm}^3$ bis zu einer Höhe von 5 mm aufgebaut. Mit dieser VED konnten in den vorhergehenden Untersuchungen für beide Umgebungsatmosphären hohe relative Bauteildichten erreicht werden. Pro Substrat wurden zwei Volumenkörper erzeugt (Abbildung 28), welche durch späteres Trennen in je 3 Zugproben geteilt wurden.

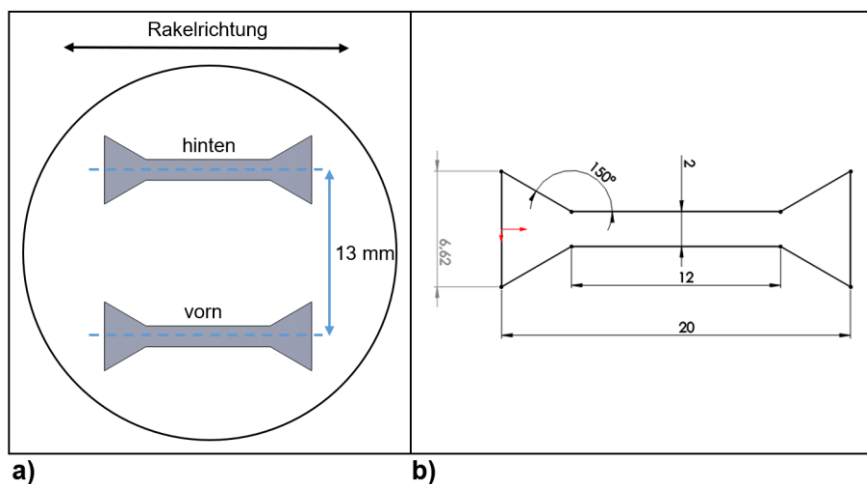


Abbildung 28: Aufbau der Zugproben. a) Anordnung der Proben auf dem Substrat. b) Abmessungen der aufgebauten Zugproben (Angaben in mm).

Während des Bauprozesses kam es beim Pulveraufzug teilweise zu Fehlstellen im Pulverbett. Diese traten vermehrt auf dem vorderen Teil des Substrats auf. Ein unterschiedliches Verhalten der vorderen und hinteren Proben beim Zugversuch ist daher zu erwarten. Abbildung 29 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die Zugproben in Abhängigkeit der Umgebungsatmosphäre während der Probenherstellung.

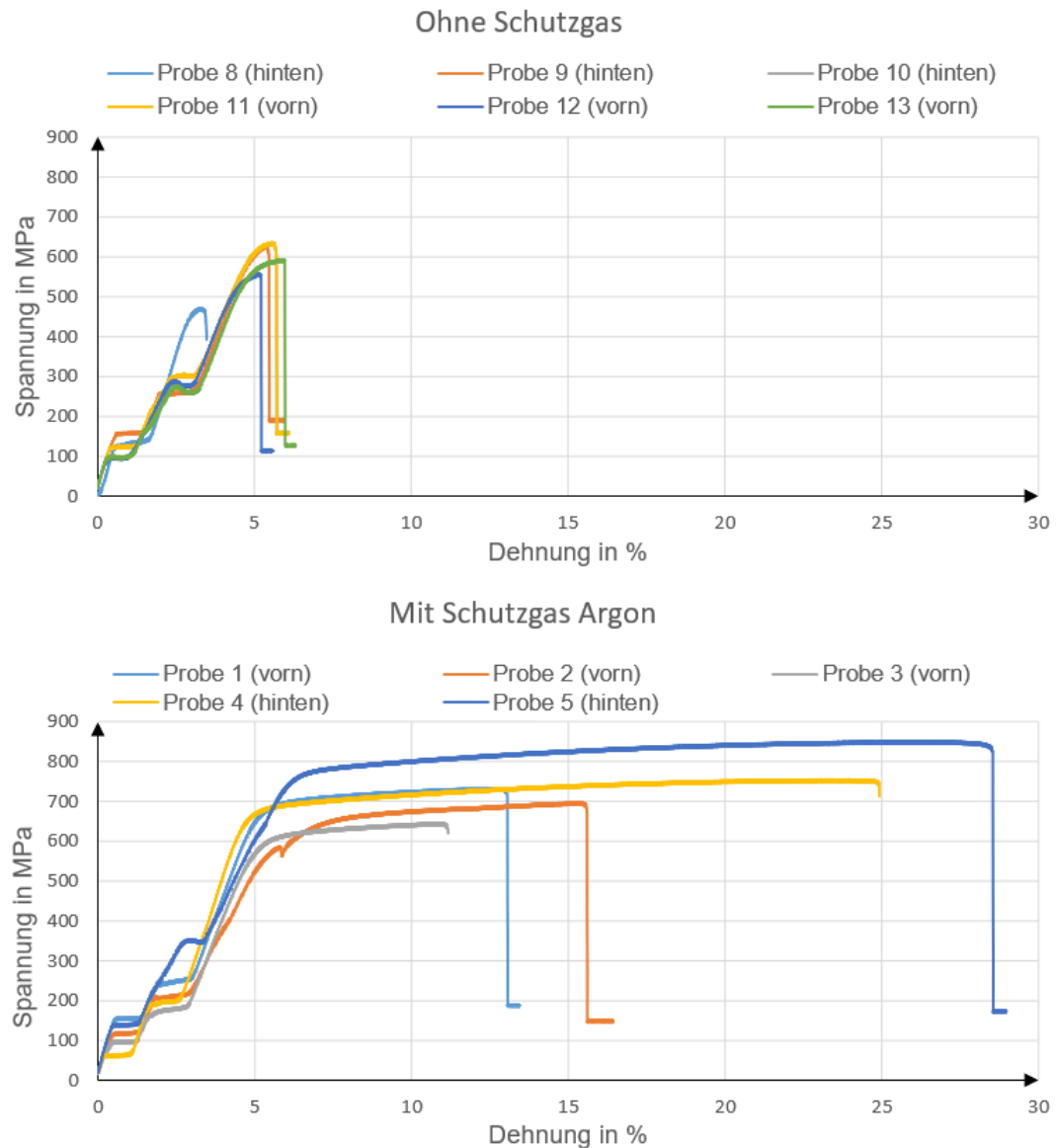


Abbildung 29: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuchs für beide Umgebungsatmosphären. Darstellung in Abhängigkeit der Positionierung der Proben auf dem Substrat bei der Herstellung.

Es sind deutliche Unterschiede im Verhalten der Zugproben, abhängig von der Umgebungsatmosphäre bei der Herstellung zu erkennen. Bei allen Proben konnte eine hohe Zugfestigkeit festgestellt werden. Die unter Schutzgas hergestellten Proben weisen jedoch eine deutlich höhere Zugfestigkeit und auch eine stärkere Dehnung auf. Aus den vorangegangenen Untersuchungen ist hervorgegangen, dass das Schutzgas einen signifikanten Einfluss auf die Dichte der Bauteile hat. Es ist zu vermuten, dass die höhere Zugfestigkeit der Proben hergestellt unter Schutzgas aus der höheren Bauteildichte resultiert.

Ein unterschiedliches Verhalten der vorderen und hinteren Zugproben konnte nur für die Proben hergestellt unter Schutzgas festgestellt werden. Die vorderen Proben weisen eine geringere Dehnung und Zugfestigkeit auf. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die zuvor beschriebenen Fehlstellen beim Pulveraufzug zurückzuführen. Weiterhin sind die Schwankungen zwischen den Proben auf unterschiedliche Probenstärken zurückzuführen. Obwohl das Trennen mittels Serienschnitt und einer eingestellten Schnittbreite von 1 mm erfolgte, sind die Proben unterschiedlich dick. Um den Einfluss der abweichenden Probenstärken auf den Zugversuch nachvollziehen zu können, sind die Dicken der Teile in Tabelle 12 gegeben.

Tabelle 12: Abweichungen der Dicken der Zugproben von der gewünschten Probendicke von 1 mm.

Probe Nr.	Dicke in mm
1	1 + 0,09
2	1 + 0,17
3	1 + 0,13
4	1 - 0,11
5	1 + 0,06
8	1 - 0,22
9	1 + 0,11
10	1 + 0,06
11	1 - 0,36
12	1 + 0,05
13	1 + 0,07

Die Graphen weisen im Bereich geringer Dehnung mehrere untypische Stufen auf. Diese können durch ein Verrutschen der Proben zwischen den Spannbacken während des Zugversuches entstehen. Durch die Stufen ist kein eindeutiger Übergang von elastischer zu plastischer Verformung erkennbar. Folglich kann aus den Messungen die Streckgrenze der Proben nicht ermittelt werden. Eine erkennbare Einschnürung vor dem Bruch ist bei keiner der gesinterten Proben zu erkennen. Dies weist auf eine niedrige Duktilität der Proben hin.

Die Querschliffe der Proben zeigen, dass die unter Normalatmosphäre hergestellten Zugproben beim Zugversuch im Bereich der Bruchkante stärker auseinandergezogen wurden (Abbildung 30). REM-Aufnahmen der Bruchkanten sind in Anlage II gegeben.

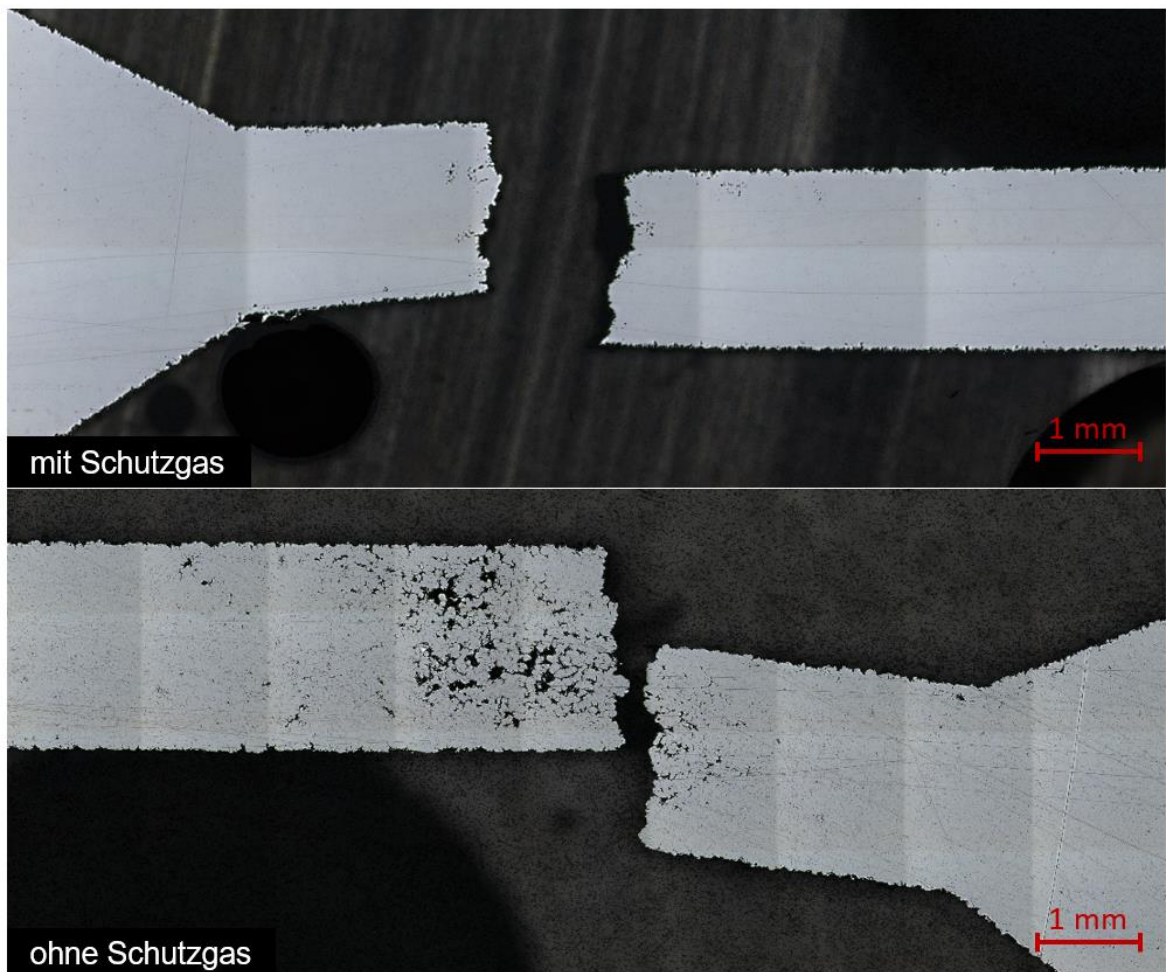


Abbildung 30: Querschliffe der Zugproben nach dem Zugversuch (5-fache Vergrößerung).

Auch dieses Verhalten lässt sich auf die höhere Dichte der unter Schutzgas hergestellten Proben zurückführen. Die Poren stellen Schwachstellen im Material dar und verringern die tatsächliche Querschnittsfläche der Zugproben. Während der Durchführung des Zugversuchs kommt es dann im Bereich der Bruchkante zu einem „Auseinanderziehen“ der Poren, was in Abbildung 30 deutlich zu erkennen ist. Hier zeigt sich zudem nochmals die signifikant höhere Anzahl an Poren in den ohne Schutzgasatmosphäre erzeugten Proben im Vergleich zu denen, die mit Schutzgas hergestellt wurden.

In Tabelle 13 werden gemessene Kenngrößen mit Standardwerten für das Material Edelstahl 316L verglichen. Wenn nicht anders gekennzeichnet, handelt es sich bei den Angaben um die Mittelwerte aus allen durchgeführten Zugproben. Weiterhin ist für die Zugfestigkeit ein Vergleichswert der Firma 3D Micro Print gegeben, deren Zugproben ebenfalls mit einem, dem LMS ähnlichen Verfahren unter Schutzgasatmosphäre aus dem Pulvermaterial 316L hergestellt wurden.

Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte aus dem Zugversuch mit Standardwerten nach DIN EN 10088-3 und Vergleichswerten der Firma 3D Micro Print.

Kennwert	Ohne Schutzgas	Mit Schutzgas	Standardwerte für Edelstahl 316L nach DIN EN 10088-3 [3]	Vergleichswerte 3D Micro Print [1]
Maximal gemessene Zugfestigkeit in N/mm ²	634	848	-	-
Zugfestigkeit in N/mm ²	552	734	500-700	650 ± 15
Bruchdehnung in %	4,9	18,5	≥ 40	-

Die erzielten Zugfestigkeiten liegen im Bereich der Standardwerte. Im Vergleich mit den Werten der Firma 3D Micro Print konnte mit den eigenen unter Schutzgas hergestellten Proben eine höhere Zugfestigkeit erreicht werden. Die Firma gibt für ihre Bauteile eine relative Bauteildichte größer 99 % an. Wie die Dichteuntersuchungen aus Kapitel 5.2 zeigten, können an der Forschungsanlage bei Bearbeitung unter Schutzgas ebenso hohe Bauteildichten realisiert werden. Da für die Zugproben von 3D Micro Print keine genauen Angaben zur Bauteildichte gegeben sind, kann die hier erreichte höhere Zugfestigkeit aus einer höheren relativen Dichte der eigenen Proben resultieren.

Die Werte für die Bruchdehnung liegen deutlich unter dem Standardwert. Die Angaben der Norm beziehen sich auf den Werkstoff 316L im lösungsgeglühten Zustand. Die hergestellten Zugproben wurden nicht zusätzlich wärmebehandelt, woraus mit hoher Wahrscheinlichkeit die Differenzen bezüglich der Bruchdehnung resultieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit erfolgte eine umfangreiche Charakterisierung einer neuen Anlage für das Lasermikrosintern. Mittels Strahldiagnose wurden die räumliche Strahleigenschaften des Lasers ermittelt. Die Untersuchungen zeigten, dass für die Realisierung eines kleinen Fokusbereichs von 32 μm bei hoher Strahlqualität ($M^2 = 1,83$) ein Austauschen des Strahlaufweiters mit einer Plankonvexlinse notwendig war. Mit diesem Aufbau konnte zudem ein nahezu rotationssymmetrischer Laserstrahl erzeugt werden, welcher eine richtungsunabhängige Bearbeitung ermöglicht. In der folgenden Leistungsmessung konnte eine Leistungsstabilität des Lasers festgestellt werden. Eine aufgetretene unerwartet starke Abschwächung des Strahles durch die Plankonvexlinse kann bisher nicht erklärt werden. Messungen der Frequenzabhängigkeit der Leistung zeigten übliche Leistungseinbrüche bei geringen Frequenzen durch Begrenzung der maximalen Pulsenergie. Mit einem weiteren Messaufbau konnten Erkenntnisse zu den wählbaren Pulsformen gewonnen werden. Mit den gemessenen Pulsdauern konnten die Angaben aus dem Datenblatt des Lasers, welche eine maximale Pulsdauer von 490 ns vorgeben, nicht bestätigt werden. Die wählbaren Pulshalbwertsbreiten liegen im Bereich von 11,5 ns bis 201,5 ns. Eine Frequenzabhängigkeit der Pulsform besteht lediglich für Frequenzen kleiner 200 kHz. Für Frequenzen ab 50 kHz arbeitet die Anlage pulssynchron.

Untersuchungen zu dem eingebauten neuen Galvanometerscanner zeigten eine deutliche Reduzierung der Prozesszeiten durch Verwendung der Auto-Delay-Funktion. Im Vergleich zur herkömmlichen Nutzung manuell bestimmter Delays wurde eine Zeitreduktion um 30 % erreicht.

Mit den Erkenntnissen aus der Charakterisierung der Anlage konnten Prozessparameter festgelegt werden, bei denen ein zuverlässiger Aufbau von Teststrukturen ermöglicht wurde. Unter Normalatmosphäre wurden relative Bauteildichten $> 96 \%$ erreicht. Die Untersuchungen zur Bearbeitung unter Schutzgas zeigten einen positiven Effekt des inerten Gases auf den Prozess. Die relativen Dichten konnten auf $> 99 \%$ erhöht werden. Mittels Zugversuches konnte eine hohe Zugfestigkeit von mehr als 730 N/mm² der unter Schutzgas hergestellten Proben nachgewiesen werden.

6.2 Ausblick

Die Verwendung eines inerten Schutzgases hat positive Effekte auf das Bearbeitungsergebnis beim Lasermikrosintern gezeigt. In dieser Arbeit wurde bisher lediglich der Einfluss des Schutzgases auf die relative Dichte untersucht. Die Wirkung des Schutzgases auf weitere Bauteileigenschaften, wie Auflösung und Oberflächenrauheit, sollte in weiterführenden Untersuchungen ermittelt werden.

Weiterhin ist der Einfluss weiterer Prozessparameter von Interesse. Eine Variierung von Pulsdauer und Pulsform, die mit älteren Forschungsanlagen nicht möglich ist, stellt dabei ein komplett neues Forschungsfeld für das Lasermikrosintern dar.

Aktuelle Forschungen zum Einfluss von Schichtdicke und Hatch beim Lasermikrosintern ohne Schutzgas ermöglichten eine Erhöhung der relativen Bauteildichte. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die Bearbeitung unter Schutzgas stellt eine Verbesserung der bisher erreichten Bauteildichten in Aussicht und stellt damit eine relevante Forschungsthematik dar.

Literatur

- [1] 3D MicroPrint GmbH (2019): Materialdatenblatt. 1.4404. Hg. v. 3D MicroPrint GmbH. Online verfügbar unter <https://www.3dmicroprint.com/download/>, zuletzt geprüft am 22.01.2021.
- [2] Das, S. (2003): Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. In: *Adv. Eng. Mater.* 5 (10), S. 701–711. DOI: 10.1002/adem.200310099.
- [3] DIN EN 10088-3:2014-12, Dezember 2014: Nichtrostende Stähle – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung.
- [4] Edmund Optics GmbH (2018): UV vs. IR Grade Fused Silica. Hg. v. Edmund Optics GmbH. Online verfügbar unter <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/uv-vs.-ir-grade-fused-silica/>, zuletzt geprüft am 10.01.2021.
- [5] Exner, H.; Horn, M.; Streek, A.; Ullmann, F.; Hartwig, L.; Regenfuß, P.; Ebert, R. (2008): Laser micro sintering: A new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-micrometer powder. In: *Virtual and Physical Prototyping* 3 (1), S. 3–11. DOI: 10.1080/17452750801907970.
- [6] Exner, H.; Regenfuss, P.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Ebert, R. (2003): Selective Laser Micro Sintering with a Novel Process. In: *Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication*. DOI: 10.1117/12.540730.
- [7] JENOPTIK Optical Systems GmbH (2012): JenLas® fiber ns - Bedienungsanleitung.
- [8] Ladewig, A.; Schlick, G.; Fisser, M.; Schulze, V.; Glatzel, U. (2016): Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. In: *Additive Manufacturing* 10, S. 1–9. DOI: 10.1016/j.addma.2016.01.004.
- [9] Laser Components GmbH (2010): Strahlaufweitungen. Hg. v. Laser Components GmbH. Online verfügbar unter https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/zubehoer/opt_bauelemente/beam_expanders.pdf&no_cache=1, zuletzt geprüft am 10.01.21.
- [10] Nagarajan, Balasubramanian; Hu, Zhiheng; Song, Xu; Zhai, Wei; Wei, Jun (2019): Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives. In: *Engineering* 5 (4), S. 702–720. DOI: 10.1016/j.eng.2019.07.002.
- [11] Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Horn, M. et al. (2007): Material depending mechanisms in laser micro sintering., S. 403–418.
- [12] Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Horn, M. et al. (2007): Principles of laser micro sintering. In: *Rapid Prototyping Journal* 13 (4), S. 204–212. DOI: 10.1108/13552540710776151.
- [13] Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Maaz, A.; Ebert, R.; Exner, H. (2005): Advancements in Laser Micro Sintering. In: *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2005, Munich, June 2005*, S. 685–688.
- [14] Reijonen, Joni; Revuelta, Alejandro; Riipinen, Tuomas; Ruusuvaori, Kimmo; Puukko, Pasi (2020): On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 32, S. 101030. DOI: 10.1016/j.addma.2019.101030.
- [15] Scanlab GmbH (Hg.) (2018): Die SCANahead-Technologie. Prozessbeschleuniger in der Additiven Fertigung. Online verfügbar unter <https://www.scanlab.de/sites/default/files/SCANahead-DE.pdf>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.

- [16] Scanlab GmbH (Hg.) (2019): Datenblatt excelliSCAN. Online verfügbar unter <https://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Produktblaetter/Scan-Systeme/excel-liSCAN-DE.pdf>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- [17] Streek, A.; Müller, M.; Süß, T.; Ebert, R.; Hartwig, L.; Klötzer S. et al. (2009): Lasermikrosintern - Stand und Perspektiven.
- [18] Streek, A.; Regenfuss, P.; Ebert, R.; Exner, H. (2008): Laser Micro Sintering – A Quality Leap through Improvement of Powder Packing.

Anlagen

Anlage I - Dichteuntersuchungen.....	A-I
Anlage II - Zugversuch.....	A-II

Anlage I - Dichteuntersuchungen

Tabelle 14: Erreichte relative Dichten in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Bearbeitung unter Normalatmosphäre und unter Schutzgasatmosphäre.

Hatch in μm	Volumenenergiedichte in J/mm^3	Relative Dichte in %	
		Normalatmosphäre	Schutzgasatmosphäre
35	165,24	88,311	97,415
	155,99	93,108	98,704
	146,73	95,393	98,839
	137,47	97,050	99,607
	128,21	-	99,714
	118,96	96,913	99,453
	109,70	96,148	99,742
	100,44	96,395	99,626
	91,19	92,151	98,818
	81,93	81,707	81,980
40	144,59	94,606	98,295
	136,49	95,613	98,960
	128,39	97,099	99,288
	120,29	97,643	99,465
	112,19	96,795	99,415
	104,09	97,260	98,880
	95,99	96,653	98,824
	87,89	95,953	98,359
	79,79	92,389	-
	71,69	85,703	-

Anlage II - Zugversuch

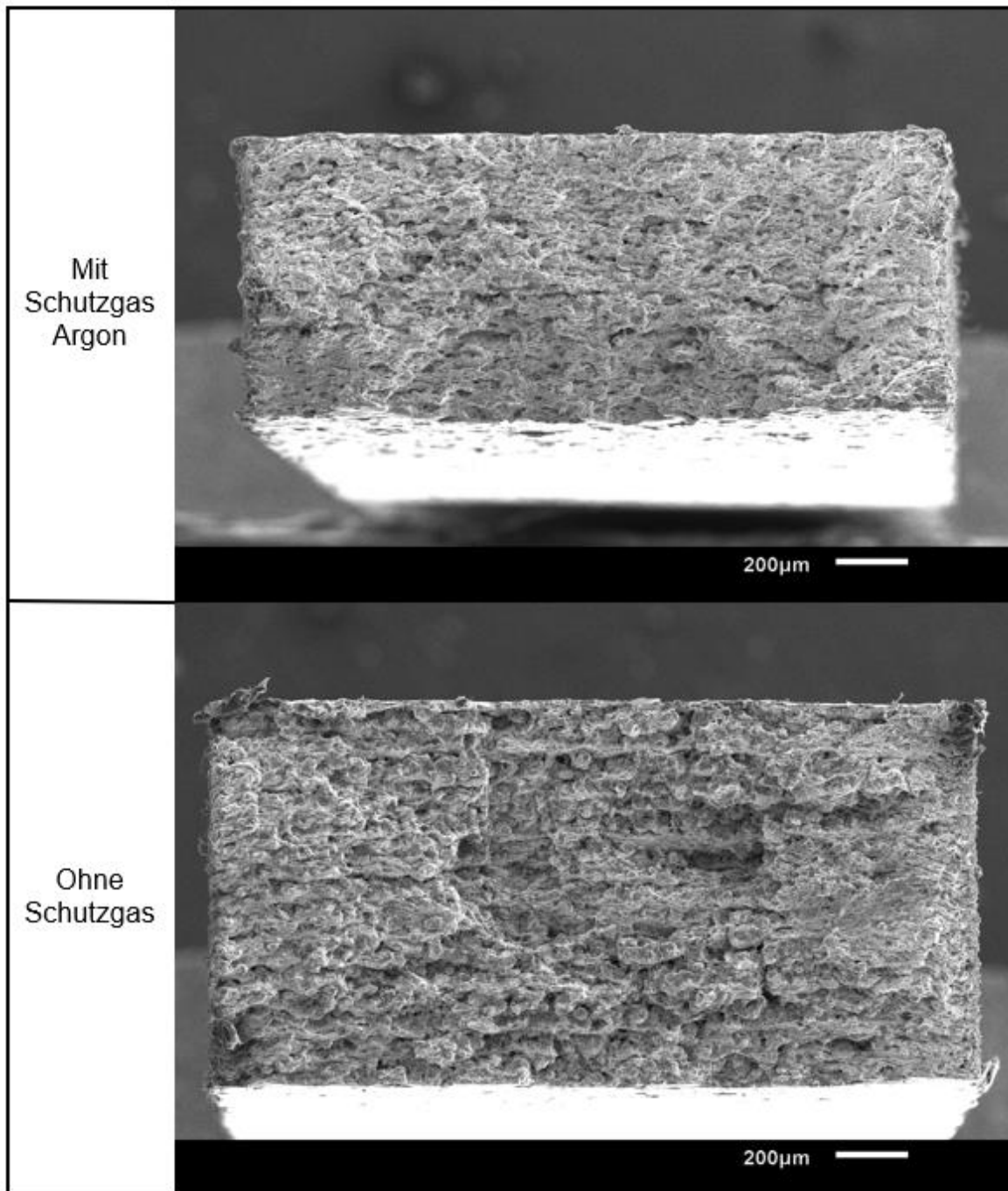


Abbildung 31: Bruchkanten der Zugproben für beide Umgebungsatmosphären. Es ist keine Einschnürung der Proben zu erkennen.

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 29.01.2021

Laura Römer