

BACHELORARBEIT

Herr
Florian Heinrich

**Lasermikrosintern von Edel-
stahl 316L - Untersuchungen
zum Einfluss der Schichtdicke**

Mittweida, 2021

Fakultät Ingenieurwissenschaften

BACHELORARBEIT

Lasermikrosintern von Edelstahl 316L - Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicke

Autor:

Herr

Florian Heinrich

Studiengang:

Lasertechnik

Seminargruppe:

LT17w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. André Streek

Zweitprüfer:

Martin Eler, M.Sc.

Einreichung:

Mittweida, 15.01.2021

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2021

BACHELOR THESIS

Laser micro sintering of stainless steel 316L - Investigations on the influence of the layer thickness

author:

Mr.

Florian Heinrich

course of studies:

Lasertechnik

seminar group:

LT17w1-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. André Streek

second examiner:

Martin Erler, M.Sc.

submission:

Mittweida, 15.01.2021

defence/ evaluation:

Mittweida, 2021

Bibliografische Beschreibung:

Heinrich, Florian:

Lasermikrosintern von Edelstahl 316L - Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicke.

-- 2021. - 9, 43, 4 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2021

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der schichtdickenabhängigen relativen Bauteildichte im Lasermikrosintern. Dazu werden der aktuelle Forschungsstand und Verfahren zur Bestimmung der Dichte aufgezeigt. In den praktischen Untersuchungen erfolgt die Ermittlung und Überprüfung geeigneter Prozessparameter, wobei hier, neben der Schichtdicke, vor allem die Volumenenergiedichte und die Pulswiederholfrequenz im Fokus stehen. Intensiver diskutiert wird dabei die Entstehung von Baufehlern und Poren.

Inhalt

Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	11
2 Stand der Technik	13
2.1 <i>Verfahrensbeschreibung</i>	13
2.1.1 <i>Selektives Laserschmelzen</i>	13
2.1.2 <i>Lasermikrosintern.....</i>	14
2.2 <i>Einfluss der Schichtdicke.....</i>	15
2.3 <i>Ergebnisse des Praktikumsberichts.....</i>	17
3 Anlagentechnik.....	19
3.1 <i>Technische Daten</i>	19
3.2 <i>Material</i>	22
4 Dichtebestimmung	24
4.1 <i>Stand der Technik</i>	24
4.2 <i>Problematik der Probenpräparation bei der bildanalytischen Messung.....</i>	25
5 Untersuchungen zur relativen Dichte	28
5.1 <i>Versuchsdurchführung</i>	28
5.2 <i>Auswertung und Diskussion der Ergebnisse.....</i>	30
5.2.1 <i>Ergebnisse der Dichtemessung.....</i>	30
5.2.2 <i>Problematik des Pulveraufschubs</i>	33

5.2.3	Möglichkeiten zur Verbesserung der relativen Dichte bei höheren Schichtdicken	36
5.3	<i>Relative Dichte bei 1000 kHz</i>	38
6	Weiterführende Untersuchungen	40
6.1	<i>Überprüfung der Ergebnisse</i>	40
6.2	<i>Archimedische Messung</i>	48
6.3	<i>Betrachtung der Deckflächen</i>	49
7	Zusammenfassung und Ausblick	52
7.1	<i>Zusammenfassung</i>	52
7.2	<i>Ausblick</i>	53
Literatur		54
Anlagen		56
Anlage I, Dichtemessung mit 500 kHz		LVII
Anlage II, Dichtemessung mit 1000 kHz		LIX
Selbstständigkeitserklärung		LXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des SLM-Prozesses.....	14
Abbildung 2: Relative Bauteildichte in Abhängigkeit von der Volumenenergiedichte bei einer Schichtdicke von 3 μm und Scangeschwindigkeit von 2 m/s.	18
Abbildung 3: Bauraum der Forschungsanlage mit Scankopf zur Strahlablenkung, Ring- und Klingenkörner, Absaugung, Substrat bzw. Bauplatzform und Keramikgrundplatte.....	20
Abbildung 4: Leistungsmessung vor der Reinigung der Optiken (blau) und nach der Reinigung der Optiken (orange).	21
Abbildung 5: Pulsform in Abhängigkeit von Pulswiederholfrequenz und mittlerer Laserleistung; oben: 500 kHz; unten 1000 kHz. Das Messspannung wurde auf die maximale Messspannung für 500 kHz normiert.	22
Abbildung 6: Vergleich der Korngrößenverteilung von (a) einmal verwendetem und gesiebttem und (b) dreimal verwendetem und gesiebttem Pulver.....	23
Abbildung 7: Vergleich von zwei Querschliffen von Bauteilen mit den gleichen Parametern, beide einmal geschliffen und poliert. (a) deutlich sichtbare Poren (b) verschmierte Poren.	26
Abbildung 8: Vergleich von Querschliffen derselben Probe nach (a) einmaligem Schleifen und Polieren und (b) Wiederholung der Polierschritte.....	27
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Probekörper für die Untersuchungen zur relativen Bauteildichte mit einer Pulswiederholfrequenz von 500 kHz mit Darstellung des Anbindungsparameters (rot).....	29
Abbildung 10: Schematische Darstellung von bi- und unidirektionaler Bestrahlung mit Kennzeichnung der Strecken, in denen der Laser angeschaltet (rot) und ausgeschaltet (blau) ist. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung des Laserstrahls an. Durch längere Aus-	

Strecken bei der unidirektionalen Bestrahlung sinkt die Laserauslastung k und die Prozesszeit erhöht sich.....	29
Abbildung 11: Querschliffaufnahme eines Probekörpers zur bildanalytischen Ermittlung der relativen Dichte. (a) unbearbeitetes Bild (b) Bild mit angepasster Helligkeit und Kontrast sowie mit eingestelltem Schwellwert und Messbereich für einen Parameter (gelb).	30
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Überlappung der Schmelzzonen nebeneinander befindlicher Bestrahlungslinien bei unterschiedlichen Schichtdicken. Links überlappen die Schmelzzonen ausreichend, während rechts bei einer größeren Pulverschichtdicke zwischen den Schmelzzonen nicht aufgeschmolzene Bereiche entstehen.....	32
Abbildung 13: Pulveraufschub bei gleichen Parametern in Abhängigkeit von der Bestrahlungsrichtung. (a) kein Pulveraufschub, Bestrahlungsrichtung von der Absaugung weg (b) Pulveraufschub, Bestrahlungsrichtung zeigt zur Absaugung hin.	35
Abbildung 14: Pulveraufschub mit deutlich sichtbaren Ablagerungen von aufgeworfenen Pulverpartikeln, die in Richtung Absaugung gesogen wurden.....	36
Abbildung 15: Vergleich des Pulveraufschubs für 500 kHz und 1000 kHz Pulswiederholffrequenz bei einer Schichtdicke von 4 μm und einem Linienabstand von 20 μm	39
Abbildung 16: Vergleich der Querschnittsbilder mit 50-facher Vergrößerung der Schichtdicken 4 μm , 5 μm und 6 μm für die Pulswiederholffrequenzen von 500 kHz und 1000 kHz.	42
Abbildung 17: REM-Aufnahmen der Querschliffe von 4 μm , 5 μm und 6 μm Schichtdicke für die Pulswiederholffrequenzen 500 kHz und 1000 kHz mit 600-facher Vergrößerung.	44
Abbildung 18: Überblick über die in den REM-Aufnahmen erkennbaren Poren.....	45
Abbildung 19: Unregelmäßigkeiten in der Pulverschichtdicke durch Springen der Klingenkralen.....	47

Abbildung 20: REM-Aufnahme der Deckfläche für den Parameter mit 500 kHz Pulswiederholfrequenz, 3 μm Schichtdicke, und 30 μm Linienabstand. Eingezeichnet sind die Bestrahlungslinien mit Richtungsangabe (Pfeile) und Poren. (Kreise). 50

Abbildung 21: REM-Aufnahmen der Deckflächen für die Parameter mit 4 μm Schichtdicke, 20 μm Linienabstand und 500 kHz bzw. 1000 kHz Pulswiederholfrequenz. 51

Abbildung 22: REM-Aufnahmen der Deckflächen für die Parameter mit 1000 kHz Pulswiederholfrequenz, 4 μm Schichtdicke und 30 μm bzw. 40 μm Linienabstand..... 51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter für die Untersuchung der relativen Bauteildichte mit einer Pulswiederholffrequenz von 500 kHz. In Klammern stehende Werte wurde nur für bestimmte Schichtdicken untersucht.	28
Tabelle 2: Übersicht über das Auftreten von Pulveraufschub in Abhängigkeit von Schichtdicke, Linienabstand und Pulsenergie	34
Tabelle 3: Parameter für die Untersuchung der relativen Bauteildichte mit einer Pulswiederholffrequenz von 1000 kHz. In Klammern stehende Werte wurden nur für bestimmte Schichtdicken untersucht.	38
Tabelle 4: Überblick über die Parameter zur Überprüfung der Ergebnisse. Die ausgewählten Parameter sind diejenigen, mit denen in den Untersuchungen aus Kapitel 5 für jede Pulswiederholffrequenz und Schichtdicke die jeweils höchsten relativen Dichten erzeugt wurden. Kursiv geschrieben sind die Parameter für 3 µm Schichtdicke und die relative Dichte aus den Untersuchungen des Praktikumberichts.	40
Tabelle 5: Vergleich der relativen Dichten der jeweils optimalen Parameter für alle untersuchten Schichtdicken und Pulswiederholffrequenzen aus Kapitel 5. Gezeigt werden die Ergebnisse der bildanalytischen Messung aus Kapitel 5, der Überprüfung mit 10-facher und 50-facher Vergrößerung. Kursiv dargestellt sind die Ergebnisse für 3 µm Schichtdicke aus dem Praktikumsbericht.	41
Tabelle 6: Ergebnisse der Dichtemessung nach dem archimedischen Prinzip und Vergleich der daraus bestimmten relativen Dichten mit den bildanalytisch gemessenen relativen Dichten mit 50-facher Vergrößerung.	49

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
HD-LMS	High Density-Laser Micro Sintering
LMS	Lasermikrosintern
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SLM	Selective Laser Melting
μ SLM	Micro Selective Laser Melting
VED	Volumenenergiedichte

Formelverzeichnis

Formelzeichen	SI-Einheit	Beschreibung
E_v	J/m ³	Volumenenergiedichte
f_P	Hz	Pulswiederholffrequenz
$h_{Bauteil}$	m	Bauteilhöhe
h_s	m	Linienabstand / Spurbabstand
I_{max}	W/m ²	Pulsspitzenintensität
k		Laserauslastung
l_z	m	Schichtdicke
M^2		Beugungsmaßzahl
$m_{Bauteil,Fluid}$	kg	Bauteilmasse im Fluid
$m_{Bauteil,Luft}$	kg	Bauteilmasse in Luft
P_{av}	W	mittlere Laserleistung
$P_{\%}$		mittlere Laserleistung in Prozent
P_{max}	W	Pulsspitzenleistung
$\rho_{Bauteil}$	kg/m ³	Bauteildichte
ρ_{Fluid}	kg/m ³	Fluiddichte
ρ_{Luft}	kg/m ³	Luftdichte
Q_P	J	Pulsenergie
$T_{Prozess}$	s	Prozesszeit für ein Bauteil
t_R	s	Rakelzeit
τ_H	s	Pulsdauer

$V_{Bauteil}$	m^3	Bauteilvolumen
V_{th}	m^3/s	theoretische Aufbaurrate
v_s	m/s	Scangeschwindigkeit
w_0	m	Tailenradius

1 Einleitung

Die Relevanz additiver Fertigungsverfahren ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Während kompakte 3D-Drucker mittlerweile ihren Weg in die Privathaushalte gefunden haben, werden Technologien wie die Stereolithografie bereits seit den 90er Jahren in der Medizin zur Herstellung von Implantaten genutzt. Der schichtweise Aufbau, den alle additiven Fertigungsverfahren innehaben, ermöglicht die Erzeugung von komplexen Formen, die mit klassischen subtraktiven Verfahren wie etwa dem Drehen oder Fräsen nicht realisierbar sind.

Das Selektive Laserschmelzen (SLM), bei dem mittels Laserstrahlung ein pulverförmiger Werkstoff aufgeschmolzen und durch eine rasche Abkühlung stoffschlüssig verbunden wird, macht es zudem möglich, mit sehr hoher Präzision und Flexibilität Bauteile in vergleichsweise kurzer Zeit herzustellen. Dadurch können Modelle, beispielsweise in der Entwicklung neuer Produkte, schnell und kostengünstig produziert werden. Das sogenannte Rapid Prototyping ist aus diesem Grund die Hauptanwendung von lasergestützten additiven Fertigungsverfahren. Aus dem Streben nach immer kleineren Strukturen und besseren Auflösungen der Verfahren entstand das am Laserinstitut Hochschule Mittweida entwickelte Lasermikrosintern (LMS), mit dem Pulver im Mikro- und Submikrometerbereich verarbeitet werden können.

Neben vielen weiteren prozessrelevanten Parametern wie der mittleren Laserleistung oder der Scangeschwindigkeit, besitzt die Schichtdicke einen wesentlichen Einfluss auf das Lasermikrosintern. Nicht nur begrenzt sie die Auflösung des Verfahrens in vertikaler und horizontaler Richtung, sondern bestimmt auch maßgeblich dessen Produktivität. Die Produktivität stellt dabei den wohl größten Nachteil des Lasermikrosinterns dar, da bereits das Erzeugen von Bauteilen mit Höhen im Zentimeterbereich mehrere Stunden Zeit in Anspruch nimmt. Eine Erhöhung der Schichtdicke würde diese Zeit zwar auf Kosten der Auflösung verringern, allerdings wird für viele Anwendungen die maximal mögliche Auflösung auch gar nicht benötigt. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, die optimalen Prozessparameter für einen möglichst großen Schichtdickenbereich zu kennen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Schichtdicken mit dem Lasermikrosintern und der dafür vorhandenen Forschungsanlage realisiert werden können. Es sollen für jede Schichtdicke die Parameter zur Erzeugung der bestmöglichen relativen Bauteildichte ermittelt werden. Dabei wird auf den Ergebnissen des Praktikumsberichts aufgebaut, der bereits erste Ergebnisse für eine Schichtdicke von 3 μm lieferte.

Dafür werden in dieser Arbeit zunächst das SLM und LMS beschrieben und ein Überblick über den bisherigen Forschungsstand zum Einfluss der Schichtdicke in beiden Verfahren gegeben. Die relevanten Ergebnisse des Praktikumsberichts werden kurz zusammengefasst. Für die genaue Charakterisierung des Verfahrens wird die Forschungsanlage sowie das verwendete Material (Pulver) gekennzeichnet. Im Anschluss folgt ein Überblick über die Verfahren zur Bestimmung der relativen Bauteildichte. Eine Problematik bei der Präparation von Querschliffen, die während der Untersuchungen aufgetreten ist, wird erläutert und diskutiert. Dann folgen die durchgeführten Versuche zur Erzeugung von hohen Bauteildichten in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Die Versuchsdurchführung wird beschrieben und die Ergebnisse diskutiert. Hier liegt der Fokus vorrangig auf dem Phänomen des Pulveraufschubs. Eine Überprüfung der ermittelten Parameter findet im darauffolgenden Kapitel statt. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit zusammengefasst und ein kurzer Ausblick über mögliche neue Forschungsziele gegeben.

2 Stand der Technik

2.1 Verfahrensbeschreibung

2.1.1 Selektives Laserschmelzen

Zur Erklärung der Verfahren wird zunächst auf das bereits kommerziell weit verbreitete Selektive Laserschmelzen eingegangen und basierend darauf die Übertragung dieses Verfahrens in den Mikrobereich erläutert. Abbildung 1 zeigt dabei schematisch den Ablauf beider Verfahren.

Beim SLM wird, wie auch beim Lasermikrosintern, eine stoffschlüssige Verbindung durch Erzeugung einer Schmelze und deren anschließende Abkühlung erreicht. Die Schmelze wird dabei durch Laserstrahlung erzeugt, mit der eine definierte Schicht aus Metallpulver bestrahlt wird. Der Wärmeeintrag ist dabei lokal begrenzt und kann durch die Änderung bestimmter Parameter (Laserleistung, Scangeschwindigkeit etc.) sehr genau geregelt werden. Weiterhin wird nicht nur das Pulver, sondern auch das unter diesem Pulver befindliche, bereits verfestigte Material teilweise aufgeschmolzen, wodurch eine Verbindung zwischen den einzelnen Schichten entsteht. Nachdem eine Pulverschicht mit dem Laserstrahl abgefahren (gescannt) wurde, senkt sich die Plattform um eine definierte Schichtdicke ab. Dann wird mittels einer Rakel die nächste Schicht Pulver auf die zuvor gescannte Schicht aufgetragen und der Prozess beginnt erneut. Im SLM findet beinahe ausschließlich kontinuierliche Laserstrahlung ihre Anwendung, in einigen Fällen werden auch gepulste Laser mit Pulsdauern im Bereich von 100 μs eingesetzt. Der gesamte Prozess findet unter Schutzgas statt, um die Oxidation des Bauteils möglichst gering zu halten.

Im SLM werden Pulver mit mittleren Korngrößen im Bereich von 20 – 50 μm verwendet. Allerdings kann so der Vorteil des lokal stark begrenzten Wärmeeintrags bei der Nutzung von Laserstrahlung nur teilweise ausgeschöpft werden, da die Auflösung des Verfahrens hier durch die (relativ) großen Pulverkörner begrenzt wird. Um also kleinere Strukturen erzeugen zu können, ist es notwendig, feinere Pulver zu verwenden.

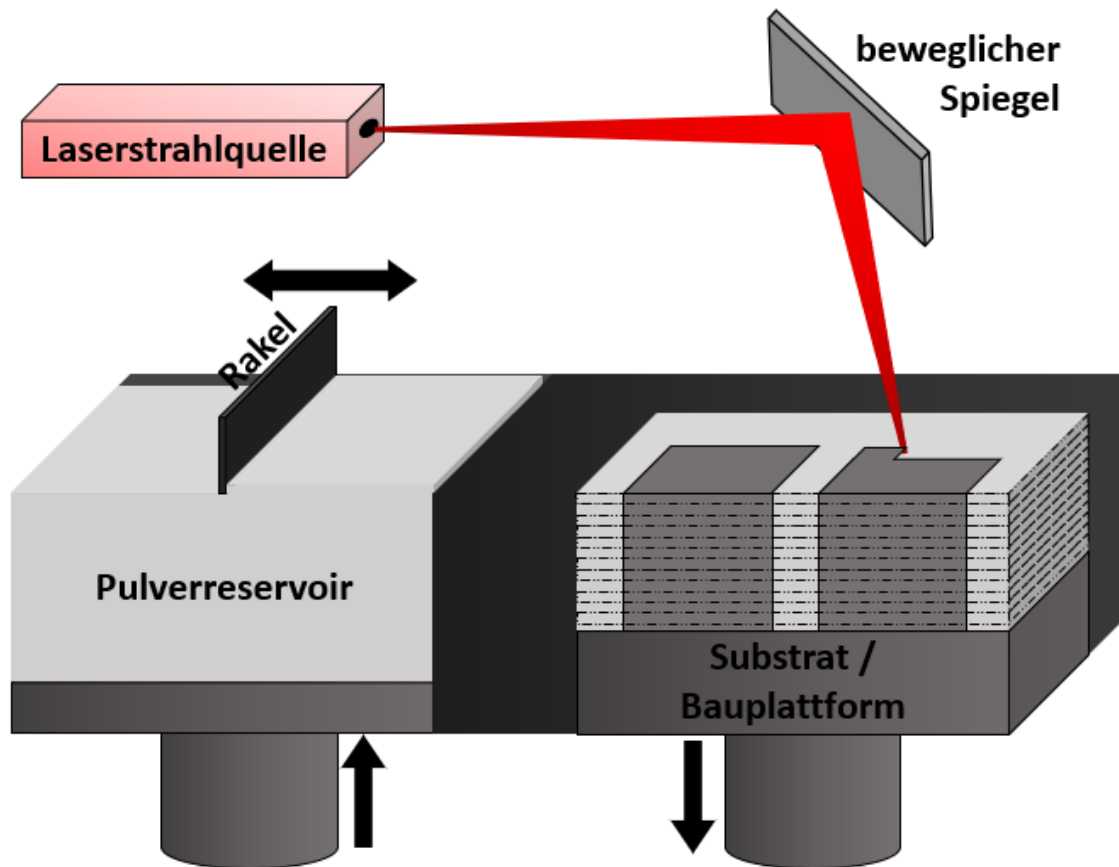


Abbildung 1: Schematische Darstellung des SLM-Prozesses.

2.1.2 Lasermikrosintern

Das Hauptproblem beim Einsatz von feinkörnigeren Pulvern liegt in deren Rakelbarkeit. Das Verhältnis von Masse zu Oberfläche sinkt, je kleiner die Pulverkörner sind. Dadurch werden die Kräfte zwischen den Körnern so groß, dass diese zu agglomerieren beginnen und sich dadurch die Fließeigenschaften des Pulvers verschlechtern. Dadurch war es nicht mehr möglich, mit dem herkömmlichen SLM eine stoffschlüssige Verbindung zu erzeugen. Um diese Pulver dennoch für die lasergestützte additive Fertigung nutzbar zu machen, ist es notwendig, den Rakelprozess anzupassen, um das Pulver vor der Bearbeitung besser zu komprimieren. Weiterhin werden kurzgepulste Faserlaser mit Pulsdauern im Bereich von 200 ns zur Anwendung gebracht [7].

Die hohen Intensitäten und Pulsenergien, die mit solch kurzen Pulsen erreicht werden, führen dazu, dass ein Teil des Pulvers verdampft und sich schlagartig ausdehnt. Durch diese Ausdehnung wirkt ein Druck auf den darunter befindlichen Schmelzpool, wodurch dieser komprimiert wird. Der geringe Energieeintrag und die kurzen Pulsenergien führen dann zu einer rapiden Abkühlung und Verfestigung der Schmelze [9].

Mit diesem Verfahren können Strukturen aus Metallpulvern mit Korngrößen bis zu 300 nm erzeugt werden. Allerdings war es dazu noch notwendig, den Prozess unter Schutzgas ablaufen zu lassen [7]. Die Nutzung von Pulvern mit Korngrößen zwischen 1 – 10 µm ermöglichte es aufgrund der geringeren Reaktivität dieser Pulver, das Lasermikrosintern (LMS) unter Normalatmosphäre einzusetzen. Es wird außerdem vermutet, dass durch das schnell expandierende, verdampfende Material der darunter liegende Schmelzpool abgeschirmt wird. Dadurch gelangt der Luftsauerstoff erst dann an das Material, wenn dieses bereits soweit abgekühlt ist, dass kaum noch Oxidation stattfinden kann [8]. Zwar verschlechtert sich die erreichbare Auflösung des Verfahrens durch die Nutzung der größeren Pulver, dafür kann die Aufbaurrate deutlich verbessert werden, während die Auflösung weiterhin rund eine Größenordnung besser ist als die des SLMs.

Eine Verbesserung des Lasermikrosinterns, genannt HD-LMS („High Density-Laser Micro Sintering“) gelang durch die Erhöhung der Pulverdichte durch ein spezielles Rakelsystem, wodurch geringere Pulsenergien notwendig waren, um eine stoffschlüssige Verbindung herzustellen [13]. Außerdem ermöglichte diese Entwicklung die Nutzung von höheren Puls- wiederhol frequenzen und einer dementsprechend höheren Pulsanzahl pro Fläche.

Das in den Untersuchungen zu dieser Arbeit genutzte Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des HD-LMS dar. Die Pulswiederhol frequenzen wurden auf bis zu 1000 kHz erhöht, wodurch der Pulsüberlapp zweier aufeinander folgender Pulse im Bereich von 80 – 90 % liegt. Weiterhin wurde die Bestrahlungsstrategie von einer stochastischen Verteilung der Pulse zu einer im SLM gebräuchlichen Linienbestrahlung geändert. Dadurch ähneln die Wärmeübertragungsprozesse im Material denen, wie sie beim Einsatz von kontinuierlicher Strahlung auftreten. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren auch als quasikontinuierliches (quasi-cw) LMS bezeichnet. Die tatsächliche Nutzung von kontinuierlicher Strahlung im Mikrobereich findet beim µSLM ihren Einsatz.

2.2 Einfluss der Schichtdicke

Ein entscheidender Nachteil der lasergestützten additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu herkömmlichen subtraktiven Fertigungsverfahren liegt in der geringen Produktivität. Meist finden SLM, µSLM und Lasermikrosintern ihre Anwendung bei der Fertigung von Kleinserien oder Prototypen, wo die Flexibilität dieser Verfahren gut genutzt werden können. Um deren industriellen Einsatz auch in der Massenfertigung ermöglichen zu können, liegt ein Teil des Bestrebens der Forschung darin, die Produktivität der Prozesse zu stei-

gern. Neben komplexeren Lösungen, wie beispielsweise der Nutzung mehrerer Laserstrahlen, ist das vor allem durch die Erhöhung der Schichtdicke möglich. Diesen Zusammenhang zeigt die folgende Formel, mit der die Prozesszeit $T_{Prozess}$ berechnet werden kann:

$$T_{Prozess} = \frac{V_{Bauteil}}{v_s \cdot h_s \cdot l_z \cdot k} + t_R \cdot \frac{h_{Bauteil}}{l_z} \quad (1)$$

Dabei ist $V_{Bauteil}$ das Bauteilvolumen, $h_{Bauteil}$ die Bauteilhöhe, v_s die Scangeschwindigkeit, h_s der Linienabstand, l_z die Schichtdicke, t_R die Rakelzeit pro Schicht und k die Laserauslastung, welche die Auszeiten des Lasers während der Bearbeitung berücksichtigt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Schichtdicke einen doppelten Einfluss auf die Prozesszeit besitzt, da sie einmal die theoretische Aufbaurate $V_{th} = v_s \cdot h_s \cdot l_z$ erhöht, sowie die insgesamt benötigten Schichten reduziert.

Um die Schichtdicke mit gleichbleibenden Bauteilqualitäten erhöhen zu können, ist es notwendig, andere Prozessparameter anzupassen. Als hilfreich hat sich dabei die Volumenergiedichte (VED) E_V erwiesen, die sich nach laut VDI 3405 wie folgt aus der mittleren Laserleistung P_{av} sowie den bereits oben erwähnten Parametern Scangeschwindigkeit, Linienabstand und Schichtdicke berechnen lässt:

$$E_V = \frac{P_{av}}{v_s \cdot h_s \cdot l_z} \quad (2)$$

Die Annahme, dass bei der Konstanthaltung der VED die Bauteilqualitäten im SLM ebenfalls konstant bleiben, wurde in mehreren Veröffentlichungen untersucht [1] [6]. Man kam zu dem Ergebnis, dass die VED lediglich als grober Überschlag genutzt werden sollte, da viele weitere, komplexere Einflüsse wie beispielsweise das Schmelzbadverhalten oder der Gasstrom nicht in der Formel berücksichtigt werden. Dementsprechend müsse die Formel zum effektiven Einsatz um diese weiteren Einflüsse erweitert werden. In der Regel kann aber gesagt werden, dass eine Erhöhung der Schichtdicke immer mit einer Erhöhung der mittleren Laserleistung und/oder einer Verringerung der Scangeschwindigkeit bzw. des Linienabstands einhergehen.

Untersuchungen von Wang et al. [15] sowie von Shi et al. [11], die große Schichtdicken von 150 μm bzw. 250 μm im SLM untersucht haben, zeigen, dass eine Reduzierung der Scangeschwindigkeit es ermöglicht, auch bei sehr hohen Schichtdicken noch dichte Bauteile mit relativen Dichten von 99,9 % zu erzeugen. In beiden Studien wurde dafür eine modifizierte Laseranlage von Renishaw genutzt, mit der Pulse im Bereich von 100 – 200 μs erzeugt werden konnte. Das war aufgrund der höheren Pulsspitzenintensitäten notwendig zur Bearbeitung der hohen Schichtdicken. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des

Linienabstands häufiger zu Baufehlern führte, bei denen Pulver nicht vollständig geschmolzen werden konnte [15]. Ma et al. [4] untersuchten Schichtdicken von 60 – 150 μm , wobei in dieser Studie kontinuierliche Laserstrahlung genutzt wurde. Mit hohen Scangeschwindigkeiten zwischen 2 – 4 m/s konnten relative Bauteildichten zwischen 99,3 % bis 99,8 % erzeugt werden, allerdings gibt es keine Aussage über die genutzte mittlere Laserleistung. Es wurde gezeigt, dass bei hohen Schichtdicken im Schmelzpool befindliches Gas nicht genug Zeit zum Austreten hat und sich so Mikroporen bilden [4].

Untersuchungen zur Schichtdicke im Lasermikrosintern existieren dagegen nicht. Bei der erstmaligen Nutzung von Pulver mit Korngrößen von 10 μm wurde die Schichtdicke von 1 μm auf 10 μm erhöht, wodurch die mittlere Laserleistung wie auch die Pulsenergie erhöht werden mussten [8]. Das hatte eine schlechtere Auflösung und höhere Oberflächenrauheiten zur Folge. Bei der einzigen Veröffentlichung zum Lasermikrosintern von 316L von Ullmann et al. zur Pulsanordnung wurde eine Schichtdicke von 4 μm genutzt, allerdings konnte hier lediglich relative Bauteildichten von 74,5 % erzeugt werden [14].

Im μSLM Fischer et al. nutzten Schichtdicken von 7 μm und konnten relative Bauteildichten von 99,32 % erreichen, während Drechsel et al. mit 10 μm Schichtdicke Werte von 99,5 % erzeugen konnten. In beiden Veröffentlichungen stellte sich ein Linienabstand im Bereich von 20 μm als bester Parameter heraus [2] [3]. Mit Schichtdicken von 5 μm konnten Roberts und Tien Mikroelektrodenarrays erzeugen [10].

2.3 Ergebnisse des Praktikumsberichts

Die Ergebnisse des Praktikumsberichts mit dem Thema „Parameteroptimierung und Ermittlung von Geometriemerkmalen beim Lasermikrosintern von Edelstahl 316L“, insbesondere der erste Teil über die Optimierung der relativen Bauteildichte, bilden die Grundlage für die Untersuchungen dieser Bachelorarbeit. Alle Untersuchungen aus dem Praktikumsbericht wurden zudem an der in dieser Arbeit genutzten Forschungsanlage durchgeführt.

Im Praktikumsbericht wurde die Abhängigkeit der relativen Bauteildichte von der Volumenenergiedichte untersucht. Die Scangeschwindigkeit betrug 2 m/s und die Schichtdicke 3 μm , während Linienabstand und mittlere Laserleistung variiert wurden. Die relative Bauteildichte in Abhängigkeit von der Volumenenergiedichte ist in Abbildung 2 dargestellt.

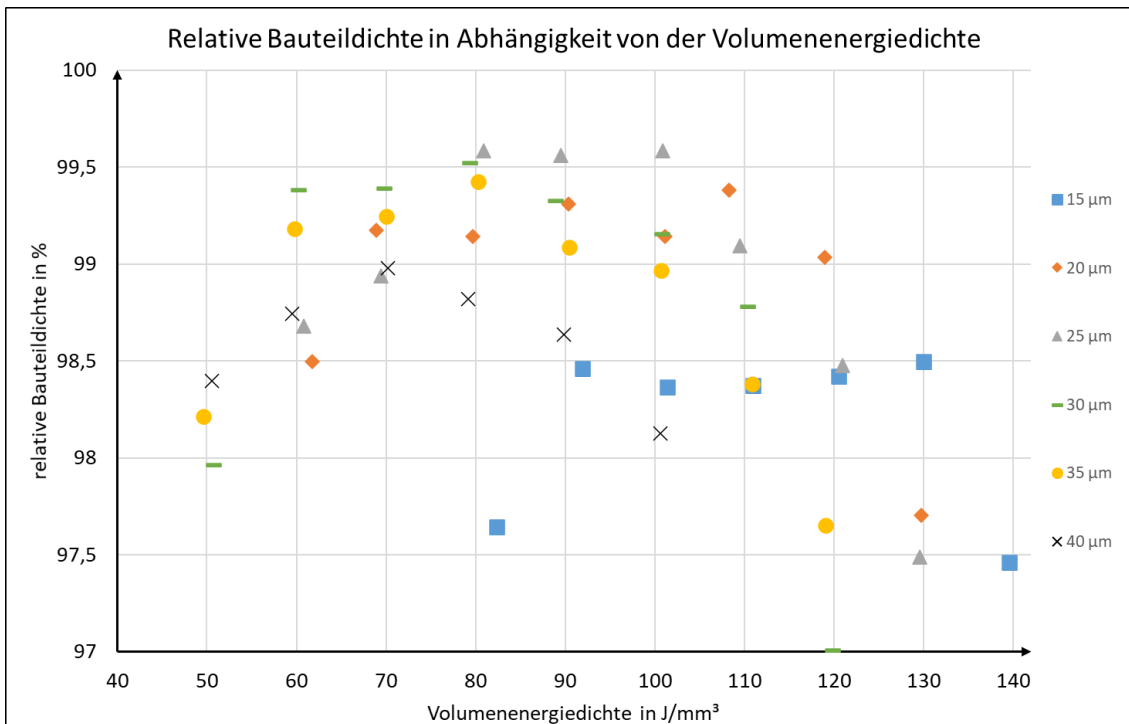


Abbildung 2: Relative Bauteildichte in Abhängigkeit von der Volumenenergiedichte bei einer Schichtdicke von 3 µm und Scangeschwindigkeit von 2 m/s.

Es konnten relative Bauteildichten bis zu > 99,5 % erzeugt werden, mit Linienabständen von 25 µm und 30 µm. Die dafür eingesetzte VED lag im Bereich von 80 J/mm³. Bei niedrigeren VED war der Energieeintrag zu gering, so dass das Pulver nicht vollständig verschmolzen werden konnte. Bei zu hohen VED limitierte der Effekt des Pulveraufschubs das Verfahren, bei dem durch das verdampfende Material umliegendes Pulver aufgeworfen wurde, was im Verlauf der Bestrahlung zu groben Baufehlern führte. Höhere Linienabstände führten dazu, dass die Verbindung zweier nebeneinander liegenden Einzelspuren unvollständig war, während bei niedrigeren Linienabstände bereits festes Material wieder abgetragen wurde. Bei der Überprüfung der Ergebnisse stellte sich dann der Linienabstand von 30 µm und die Volumenenergiedichte von 80 J/mm³ als bester Parameter zur Erzeugung dichter Strukturen heraus, wobei allerdings die relative Dichte mit 98,9 % statt mit 99,5 % gemessen wurde.

Die Schichtdicke von 3 µm wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht, sondern die Ergebnisse des Praktikumsberichts dafür übernommen.

3 Anlagentechnik

3.1 Technische Daten

Zur Durchführung der Versuche wurde eine Forschungsanlage genutzt, welche mit einem 50 W Faserlaser von SPI Lasers mit einer Hauptwellenlänge von 1064 nm und einer Beugungsmaßzahl M^2 von 1,3 ausgestattet ist. Der Laser kann sowohl im kontinuierlichen Betrieb, wie auch gepulst mit Frequenzen bis zu 1 MHz betrieben werden. Die Ablenkung des Laserstrahles erfolgt mit einem Galvanometerscanner hurrySCAN II 14 von Scanlab. Als fokussierende Optik dient ein F-Theta Objektiv mit einer Brennweite von 100 mm. Damit kann der Laserstrahl auf einen Fokusbereich von 23 μm fokussiert werden.

Eine Ringrakel, die gleichzeitig als Pulverreservoir mit entsprechender Masse zum Verdichten des Pulvers dient, und eine zusätzliche Klingenrakel, die einen optimalen Abzug des Pulvers gewährleistet, werden durch die Rakelachse in kreisförmiger Bewegung über ein Edelstahlsubstrat bewegt. Das Substrat mit einem Durchmesser von 24 mm ist auf eine bewegliche Achse geschraubt und kann in vertikaler Richtung auf 0,5 μm genau eingestellt werden. Der Scankopf befindet sich am oberen Bildrand (siehe Abbildung 3) und kann über eine Achse ebenso wie das Substrat gesenkt bzw. gehoben werden. Alle Achsen werden mit Schrittmotoren betrieben. Eine Absaugung ermöglicht einen sauberen Prozess und entfernt Dämpfe sowie Pulverrückstände aus dem Bauraum.

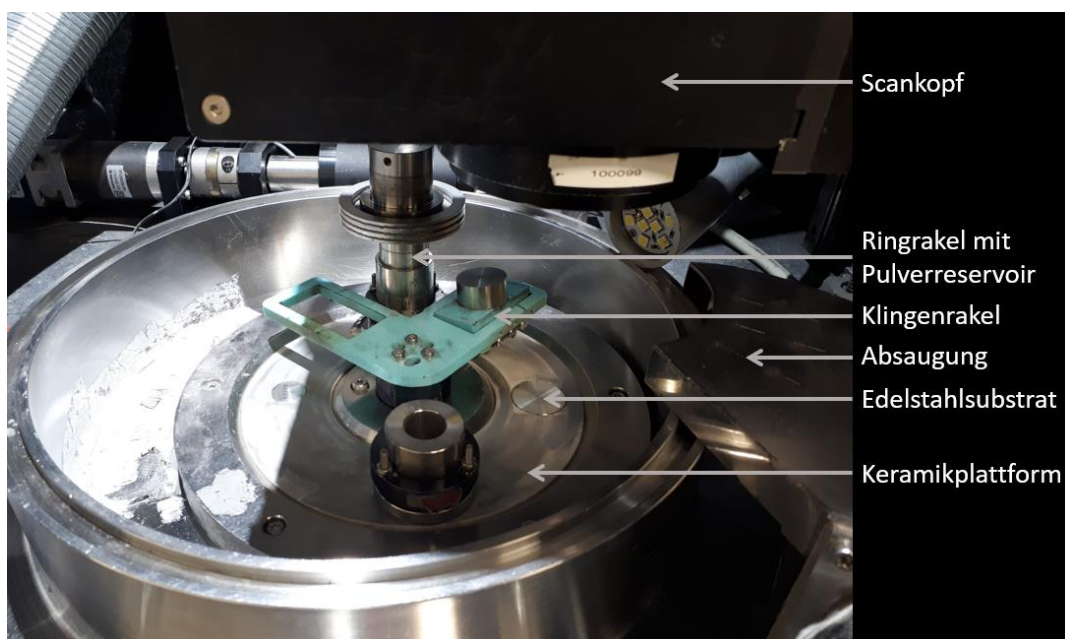


Abbildung 3: Bauraum der Forschungsanlage mit Scankopf zur Strahlablenkung, Ring- und Klingenrakel, Absaugung, Substrat bzw. Bauplattform und Keramikgrundplatte.

Vor Beginn der eigentlichen Versuche wurden eine Leistungsmessung und eine Vermessung der Pulsform durchgeführt.

Die Leistungsmessung erfolgte mit einem Leistungsmessgerät von Coherent. Bei der ersten Messung (siehe Abbildung 4) ist aufgefallen, dass insbesondere der letzte Spiegel im Strahlengang, welcher den Laserstrahl in den Scanner führt, stark verschmutzt war und die gemessene Leistung aus diesem Grund geringer war, als in zuvor durchgeführten Messungen. Hier wurde auch festgestellt, dass genannter Spiegel sehr anfällig für Verschmutzung ist, da dessen Spiegelfläche in einem 45°-Winkel nach oben zeigt, um den von oben kommenden Laserstrahl in den Scanner abzulenken. Dadurch kann sich durch den Sinterprozess entstandener Schmutz leicht auf die Oberfläche ablegen. Aus diesem Grund muss insbesondere dieser Spiegel in regelmäßigen Abständen auf Verschmutzung überprüft und notfalls gereinigt werden.

Abbildung 4 zeigt ebenfalls das Ergebnis der Leistungsmessung nach Reinigung aller Optiken. Mittels linearer Regression kann dann die mittlere Leistung nach der folgenden Formel berechnet werden ($P_{\%}$ beschreibt die mittlere Laserleistung in Prozent):

$$P_{av} = \left(0,472 \frac{W}{\%}\right) \cdot P_{\%} - 3,3554 W$$

Da sich die Untersuchungen dieser Bachelorarbeit auf den vorhergehenden Praktikumsbericht stützen, musste zur Reproduktion der Ergebnisse dieses Praktikumsberichts die neue Leistungsmessung berücksichtigt werden. Exemplarisch bedeutet das, dass die Leistung von $P_{\%} = 40 \%$ (entspricht im Praktikumsbericht $P_{av} = 14,278 W$) nun einem prozentualen Wert von $P_{\%} = \frac{P_{av} + 3,3554 W}{0,472 \frac{W}{\%}} \approx 37,4 \%$ entspricht.

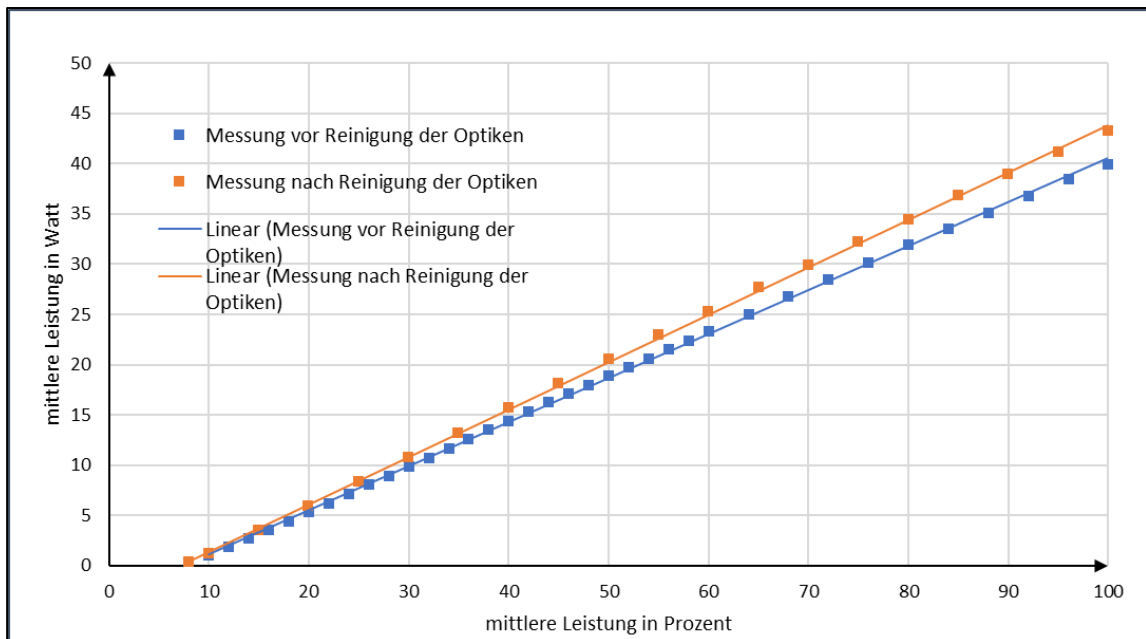


Abbildung 4: Leistungsmessung vor der Reinigung der Optiken (blau) und nach der Reinigung der Optiken (orange).

Eine Messung der Pulsform erfolgte aus dem Grund, um eine mögliche Veränderung der Pulsform bei der Variierung der Pulswiederholffrequenz festzustellen. Bei der Messung wurde eine Fotodiode an ein Oszilloskop angeschlossen und der zeitliche Spannungsverlauf gemessen. Um die Fotodiode mit dem Laserstrahl nicht zu zerstören, wurde dieser auf eine Keramikplatte gerichtet und die Fotodiode entsprechend so platziert, dass die gestreute Strahlung gemessen werden konnte. Die Ergebnisse der Messung bei Pulswiederholffrequenzen von 500 kHz und 1000 kHz sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die vom Oszilloskop angegebene Pulsdauer betrug bei allen Pulswiederholffrequenzen und mittleren Laserleistungen 205 ns. Die Unterschiede in den Pulsformen sind so gering, dass kein Einfluss dieser auf den Prozess zu erwarten ist. Eine Pulserhöhung, die den Prozess tatsächlich stören könnte, wurde nicht festgestellt.

Eine Veränderung der mittleren Laserleistung hatte wie zu erwarten die Folge, dass die maximale Pulshöhe linear abnimmt, während die Pulsform erhalten bleibt.

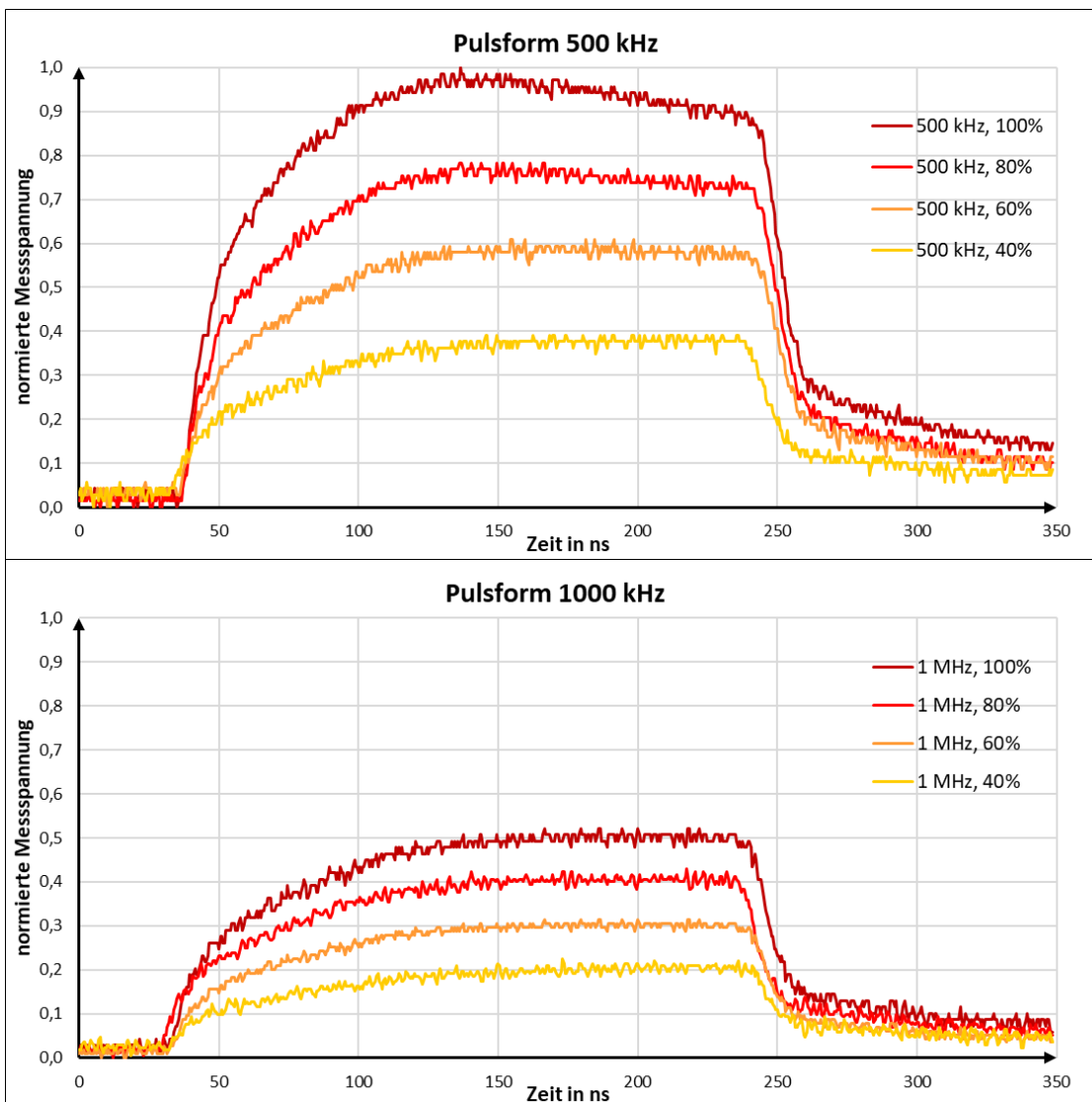


Abbildung 5: Pulsform in Abhängigkeit von Pulsfrequenz und mittlerer Laserleistung; oben: 500 kHz; unten 1000 kHz. Das Messspannung wurde auf die maximale Messspannung für 500 kHz normiert.

3.2 Material

Als Ausgangsmaterial wurde Pulver aus Edelstahl 316L mit einem Korndurchmesser von $d_{90} = 10 \mu\text{m}$ der Firma Sandvik genutzt. Zur Überprüfung wurde das Pulver mit dem Partikelgrößen-Analysator Bluewave von Microtrac hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht (siehe Abbildung 6) und die Angabe des Herstellers bestätigt.

Da in den pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren stets nur ein Teil des Pulvers für die tatsächliche Erzeugung des Bauteils genutzt wird, ist es notwendig, das überschüssige Pulver aufzubereiten, um es anschließend erneut verwenden zu können. Dafür wird das Pulver in drei Siebstufen mit Maschenweiten von $63 \mu\text{m}$, $45 \mu\text{m}$ und zuletzt $32 \mu\text{m}$

gesiebt. Genutzt wurde dazu eine Fritsch Analysette 3 Pro. Dadurch werden alle größeren Verschmutzungen (Keramiksplitter der Grundplatte, Pinselhaare etc.), aus dem Pulver entfernt. Lediglich größere Pulveragglomerate können sich auch nach dem Sieben weiter im Pulver befinden. Messungen der Korngrößenverteilung von ein- und dreimal verwendetem Pulver zeigen zwar leichte Veränderung der Verteilung mit zunehmender Anzahl der Nutzung (siehe Abbildung 6) insoweit, dass die Häufigkeit größerer Partikel steigt. Allerdings sind durch diese Verunreinigungen bisher keine Unregelmäßigkeiten während des Bauprozesses und hinsichtlich der erzeugten Teile aufgefallen.

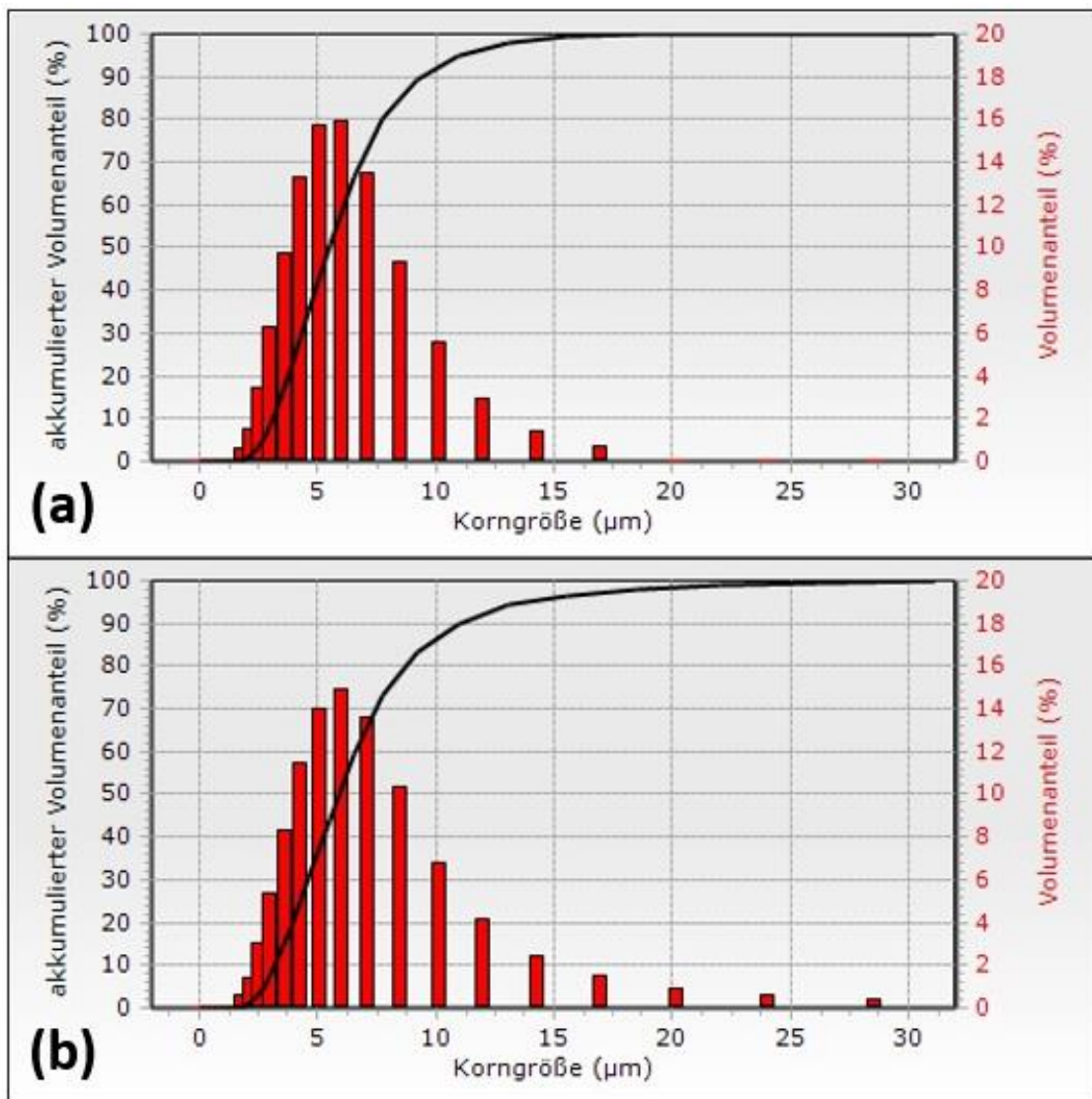


Abbildung 6: Vergleich der Korngrößenverteilung von (a) einmal verwendetem und gesiebttem und (b) dreimal verwendetem und gesiebttem Pulver.

4 Dichtebestimmung

4.1 Stand der Technik

Die relative Bauteildichte bzw. die Porosität ist eine wichtige Kenngröße von additiv gefertigten Strukturen. In der Regel wird eine möglichst hohe relative Dichte angestrebt, aber auch die Herstellung von porösen Strukturen wird gegenwärtig erforscht. Dazu ist es notwendig, die Dichte von Bauteilen zuverlässig messen zu können. Allerdings hat sich dafür in Hinblick auf die Verfahren SLM, μ SLM und LMS noch kein standardisiertes Verfahren etabliert. Ein kurzer Überblick über die herkömmlichen Verfahren wird dafür in diesem Kapitel gegeben.

Spierings et al. verglichen verschiedene Methoden zur Dichtebestimmung hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrer Reproduktionsrate. Untersucht wurden in dieser Studie das archimedische Messprinzip, die bildanalytische Auswertung von Querschliffe und Röntgen-Mikrotomographie [12].

Bei der archimedischen Messung wird das Bauteil einmal an Luft ($\rho_{Luft}, m_{Bauteil,Luft}$) und einmal in einem Fluid mit bekannter Dichte ($\rho_{Fluid}, m_{Bauteil,Fluid}$) gewogen. Durch die Auftriebswirkung lässt sich aus der Differenz dieser Werte die Dichte des Bauteils bestimmen. Für eine exakte Messung muss zudem der Auftrieb an der Luft mit einbezogen werden. Dann kann die Dichte nach folgender Formel berechnet werden:

$$\rho_{Bauteil} = (\rho_{Fluid} - \rho_{Luft}) \cdot \frac{m_{Bauteil,Luft}}{m_{Bauteil,Luft} - m_{Bauteil,Fluid}} + \rho_{Luft} \quad (3)$$

Spierings et al. vermerkten, dass der Messfehler der archimedischen Messung größer wird, je näher die Dichte des Fluides und des Bauteils beieinanderliegen. Um den Messfehler klein zu halten, wurde empfohlen, dass $\rho_{Fluid} \leq 0,2 \cdot \rho_{Bauteil}$ sein sollte. Es zeigte sich zudem, dass Aceton aufgrund der geringeren Oberflächenspannung und der damit einhergehenden besseren Benetzung des Bauteils besser geeignet ist als Wasser.

Ein wichtiger Vorteil der Messung nach dem archimedischen Prinzip ist der, dass das Bauteil, im Gegensatz zur bildanalytischen Auswertung von Querschliffen, nicht zerstört werden muss. Allerdings erhält man mit dieser Methode keine Informationen über die Größe, Form, Anzahl und Verteilung möglicher Poren.

Dies ist mit der bildanalytischen Auswertung von Querschliffen möglich. Dazu müssen die Bauteile zunächst getrennt werden. Klassisch werden die getrennten Proben dann in Epo-

xidharz eingebettet und im Anschluss plangeschliffen und poliert. Dann werden mittels Mikroskop Aufnahmen dieser Querschliffe gemacht und diese dann hinsichtlich ihrer Grauwertverteilung ausgewertet. Entscheidend für repräsentative Ergebnisse ist die Wahl der Vergrößerung, mit der die Aufnahmen gemacht werden. So erhöht sich zwar die Auflösung der Bilder mit steigender Vergrößerung, dafür wird der aufgenommene Bereich immer kleiner. Aus diesem Grund müssen für höhere Vergrößerungen mehrere Querschliffaufnahmen derselben Probe ausgewertet werden. Spierings et al. geben als Empfehlung eine Mindestvergrößerung von 40 an.

Die Auswertung der Bilder erfolgt mit dem Grafikprogramm GIMP. Das Bild wird in ein Graustufenbild umgewandelt und ein Grenzwert festgelegt, so dass die Poren möglichst gut erkennbar sind. Gemessen wird dann der Anteil der Poren am Gesamtbild.

Es zeigte sich, dass die Abweichung der Ergebnisse von archimedischer Messung und der bildanalytischen Auswertung bei hohen relativen Dichten $> 98\%$ im Bereich von 1% liegen. Allerdings war die Standardabweichung bei der archimedischen Messung geringer, da hier das gesamte Bauteil und nicht nur ein einzelner Querschliff gemessen wurde. Gleiche Ergebnisse lieferte eine Studie von Peters et al. zur Dichtebestimmung von Sinterstählen. Hier lag die Abweichung beider Messmethoden bei $0,6\%$, wobei die Streuung bei der bildanalytischen Auswertung größer war [5].

Aufgrund der geringen Abweichungen im zwischen beiden Verfahren kann gesagt werden, dass beide Messmethoden zur Bestimmung der Bauteildichte genutzt werden können. Die Messung nach dem archimedischen Prinzip hat dabei die Vorteile der schnellen und zerstörungsfreien Durchführung, sowie der geringeren Streuung der Ergebnisse. Um genauere Informationen über die Größe, Form und Verteilung der Poren zu erhalten, eignet sich dagegen die bildanalytische Auswertung von Querschliffen besser.

4.2 Problematik der Probenpräparation bei der bildanalytischen Messung

Um mit der bildanalytischen Auswertung von Querschliffen zuverlässige Ergebnisse zu erhalten ist eine grundlegende Voraussetzung, dass die Poren auf den Querschliffen einwandfrei zu erkennen sind. Ein Problem, das sich über die Zeit bei der Auswertung von Bauteilen gezeigt hat, ist die korrekte Präparation der Proben. Da dieses Problem zu Beginn der Untersuchungen nicht bekannt war, ist es zur späteren Erklärung der Durchführung und der Ergebnissen der Untersuchungen notwendig, bereits an dieser Stelle das Problem zu erläutern.

Die Präparation der Proben erfolgte wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Proben werden zunächst vom Substrat und anschließend in der Mitte parallel zur Aufbaurichtung mittels Trennschleifen getrennt. Dafür wird die Trenneinrichtung Secotom-50 von Struers genutzt. Im Anschluss erfolgt ein Einbetten der getrennten Proben in Epoxidharz und nach einer Aushärtedauer von mindestens zwölf Stunden werden die Proben mit einer Struers Tegra-min-25 geschliffen und poliert, wobei der letzte Polierschritt mit einer Siliziumoxidsuspension mit einer Korngröße von $0,25\ \mu\text{m}$ durchgeführt wurde. Zur Vermeidung von Verschmutzungen werden die Proben zudem mit Druckluft und Isopropanol gereinigt.

Die Aufnahmen der Querschliffe erfolgt mit einem Laserscanningmikroskop Olympus LEXT OLS4000. Bei 10-facher Vergrößerung werden Einzelbilder mittels Stitching zusammengesetzt, so dass am Ende der Querschliff der gesamten Proben als eine Aufnahme vorliegt. In späteren Untersuchungen erfolgte die Aufnahme der Bilder auch mit 50-facher Vergrößerung. Die Auswertung erfolgt dann, wie ebenfalls in Kapitel 4.1 beschrieben, mit der Grafiksoftware ImageJ.

Die Problematik bestand nun darin, dass die gemessenen relativen Dichten davon abhängig waren, wie gut die Probe geschliffen und poliert war. Alle Proben wurden mit den exakt selben Schleif- und Polierschritten bearbeitet, dennoch waren einige der Proben so stark verschmiert, dass kaum Poren zu erkennen waren, während andere Querschliffe wiederum in einwandfreien Zustand waren. Insbesondere aufgefallen ist das bei den beiden Querschliffen in Abbildung 7.

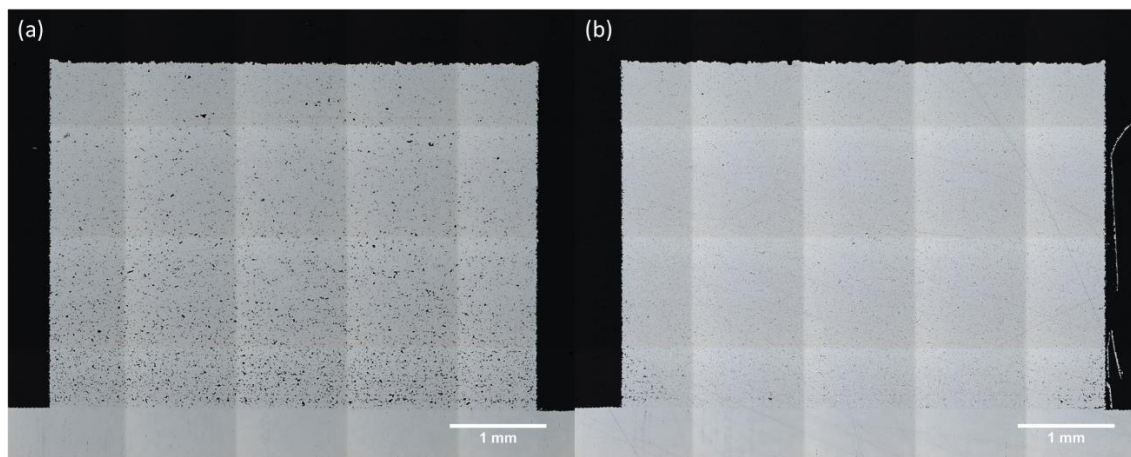


Abbildung 7: Vergleich von zwei Querschliffen von Bauteilen mit den gleichen Parametern, beide einmal geschliffen und poliert. (a) deutlich sichtbare Poren (b) verschmierte Poren.

Die beiden Proben wurden im selben Prozess mit denselben Parametern erzeugt, sollten also die gleichen relativen Dichten besitzen. Die Querschliffe der Proben unterscheiden sich allerdings stark, denn während bei Abbildung 7a die Poren deutlich zu erkennen sind, ist Abbildung 7b so stark verschmiert, dass kaum Poren vorhanden zu sein scheinen. Das

spiegelt sich auch in den gemessenen relativen Dichten wider, da der Wert von Abbildung 7b mit 99,74 % deutlich höher ist als die 97,55 % von Abbildung 7a.

Dieses Problem wurde ebenfalls von Peters et al. bei Untersuchungen zur Dichtebestimmung von Sinterstählen beobachtet. Sie zeigten, dass Scherverformungen dazu führen können, dass sich Blechhäute über die Poren legen und dadurch die Ergebnisse verfälschen können [5].

Diese Inkonstanz in der Probenpräparation führt zu dem Problem, dass man sich nicht sicher sein kann, wann ein Querschliff die tatsächlich vorhandenen Poren aufzeigt und wann nicht. So könnte ohne dieses Wissens angenommen werden, dass mit dem genutzten Parameter nahezu vollständig dichte Bauteile erzeugt werden können, obwohl dies offensichtlich nicht der Fall ist. Teilweise gelöst werden konnte dieses Problem, indem die eingebetteten Proben mit den letzten drei Polierschritten erneut bearbeitet werden. Ob dadurch tatsächlich alle Poren sichtbar gemacht werden, und somit die tatsächliche relative Dichte gemessen werden kann, ist aber dennoch nicht garantiert. In Abbildung 8 ist der Unterschied zwischen einer einmal geschliffenen und polierten Probe (8a) und derselben Probe nach einem zweiten Mal Polieren (8b) zu sehen.

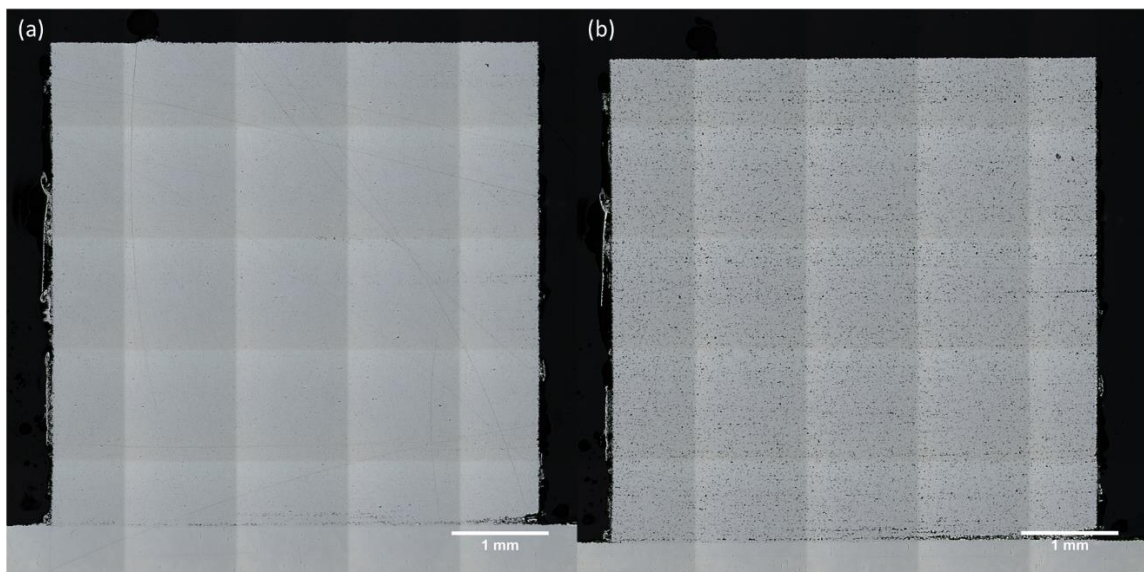


Abbildung 8: Vergleich von Querschliffen derselben Probe nach (a) einmaligem Schleifen und Polieren und (b) Wiederholung der Polierschritte.

Aus diesem Grund wurden zur Überprüfung der bildanalytisch ermittelten relativen Dichten weitere Methoden, unter anderem eine Messung nach dem archimedischen Prinzip, durchgeführt. Diese werden an den entsprechenden Punkten in dieser Arbeit genauer erläutert und die Ergebnisse diskutiert.

5 Untersuchungen zur relativen Dichte

5.1 Versuchsdurchführung

Als Hauptparameter für die Untersuchungen wurde die bereits in Kapitel 2.2 diskutierte Volumenenergiedichte genutzt. Aus den Ergebnissen des Praktikumsberichts (vgl. Kapitel 2.3) stellte sich eine VED von 80 J/mm^3 bei den Linienabständen von $25 \mu\text{m}$ bzw. $30 \mu\text{m}$ als bester Wert heraus. Dieser Wert diente von daher als Ausgangspunkt.

Schichtdicken von $2 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ sowie $6 \mu\text{m}$ wurden jeweils mit Linienabständen von $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $40 \mu\text{m}$ untersucht. Für die Schichtdicken von $5 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$ wurden zusätzlich Proben mit einem Linienabstand von $15 \mu\text{m}$ erzeugt. Die Scangeschwindigkeit betrug konstant 2000 mm/s . Durch Ändern der mittleren Laserleistung wurde die VED in 10 J/mm^3 -Schritten angepasst. Eine Übersicht über die Parameter gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Parameter für die Untersuchung der relativen Bauteildichte mit einer Pulswiederholfrequenz von 500 kHz . In Klammern stehende Werte wurden nur für bestimmte Schichtdicken untersucht.

Parameter	untersuchte Werte
Schichtdicke / μm	2,4,5,6
Linienabstand / μm	(15),20,30,40
Scangeschwindigkeit / mm/s	2
$\Delta\text{VED} / \text{J/mm}^3$	(2,5),(5),10
Pulswiederholfrequenz / kHz	500

Für die Untersuchungen wurden für jede Schichtdicke und Linienabstand jeweils vier Quader mit einer Grundfläche von $5 \times 5 \text{ mm}$ erzeugt (siehe Abbildung 9). Die Anbindung der Bauteile zum Substrat, also die ersten rund 30 Schichten, stellen vor allem bei geringen Leistungen ein Problem dar. Die Höhe des Substrates muss vor jedem neuen Baujob manuell per Hand so eingestellt werden, dass die Oberfläche des Substrates in einer Linie mit der der Keramikplattform steht. Dabei kommt es unweigerlich zu Abweichungen in der Höhe, wodurch die Schichtdicken der ersten Schichten stets undefiniert sind. Eine leichte Verkippung des Substrates verschlimmert dies noch. Aus diesem Grund wurden bei allen Proben die ersten 30 Schichten mit den aus dem Praktikumsbericht ermittelten Parametern bei einer Schichtdicke von $3 \mu\text{m}$ erzeugt und danach die eigentlich zu untersuchenden Parametern eingestellt. Dort wurde dann, ausgehend von einer minimalen VED, bei der noch ein Aufbau möglich, die VED aller $500 \mu\text{m}$ Aufbauhöhe um die bereits genannten 10 J/mm^3 erhöht, bis während des Prozesses deutlich sichtbare Baufehler durch die zu hohe Leistung

entstanden. Die Ergebnisse des Praktikumsberichtes zeigten bereits, dass dieses Vorgehen einen ausreichend großen Bereich der VED ermöglicht.

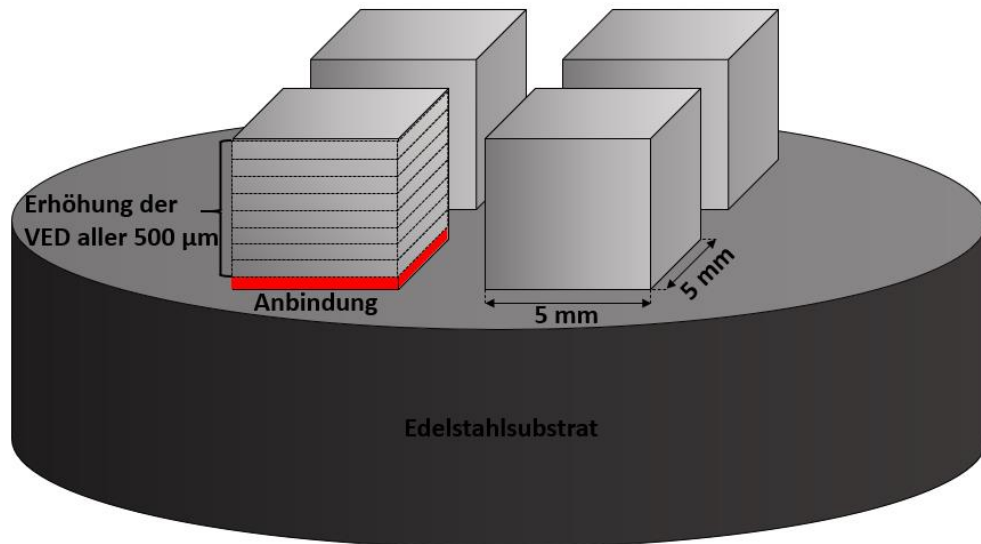


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Probekörper für die Untersuchungen zur relativen Bauteildichte mit einer Pulsfrequenz von 500 kHz mit Darstellung des Anbindungsparameters (rot).

Die Bestrahlung erfolgte stets bidirektional, da die Ergebnisse des Praktikumsberichtes keine Unterschiede zwischen einer uni- und bidirektionalen Bestrahlung hinsichtlich der Dichte ergaben und so die Bauzeit verringert werden kann. Bidirektional bedeutet, dass der Laserstrahl die Bestrahlung der jeweils nächsten Linie von der Seite beginnt, an der die vorherige Linie endete, während bei einer unidirektionalen Bestrahlung das Abscannen der Linien stets von derselben Seite beginnt (siehe Abbildung 10). Dadurch sind die Totzeiten des Lasers während einer Bestrahlung größer und der Faktor für die Laserauslastung k dementsprechend bei der unidirektionalen Bestrahlung kleiner, wodurch sich die Bauzeit erhöht. Der Bestrahlungswinkel wurde pro Schicht um 139° gedreht.

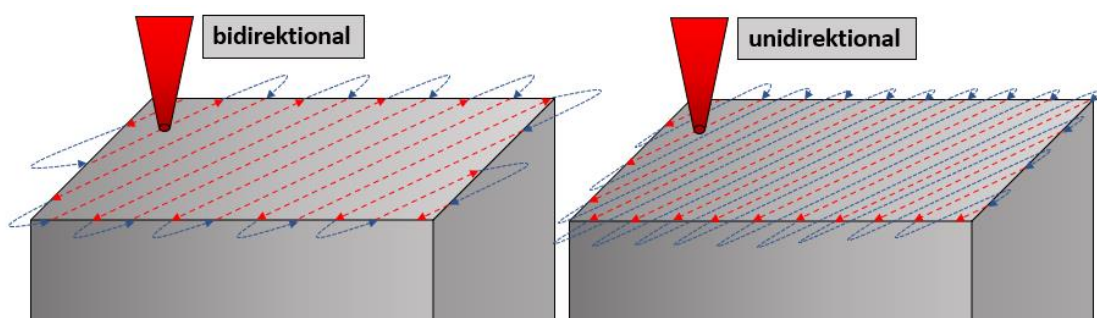


Abbildung 10: Schematische Darstellung von bi- und unidirektionaler Bestrahlung mit Kennzeichnung der Strecken, in denen der Laser angeschaltet (rot) und ausgeschaltet (blau) ist. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung des Laserstrahls an. Durch längere Aus-Strecken bei der unidirektionalen Bestrahlung sinkt die Laserauslastung k und die Prozesszeit erhöht sich.

Die Präparation der Proben erfolgte wie in den Kapiteln 4.1 und 4.2 bereits beschrieben. Bei allen Proben wurden zudem die letzten drei Polierschritte wiederholt. Die Auswertung der Aufnahmen der Querschliffe wurde mit der Grafiksoftware ImageJ durchgeführt. Dazu wurden für ein Bild zunächst Helligkeit und Kontrast so eingestellt, dass Poren und Freiräume möglichst gut erkennbar waren. Dann wurde das Bild in ein Graustufenbild umgewandelt und über ein Histogramm ein Grauwert festgelegt, so dass alle Pixel (Poren) über diesem Wert markiert wurden (siehe Abbildung 11). Der prozentuale Flächenanteil der nicht-markierten Bereiche ist dann gleich der relativen Dichte des Bauteils. Für jeden Parameter wurden vier Werte aufgenommen und daraus der arithmetische Mittelwert berechnet.

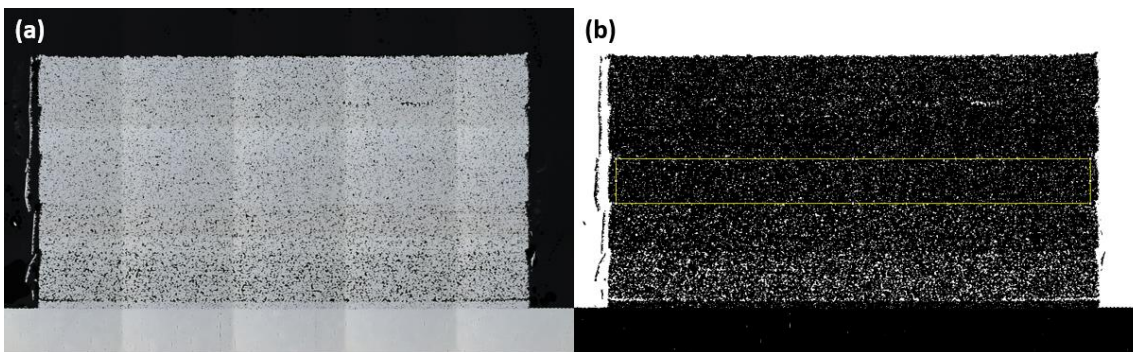


Abbildung 11: Querschliffaufnahme eines Probekörpers zur bildanalytischen Ermittlung der relativen Dichte. (a) un bearbeitetes Bild (b) Bild mit angepasster Helligkeit und Kontrast sowie mit eingestelltem Schwellwert und Messbereich für einen Parameter (gelb).

5.2 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Ergebnisse der Dichtemessung

Die Ergebnisse der Dichtemessung in Abhängigkeit von der VED sind in Anlage I zu sehen. Mit zunehmender Schichtdicke nahmen die relativen Bauteildichten ab. So konnten mit $2\ \mu\text{m}$ und $3\ \mu\text{m}$ relative Dichten größer $99,5\ \%$ erzeugt werden, während mit $5\ \mu\text{m}$ und $6\ \mu\text{m}$ lediglich Werte von unter $95\ \%$ erreicht wurden. Die relativen Dichten sinken einerseits bei zu geringen, wie auch bei zu großen VED, wobei ein Bereich existiert, in dem die relative Dichte beinahe konstant bleibt.

Bei zu geringen VED wird zu wenig Energie in das Pulver gebracht, um eine stoffschlüssige Verbindung zur darunter befindlichen Schicht herzustellen. Dazu ist es notwendig, dass sowohl Pulverschicht wie auch der darunter liegende feste Körper gemeinsam einen Schmelzpool bilden. Ein Aufschmelzen der oberen Pulverschicht findet auch bei geringen VED statt, da im Prozess auch stets verdampfendes Material entsteht. Allerdings reicht die Leistung bzw. Wärme dann nicht mehr tief genug in das Material hinein, um die unteren

festen Schichten aufzuschmelzen, wodurch der Grad der Anbindung und somit die relative Dichte mit abnehmender VED sinkt.

Der Bereich der VED, in dem die relative Dichte nahezu konstant bleibt, wird mit zunehmender Schichtdicke geringer. Mit 3 μm Schichtdicke konnte eine relative Dichte größer 99 % mit VED von 60 – 100 J/mm^3 erzeugt werden, während es bei 5 μm und 6 μm Schichtdicke quasi keine Toleranz in der VED zur Erzeugung der höchsten relativen Dichte gibt. Der Grund dafür ist ein während des Prozesses auftretender Effekt, der, wie bereits im Praktikumsbericht, als Pulveraufschub bezeichnet wird. Dieser führt bei zu hohen VED bzw. zu hohen Pulsenergien zu Baufehlern, die sich negativ auf die Bauteilqualitäten auswirken. Der Pulveraufschub wird im nachfolgenden Kapitel genauer diskutiert. An dieser Stelle soll lediglich gesagt werden, dass der Bereich der nutzbaren mittleren Laserleistung durch diesen Effekt nach oben hin begrenzt wird. Für kleinere Schichtdicken stellt dies kein Problem dar, da hier die mittleren Laserleistungen im Vergleich zu den höheren Schichtdicken gering sind. Bei den großen Schichtdicken führt dies allerdings dazu, dass bereits bei geringen VED Baufehler entstehen. Dadurch lässt sich auch erklären, warum der Bereich der VED, der generell untersucht wurde, ebenfalls mit der Schichtdicke abnimmt, da bei den großen Schichtdicken der Prozess bereits bei kleinen VED abgebrochen wurde.

Weiterhin lässt sich sagen, dass es keine VED bzw. keinen Bereich der VED gibt, mit dem sich über alle Schichtdicken die jeweilig höchste relative Dichten erzeugen lassen. Daraus lässt sich schließen, dass die VED bei der Betrachtung über mehrere Schichtdicken kein zuverlässiger Parameter für das LMS ist.

Ein unterschiedliches Verhalten der relativen Dichte in Abhängigkeit von der Schichtdicke zeigt sich auch beim Linienabstand. Bei den geringen Schichtdicken von 2 μm und 3 μm ließen sich mit allen drei Linienabständen relative Dichten größer 99 % erzeugen. Die Unterschiede zwischen den Linienabständen sind sehr gering. Das bestätigt die Ergebnisse des Praktikumsberichts, bei dem sich mit den beiden Linienabständen von 25 μm und 30 μm die exakt gleiche relative Dichte erzeugen ließ.

Ab einer Schichtdicke von 4 μm zeigt sich allerdings, dass die relative Dichte mit zunehmendem Linienabstand sinkt. Die höchsten relativen Dichten wurden bei 4 μm , 5 μm und 6 μm stets mit einem Linienabstand von 20 μm erzeugt. Mit höheren Linienabständen sank die relative Dichte teilweise deutlich ab. Das Verhalten lässt sich mit der Ausbreitung der Wärme im Material bzw. mit der Form der Schmelzzonen erklären. Abbildung 12 zeigt diesen Sachverhalt schematisch stark vereinfacht. Vernachlässigt wurden unter anderem das verdampfende Material, der Gasdruck des verdampfenden Materials, welcher zur Verdichtung des Schmelzpool führt und die Pulverdichte, die zu Abweichungen hinsichtlich der Form der Schmelzzonen im Vergleich zu Vollmaterial führen würde.

Da die Wärme über den Laserstrahlquerschnitt nicht gleichmäßig tief in das Pulver eindringt, sondern in der Mitte tiefer und zum Rand des Pulses weniger tief, überlappen sich die Schmelzpool der Pulse bzw. Linien ab einer bestimmten Schichtdicke nicht mehr vollständig, obwohl noch eine Anbindung zum darunter befindlichen festen Körper gegeben ist. In Untersuchungen zum SLM wurde dieses Verhalten bereits mehrfach nachgewiesen [15] [16].

Das nicht aufgeschmolzene Pulver befindet sich dann in den Bereichen zwischen den einzelnen Linien, wird aber bei der Präparation der Proben zur Dichtemessung durch das Schleifen und Polieren entfernt. Zurück bleiben dann offene Poren, die die relative Dichte senken. Dieser Effekt wird durch größere Linienabstände und höhere Schichtdicken verstärkt, was, neben dem Pulveraufschub, einen weiteren Grund für die geringen relativen Dichten bei Schichtdicken ab $4\ \mu\text{m}$ und Linienabständen größer als $20\ \mu\text{m}$ darstellt.

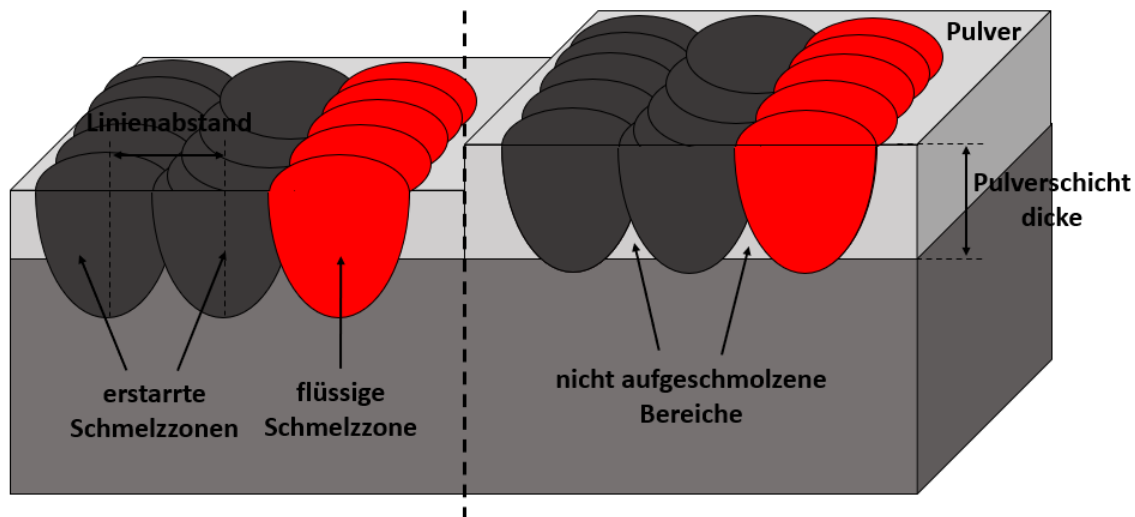


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Überlappung der Schmelzonen nebeneinander befindlicher Bestrahlungslinien bei unterschiedlichen Schichtdicken. Links überlappen die Schmelzonen ausreichend, während rechts bei einer größeren Pulverschichtdicke zwischen den Schmelzonen nicht aufgeschmolzene Bereiche entstehen.

Es zeigte sich allerdings auch, dass ein geringerer Linienabstand von $15\ \mu\text{m}$ nicht zu besseren Ergebnissen führt. Bei $5\ \mu\text{m}$ und $6\ \mu\text{m}$ Schichtdicke waren die relativen Dichten mit $15\ \mu\text{m}$ Linienabstand unabhängig von der VED stets geringer als mit einem Linienabstand von $20\ \mu\text{m}$. Dies lässt sich nicht mit den eben erklärten Sachverhalt erklären, da ein geringerer Linienabstand einen größeren Überlapp und damit eigentlich eine höhere relative Dichte zur Folge haben sollte. Die Ursache für die Abnahme der relative Dichte liegt vermutlich darin begründet, dass durch den hohen Überlapp ein Abtragen der bereits bestrahlten Bereiche entsteht. So trifft ein einzelner Puls nicht nur auf das Pulverbett, sondern ein Teil des Laserstrahles trifft auch auf festes Material der zuvor bestrahlten Linie und führt dort durch die hohen Pulsspitzenintensitäten zu einem Abtrag, was unweigerlich zu einer Verschlechterung der relativen Dichte führt. Dieser Effekt hätte in den Untersuchungen al-

lerdings auch bei einem Linienabstand von 20 μm entstehen müssen, da der Fokusbereich des Laserstrahles 23 μm betrug. Daraus kann man schlussfolgern, dass der optimale Linienabstand beim quasikontinuierlichen LMS im Bereich des Fokusbereichs oder leicht darunter liegt, um eine optimale Überlappung der Schmelzzonen zu ermöglichen.

5.2.2 Problematik des Pulveraushubs

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 erwähnt war der limitierende Faktor für die Nutzung von höheren VED insbesondere bei Schichtdicken von 5 μm und 6 μm der Effekt des Pulveraushubs. Dieser entsteht bei der Bestrahlung des Pulverbettes mit dem Laserstrahl. Durch die hohen Pulsspitzenintensitäten kommt es zur teilweisen Verdampfung von Pulver und dadurch zur raschen Ausdehnung des verdampften Materials. Umliegendes, noch nicht bestrahltes Pulver wird durch den Gasdruck aufgeworfen und, bildlich gesprochen, vor dem Laserstrahl hergeschoben. Zu Problemen im Prozess führt dieser Effekt in zweierlei Weise.

- (a) Der Pulveraushub hat dann Baufehler zur Folge, wenn der Laserstrahl über aufgehäuftes Pulver scannt, da an dieser Stelle die Pulverschichtdicke deutlich über dem eingestellten Wert liegt. Das Pulver wird dann zwar ebenfalls aufgeschmolzen und teilweise verdampft, es entsteht aber keine Anbindung zur darunter befindlichen Schicht. Dieser Effekt kommt allerdings erst dann zum Tragen, wenn eine ausreichend große Menge an Pulver aufgeworfen wird. Das ist der Fall, wenn entweder die bestrahlte Fläche groß genug oder die Schichtdicke entsprechend hoch ist.
- (b) Auch bei geringeren Laserleistungen führt der Pulveraushub zu Problemen. Dann entstehen zwar am Bauteil, über das der Laser zuerst scannt, keine relevanten Baufehler, aber das aufgeschobene Pulver bleibt nach der Bestrahlung auf dem Pulverbett liegen. Bei der Bestrahlung eines zweiten Bauteils kann dieses Pulver dann wiederum zu Baufehlern führen, wenn die beiden Bauteile entsprechend nah beieinander liegen.

Bei der Erzeugung der Bauteile in Kapitel 5.1 wurde notiert, ab welcher VED bei den jeweiligen Linienabständen und Schichtdicken der Pulveraushub auftrat. Aus diesen Ergebnissen zeigt sich, dass das Auftreten von Pulveraushub nicht von der VED, sondern vielmehr von der Pulsleistung Q_p und dem Linienabstand abhängig ist (siehe Tabelle 2). Diese ist bei konstanter Pulswiederholfrequenz f_p direkt proportional zur mittleren Laserleistung sowie zur Pulsspitzenleistung P_{max} :

$$Q_P = \frac{P_{av}}{f_P} = P_{max} \cdot \tau_H \quad (4)$$

Daraus ergibt sich, dass die Pulsspitzenintensität I_{max} bei gleicher Pulsdauer τ_H und gleichem Fokusbereich w_0 ebenfalls direkt proportional zur mittleren Laserleistung und zur Pulsenergie ist:

$$I_{max} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot w_0^2} = \frac{2 \cdot P_{av}}{\pi \cdot w_0^2 \cdot f_P \cdot \tau_H} \quad (5)$$

Aus (4) und (5) lässt sich schließen:

$$P_{av} \propto P_{max} \propto Q_P \propto I_{max}$$

Entscheidend für die Wirkung der Laserstrahlung auf der Materialoberfläche, also ob und wie viel Material verdampft wird, ist die Intensität, welche in diesen Untersuchungen direkt proportional zur mittleren Laserleistung ist. Pulveraufschiebung entsteht durch die zu starke Verdampfung von Pulver, dementsprechend durch zu hohe Intensität und zu hohe mittlere Laserleistung. Daraus lässt sich schließen, dass ab einer bestimmten mittleren Laserleistung kein fehlerfreier Aufbau mehr gewährleistet werden kann.

Tabelle 2: Übersicht über das Auftreten von Pulveraufschiebung in Abhängigkeit von Schichtdicke, Linienabstand und Pulsenergie

Linienabstand / μm	15	20	30	40
Schichtdicke / μm	Pulsenergie / μJ			
2	-	23,92	32,68	38,34
3	-	24,26	28,56	33,71
4	-	28,73	35,08	38,34
5	24	28,73	35,68	34,47
6	23,4	27,87	32,68	32,68

Die VED gibt eine Aussage über die Energie, die pro Volumen in das Material eingebracht wird. Ist die mittlere Laserleistung durch den Pulveraufschiebung nach oben hin begrenzt, so gilt dies auch für die VED, wenn die Scangeschwindigkeit konstant gehalten wird und der Linienabstand nur geringfügig variiert werden kann. Für höhere Schichtdicken bedeutet das, dass durch die Begrenzung der VED durch den Pulveraufschiebung nicht genügend Energie in das Pulver gebracht werden kann, um eine ausreichende stoffschlüssige Verbindung herzustellen, was die geringen relativen Dichten bei Schichtdicken von 5 μm und 6 μm erklärt. Dort wären für bessere Ergebnisse höhere VED, also höhere mittlere Laserleistungen,

notwendig. Diese führen aber aufgrund des starken Pulveraushubs zu Baufehlern und erklären damit die Abnahme der relativen Dichte bei noch relativ geringen VED (vgl. Anlage I).

Der Pulveraushub besitzt kaum eine Abhängigkeit von der Schichtdicke, tritt also bei annähernd dergleichen Pulsenergie über alle untersuchten Schichtdicken auf. Da die gleiche Pulsenergie bei einer kleineren Schichtdicke in diesen Untersuchungen eine geringere VED nach sich zieht, hat der Pulveraushub für diese kleineren Schichtdicken kaum bis gar keinen Einfluss. Es zeigt sich allerdings ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Pulveraushub und dem Linienabstand. So tritt der Effekt bei größeren Linienabständen erst bei höheren Pulsenergien auf. Der Grund für dieses Verhalten ist sehr wahrscheinlich, dass durch einen größeren Linienabstand weniger Pulse pro bestrahlter Fläche auf das Material treffen und dadurch weniger Pulver aufgeworfen wird, während bei kleineren Linienabständen mehr Pulse auftreffen und damit das pro Puls aufgeworfene Pulver geringer sein muss, um Pulveraushub zu vermeiden.

Weiterhin zeigte sich, dass der Bestrahlungswinkel ebenfalls einen Einfluss auf den Pulveraushub hat, heißt, dass der Pulveraushub abhängig vom Bestrahlungswinkel unterschiedlich stark auftrat. Die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Pulverbett ist aber unabhängig vom Bestrahlungswinkel, weshalb dieses Verhalten zunächst nicht erklärbar war, bis sich bei genauerer Betrachtung herausstellte, dass die Position der Absaugung relativ zum Substrat die Erklärung dafür liefert. Zeigt die Bestrahlungsrichtung in Richtung Absaugung ist der Pulveraushub stärker, als wenn sie weg von der Absaugung zeigt (siehe Abbildung 13).

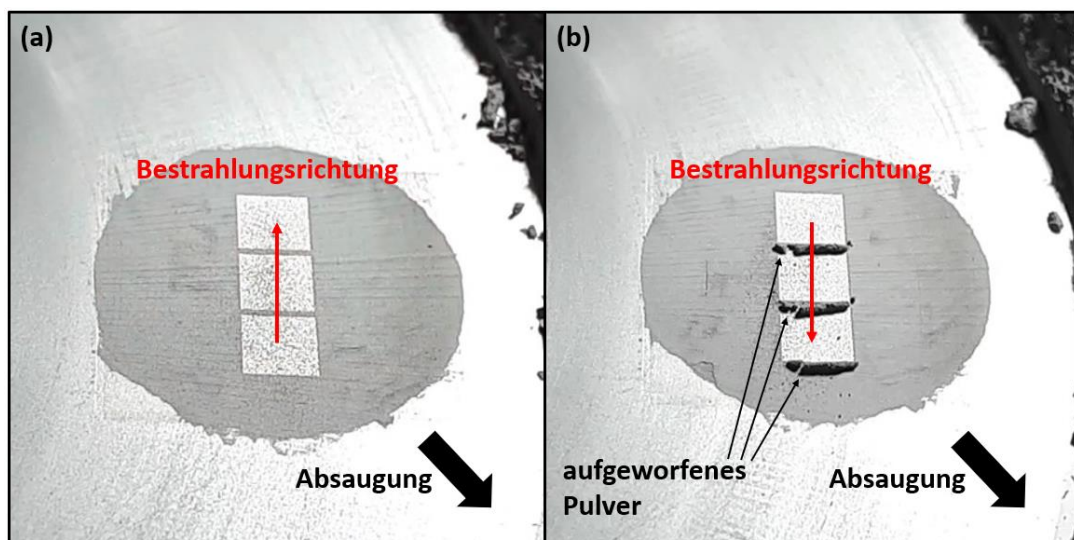


Abbildung 13: Pulveraushub bei gleichen Parametern in Abhängigkeit von der Bestrahlungsrichtung. (a) kein Pulveraushub, Bestrahlungsrichtung von der Absaugung weg (b) Pulveraushub, Bestrahlungsrichtung zeigt zur Absaugung hin.

Durch die Absaugung wird den aufgeworfenen Pulverpartikeln eine Vorzugsrichtung gegeben (siehe Abbildung 14). Bewegt sich der Laserstrahl entlang der Bestrahlungsrichtung in Richtung der Absaugung, landet der Großteil des aufgeworfenen Pulvers vor dem Laserstrahl auf dem noch nicht bestrahlten Pulverbett, wodurch der Pulveraufschub verstärkt wird. Bewegt sich der Laserstrahl weg von der Absaugung, wird der Großteil des Pulvers hinter dem Laserstrahl auf dem bereits verschmolzenen Material zum Liegen kommen und hat dort keinen Einfluss mehr auf die Bestrahlung.

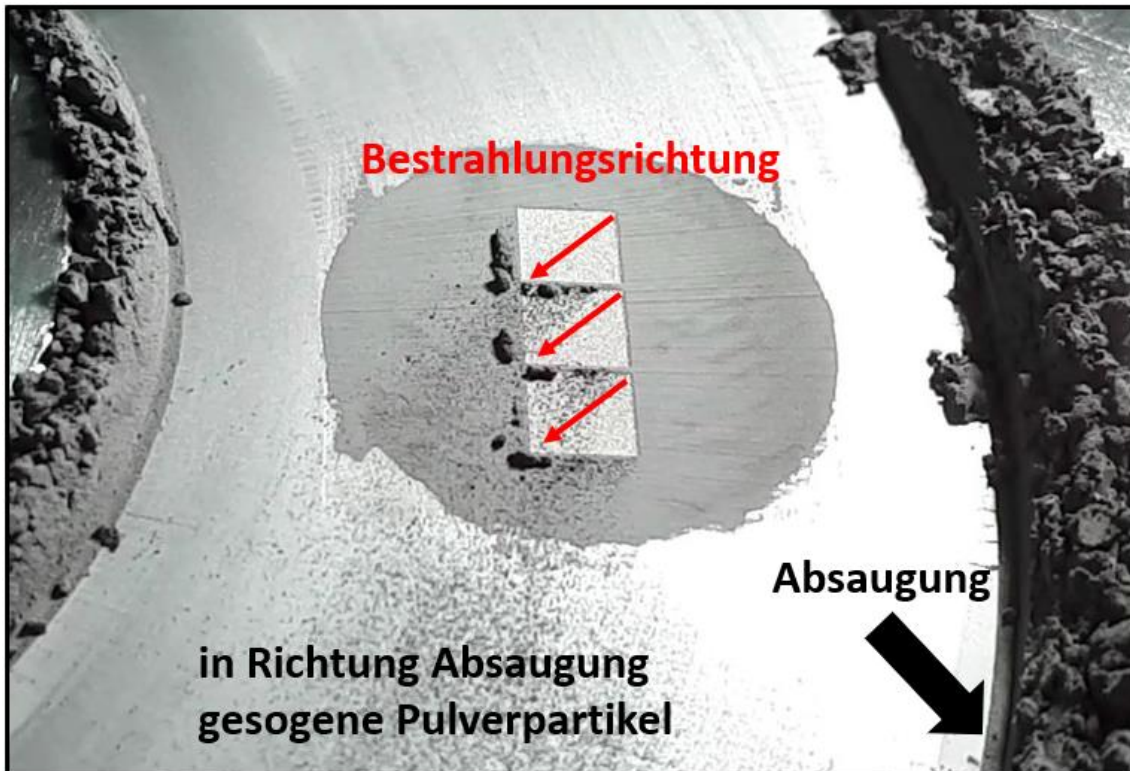


Abbildung 14: Pulveraufschub mit deutlich sichtbaren Ablagerungen von aufgeworfenen Pulverpartikeln, die in Richtung Absaugung gesogen wurden.

5.2.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der relativen Dichte bei höheren Schichtdicken

Zur Erzeugung von dichten Strukturen bei der Nutzung von höheren Schichtdicken ist es notwendig, mehr Energie in das Pulver einzubringen, ohne dass der Pulveraufschub zu groben Baufehlern führt. Eine Verringerung des Pulveraufschubs lässt sich mit den Erkenntnissen aus 5.2.2 erreichen, indem die Pulsspitzenintensität verringert wird, um die Menge des verdampfenden Materials zu senken. Dementsprechend muss die VED erhöht werden, während gleichzeitig die Pulsspitzenintensität konstant auf einem Wert bleibt oder leicht abnimmt. Dies lässt sich mit mehreren Ansätzen erreichen.

Eine Erhöhung der Pulswiederholfrequenz führt zu einer Verringerung der Pulsspitzenintensität, indem die Pulsenergie gesenkt wird (vgl. Gleichung 4 und 5). Auf die VED hat die Pulswiederholfrequenz keinen Einfluss. Eine Erhöhung der Pulswiederholfrequenz würde die Anzahl der Pulse pro Fläche erhöhen und damit den Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse verringern, wodurch der Pulsüberlapp größer werden würde. Es zeigte sich bereits, dass eine Erhöhung der Pulswiederholfrequenz bessere Bauteilqualitäten nach sich zieht [13], wodurch erst das in dieser Arbeit genutzte quasikontinuierliche LMS entstand. Eine weitere Erhöhung der Pulswiederholfrequenz würde diese Entwicklung dementsprechend weiter vorantreiben. Es wurde aber auch bereits gezeigt, dass Pulverausrück bei kleineren Linienabständen, und dementsprechend mehr Pulsen pro Fläche, bereits bei kleineren Pulsenergien auftritt. Dieses Verhalten könnte sich bei der Nutzung höherer Pulswiederholfrequenzen negativ auf den Prozess auswirken.

Eine Erhöhung der Pulsdauer würde ebenfalls die Pulsenergie und damit die Pulsspitzenintensität verringern, während es keinen Einfluss auf die VED hat. Der Energieeintrag pro Puls würde damit über eine längere Zeit geschehen. Durch diese längere Wechselwirkungszeit kann die Wärme zusätzlich tiefer in das Pulver eindringen, wodurch eine Nutzung von höheren Schichtdicken theoretisch möglich ist. In Untersuchungen zum SLM wurde bereits gezeigt, dass durch mit Laserpulsen im Bereich von 200 μs größere Schichtdicken bis 250 μm bearbeitet werden können [11]. Eine Pulsdauer von lediglich 1 μs würde bereits eine Verfünffachung dieses Wertes für das LMS bedeuten.

Eine weitere Möglichkeit zur Änderung der Pulsspitzenintensität stellt die Vergrößerung des Fokusdurchmessers dar. Dies kann entweder durch die Nutzung einer anderen Brennweite der fokussierenden Optik oder durch eine Veränderung des Abstands zwischen Linse und Pulverbett (Defokussierung) sein. Dadurch würde die Pulsspitzenintensität bei gleicher mittlerer Leistung sinken, während VED und Pulsenergie konstant blieben. Ein weiterer Vorteil dieser Methode läge darin, dass der Linienabstand und damit die Aufbaurrate erhöht werden können. Allerdings würde sich die Auflösung des Verfahrens verschlechtern.

Eine Verringerung der Scangeschwindigkeit hätte eine Vergrößerung der VED zur Folge, während Pulsspitzenintensität und Pulsenergie unverändert blieben. Auch hier kann auf Ergebnisse aus dem SLM zurückgegriffen werden, bei denen Bauteile mit deutlich geringeren Scangeschwindigkeiten im Bereich von 100 – 400 mm/s mit hohen relativen Dichten erzeugt werden konnten [11]. Ähnlich zur Vergrößerung der Pulswiederholfrequenz würde sich allerdings die Pulsanzahl pro Fläche vergrößern, was sich hinsichtlich der nutzbaren Pulsenergien negativ auswirkte.

Eine letzte Überlegung liegt darin, andere Bestrahlungsstrategien zu nutzen. In vorhergehenden Veröffentlichungen zum LMS wurden Pulsanordnungen zur Bearbeitung von Edelstahl 316L untersucht [14]. Die dabei genutzten Pulsenergien lagen mit 46 – 57 μJ über

denen aus den hier vorgestellten Untersuchungen. Die Pulse wurden semistochastisch und regelmäßig auf dem Pulverbett angeordnet, wobei jeder Puls quasi als Einzelpuls und nicht wie in dieser Arbeit direkt mit seinen Nachbarpulsen wechselwirkte. Über Auftreten von Pulveraufschub oder ähnlichen Effekten wurde in dieser Veröffentlichung nicht berichtet. Man kann also schlussfolgern, dass der Pulveraufschub direkt mit der in dieser Arbeit genutzten Linienbestrahlung zusammenhängt. Ob allerdings eine Änderung der Bestrahlungsstrategie zu besseren relativen Bauteildichten führt, kann bezweifelt werden, da die höchsten relativen Dichte aus eben genannter Veröffentlichung bei lediglich 74,7 % liegen.

5.3 Relative Dichte bei 1000 kHz

Es wurde sich nach den Untersuchungen aus Kapitel 5.1 und 5.2 dafür entschieden, zur Verbesserung der relativen Bauteildichte mit Schichtdicken ab 4 μm Untersuchungen zur Erhöhung der Pulswiederholfrequenz durchzuführen. Wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, soll sich durch eine höhere Pulswiederholfrequenz der Pulveraufschub weitgehend vermeiden lassen, indem die Pulsenergie bei gleicher mittlerer Laserleistung verringert wird. Die Pulswiederholfrequenz wurde dafür von 500 kHz auf 1000 kHz erhöht, während alle weiteren Parameter beibehalten wurden. Eine Ausnahme war, dass der Linienabstand von 40 μm für 5 μm und 6 μm Schichtdicke nicht weiter untersucht wurde. Die Versuche wurden mit der gleichen Vorgehensweise wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben durchgeführt. Zur besseren Übersicht werden die Parameter nochmals in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Parameter für die Untersuchung der relativen Bauteildichte mit einer Pulswiederholfrequenz von 1000 kHz. In Klammern stehende Werte wurden nur für bestimmte Schichtdicken untersucht.

Parameter	untersuchte Werte
Schichtdicke / μm	4,5,6
Linienabstand / μm	(15),20,30,(40)
Scangeschwindigkeit / mm/s	2
ΔVED / J/mm^3	10
Pulswiederholfrequenz / kHz	1000

Die Präparation der Proben und Messung der relativen Dichte erfolgte ebenfalls wie bereits in den Kapiteln 4.1 und 4.2 erläutert. Die Ergebnisse der Messung sind in Anlage II zu dieser Arbeit zu finden.

Zunächst muss festgestellt werden, dass der Aufbau der Proben mit 4 μm und 5 μm Schichtdicke zu früh abgebrochen wurde, da aus den Ergebnissen noch keine starke Abnahme der relativen Dichte bei zu hohen VED zu beobachten ist. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, dass bspw. bei einer VED von 130 J/mm^3 für 5 μm Schichtdicke die relative Dichte

noch weiter zunehmen würde. Aus Mangel an Zeit war es allerdings nicht möglich, die Untersuchungen an dieser Stelle weiterzuführen, da auch immer beachtet werden muss, dass eine Messung neben der Erzeugung der Bauteile auch eine Präparation der Querschliffe und damit deutlich mehr Zeit beansprucht.

Durch die Erhöhung der Pulswiederholfrequenz war eine teils deutliche Verbesserung der relativen Bauteildichte bei Schichtdicken von 5 μm und 6 μm möglich. Für 5 μm konnte die maximale relative Dichte von unter 95 % auf knapp 97 % verbessert werden. Für 6 μm sogar von unter 92 % auf über 96 %. Dabei war es möglich, im Gegensatz zu den Untersuchungen mit 500 kHz, hohe VED bis zu 120 J/mm^3 zu nutzen, ohne dass Pulveraufschub entstand. Die maximale Pulsenergie betrug 28,8 μJ . Die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 5.2.3, dass mit einer höheren Pulswiederholfrequenz der Pulveraufschub vermieden werden kann, können dementsprechend bestätigt werden. Tatsächlich kam es zu keinem Punkt der Untersuchungen mit 1000 kHz zum Auftreten von Pulveraufschub. In Abbildung 15 ist der Vergleich zwischen der Bestrahlung mit 500 kHz und 1000 kHz bei gleicher Schichtdicke von 4 μm und gleicher VED von 130 J/mm^3 zu sehen.

Mit 4 μm Schichtdicke war es nicht möglich, eine relevante Verbesserung der relativen Dichte zu erreichen, obwohl die genutzte VED von 90 J/mm^3 mit 500 kHz auf 130 J/mm^3 erhöht werden konnte. Man kann schlussfolgern, dass die VED, auch wenn sie nicht vom Pulveraufschub begrenzt wird, kein zuverlässiger Parameter zur Erzeugung hoher Bauteildichten im LMS ist. Weiterhin zeigte sich, dass der Linienabstand von 20 μm wie bereits bei der Pulswiederholfrequenz von 500 kHz für alle drei untersuchten Schichtdicken die höchsten relativen Dichten erzeugt. Mit einem Linienabstand von 15 μm für 5 μm und 6 μm Schichtdicke nahm die erreichbare relative Dichte ab. Eine Erklärung für dieses Verhalten wurde bereits in Kapitel 5.2.1 geliefert (siehe Abbildung 12) und kann gleichermaßen für diese Ergebnisse angewendet werden.

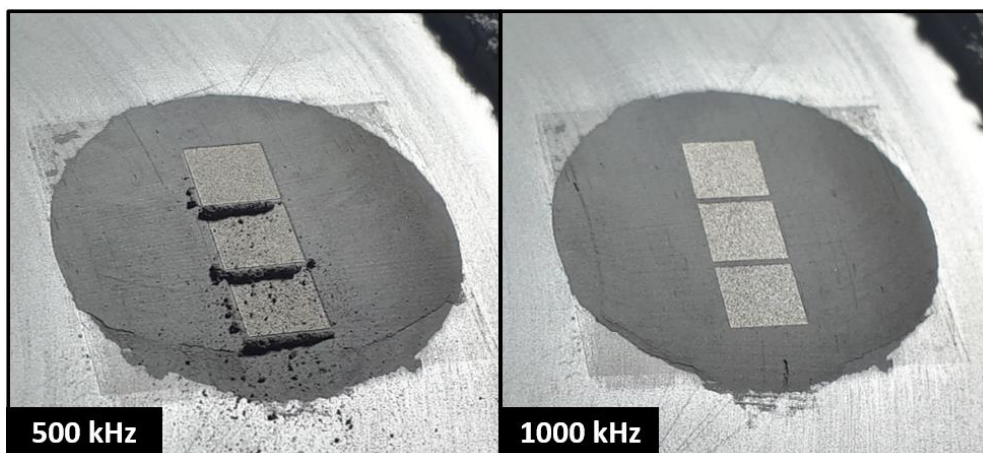


Abbildung 15: Vergleich des Pulveraufschubs für 500 kHz und 1000 kHz Pulswiederholfrequenz bei einer Schichtdicke von 4 μm und einem Linienabstand von 20 μm .

6 Weiterführende Untersuchungen

6.1 Überprüfung der Ergebnisse

Um die ermittelten relativen Dichten aus Kapitel 5 hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit zu überprüfen, wurden für die beide Pulswiederholffrequenzen 500 kHz und 1000 kHz und die jeweiligen untersuchten Schichtdicken weitere Probekörper mit dem Parameter (VED) erzeugt, mit dem in den ersten Untersuchungen die höchsten relativen Dichten erreicht wurden. Weiterhin wurde auch die Schichtdicke 3 μm mit den im Praktikumsbericht ermittelten Parametern betrachtet. Tabelle 4 gibt einen Überblick über diese Parameter.

Tabelle 4: Überblick über die Parameter zur Überprüfung der Ergebnisse. Die ausgewählten Parameter sind diejenigen, mit denen in den Untersuchungen aus Kapitel 5 für jede Pulswiederholffrequenz und Schichtdicke die jeweils höchsten relativen Dichten erzeugt wurden. Kursiv geschrieben sind die Parameter für 3 μm Schichtdicke und die relative Dichte aus den Untersuchungen des Praktikumsberichts.

Pulswiederholffrequenz [kHz]	Schichtdicke [μm]	Linienabstand [μm]	VED [J/mm^3]	Relative Dichte aus Kapitel 5 [%]
500	2	40	110	99,5
	3	<i>30</i>	<i>80</i>	<i>98,9</i>
	4	20	80	97,6
	5	20	72	94,6
	6	20	53	91,7
1000	4	20	130	97,5
	5	20	110	96,6
	6	20	100	96,0

Für jeden Parameter wurden vier Würfel mit einer Kantenlänge von 5 mm erzeugt. Diese wurden dann, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, als Querschliffe präpariert. Von den Querschliffen wurden zunächst Aufnahmen mit 10-facher Vergrößerung gemacht. Um allerdings genauere Ergebnisse für die relative Dichte zu erhalten, wurden im Anschluss, wie von Spierings et al. empfohlen [12], zusätzlich Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung aufgenommen. Die Auswertung der Querschliffbilder erfolgte dann wieder mit ImageJ. Allerdings wurde sich an dieser Stelle dafür entschieden, die Aufnahmen direkt über einen Befehl im Programm in ein Binärbild umzuwandeln, um so die manuelle Einstellung von Helligkeit, Kontrast und Grenzwert zu vermeiden, da diese immer ein mögliche Fehlerquelle aufgrund der subjektiven Wahrnehmung des Betrachters darstellt.

An diesem Punkt der Untersuchungen kam die in Kapitel 4.2 erläuterte Schliﬀproblematik zum Tragen. Zunächst wurden alle Proben einmal geschliﬀen, poliert und vermessen. Die Ergebnisse dieser Messungen wiesen allerdings so große Unterschiede zu den vorigen Untersuchungen auf, dass sich dafür entschieden wurde, die Proben erneut zu polieren und die relative Dichte anschließend nochmals zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser zweiten Messung sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich der relativen Dichten der jeweils optimalen Parameter für alle untersuchten Schichtdicken und Puls-wiederholﬀrequenzen aus Kapitel 5. Gezeigt werden die Ergebnisse der bildanalytischen Messung aus Kapitel 5, der Überprüfung mit 10-facher und 50-facher Vergrößerung. Kursiv dargestellt sind die Ergebnisse für 3 µm Schichtdicke aus dem Praktikumsbericht.

Pulswiederholﬀfrequenz [kHz]	Schichtdicke [µm]	Relative Dichte aus Kapitel 5 [%]	Relative Dichte 10x [%]	Relative Dichte 50x [%]
500	2	99,5	93,75	92,02
	3	-	98,9	97,21
	4	97,6	96,38	96,19
	5	94,6	95,38	92,69
	6	91,7	94,58	88,66
1000	4	97,5	99,73	98,72
	5	96,6	99,71	98,61
	6	96,0	97,97	96,93

Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Messungen sind teilweise immens. Hier ist insbesondere die Schichtdicke von 2 µm zu nennen, bei der die Werte für die relative Dichte um mehr als 5 % relative Dichte voneinander abweichen. Erklären lässt sich dies nur dadurch, dass die Querschliffe für die Untersuchungen aus Kapitel 5 deutlich stärker verschmiert waren als angenommen und dass trotz mehrfachem Schleifen und Polieren es nicht möglich war, die tatsächliche relative Dichte der Körper zu bestimmen. Dementsprechend besitzen die Werte aus Kapitel 5 für 2 µm Schichtdicke keine Aussagekraft, da unklar ist, welcher Parameter bzw. welche VED für diese Schichtdicke und Frequenz die höchsten Dichten liefert. Da eine Wiederholung dieser ersten Versuche aber den zeitlichen Rahmen des Bachelorprojekts gesprengt hätte, werden in den noch folgenden Untersuchungen die 2 µm Schichtdicke vernachlässigt.

Es zeigt sich für alle Parameter, dass die Werte aus der Messung mit 50-facher Vergrößerung stets geringer sind als die Werte, die mit 10-facher Vergrößerung gemessen wurden. Dieses Verhalten war abzusehen, da durch die geringere Auflösung bei niedrigerer Auflösung Poren teilweise nicht dargestellt werden und die relative Dichte so künstlich nach oben getrieben wird.

Eine höhere Vergrößerung führt zu einer höheren Auflösung und damit für den gewählten Bildausschnitt zu genaueren Ergebnissen. Der Nachteil ist allerdings, dass der Bildausschnitt mit steigender Vergrößerung kleiner wird. Messtechnisch sinnvoll ist eine hohe Vergrößerung dementsprechend nur bis zu dem Punkt, an dem der gewählte Bildausschnitt noch den Querschnitt des gesamten Bauteils annähernd gut repräsentiert. Ist der Bildausschnitt so klein, dass beispielsweise nur noch eine Pore abgebildet werden kann, dann entspricht die mit diesem Bild gemessene relative Dichte nicht der des gesamten Körpers. In diesem Fall ist es notwendig, mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Stellen des Querschnitts zu machen und aus diesen dann den arithmetischen Mittelwert zu berechnen, was wiederum durch die höhere Anzahl an Messungen mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Durch die hohe Anzahl und gleichmäßige Verteilung der Poren in den Querschnittsaufnahmen mit 50-facher Vergrößerung kann davon ausgegangen werden, dass der gewählte Bildausschnitt mit etwa 1 mm² Fläche groß genug war, um eine gültige Aussage über die relativen Dichten zu erhalten. Dazu sind in Abbildung 16 die Querschnitte für 4 µm, 5 µm und 6 µm Schichtdicke für beide Pulswiederhol frequenzen 500 kHz und 1000 kHz dargestellt.

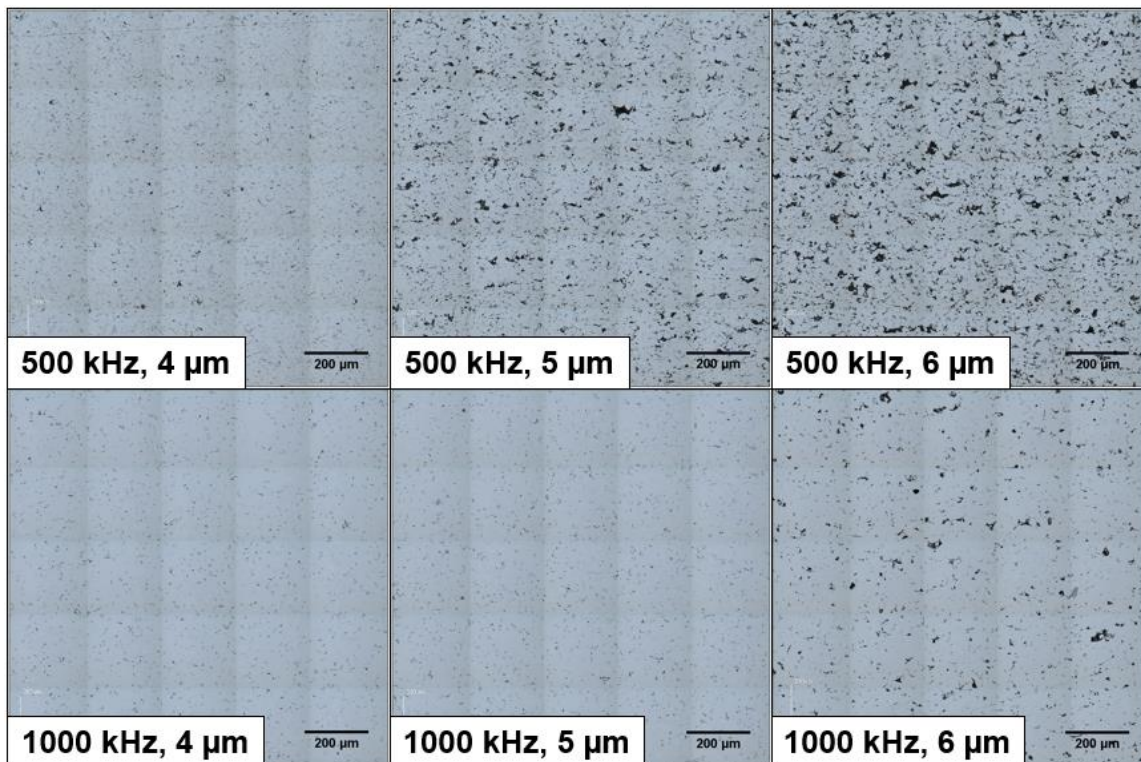


Abbildung 16: Vergleich der Querschnittsbilder mit 50-facher Vergrößerung der Schichtdicken 4 µm, 5 µm und 6 µm für die Pulswiederhol frequenzen von 500 kHz und 1000 kHz.

Was bei genauerer Betrachtung der Querschliffe auffällt ist der Unterschied in der Anzahl der Poren zwischen den verschiedenen Pulswiederhol frequenzen. So ist die Menge an Poren bei 500 kHz sichtbar größer als bei den Bauteilen, die mit 1000 kHz erzeugt wurden,

wofür sich allerdings nur schwer eine quantitative Aussage machen lässt. Bei gleicher Puls-wiederholffrequenz nimmt mit steigender Schichtdicke hauptsächlich die Größe der Poren zu, wodurch die relative Dichte sinkt. Das stützt die These aus Abbildung 12, dass Poren hauptsächlich zwischen den Schmelzzonen entstehen, da an diesen Stellen das Pulver nur unzureichend aufgeschmolzen wird. Dadurch ist, bei der Nutzung identischer Linienabstände, die Anzahl und Verteilung von Stellen, an denen potenziell mehr Poren entstehen, identisch, was die annähernd konstante Menge an Poren und deren homogene Verteilung unabhängig von der Schichtdicke erklärt. Wie Abbildung 12 weiterhin zeigt, wird der Bereich, in dem das Pulver keine stoffschlüssige Verbindung mehr bildet, mit zunehmender Schichtdicke größer, was sich in Abbildung 16 ebenfalls erkennen lässt.

Für die Diskrepanz in der Anzahl der Poren zwischen den Puls-wiederholffrequenzen lässt sich dagegen nicht direkt eine Erklärung finden. Es wird vermutet, dass dabei vor allem die höhere Anzahl an Pulsen und der daraus resultierende höhere Pulsüberlapp sowie der erhöhte Energieeintrag (VED) eine Rolle spielen, die die Nutzung von 1000 kHz Puls-wiederholffrequenz ermöglichte. Inwieweit sich diese Vermutungen begründen und genauer erklären lassen, wird in Kapitel 6.3 untersucht.

Um weitere Informationen über die Beschaffenheit der Poren zu erhalten und daraus auf eventuelle weitere Ursachen für die Bildung dieser schließen zu können, wurden von den Querschliffen Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) gemacht. In Abbildung 17 sind diese Aufnahmen für 4 μm , 5 μm und 6 μm Schichtdicke und die beiden Puls-wiederholffrequenzen 500 kHz und 1000 kHz zu sehen.

Es bestätigt sich die Beobachtung, dass die Anzahl der Poren pro Fläche mit der höheren Puls-wiederholffrequenz niedriger ist. Für 5 μm und 6 μm Schichtdicke sind die Poren im Vergleich zu den mit 500 kHz erzeugten Teilen deutlich kleiner. Tatsächlich ist zwischen den Aufnahmen von 4 μm und 5 μm Schichtdicke für 1000 kHz Puls-wiederholffrequenz optisch kein Unterschied zu erkennen, was sich bereits in den Messwerten aus Tabelle 5 andeutete, da sich die relativen Dichten dieser beiden Parameter um lediglich 0,11 % unterschieden. Generell spiegeln die Messwerte die subjektiven Eindrücke aus den Aufnahmen von Abbildung 17 hinsichtlich der relativen Dichte gut wider.

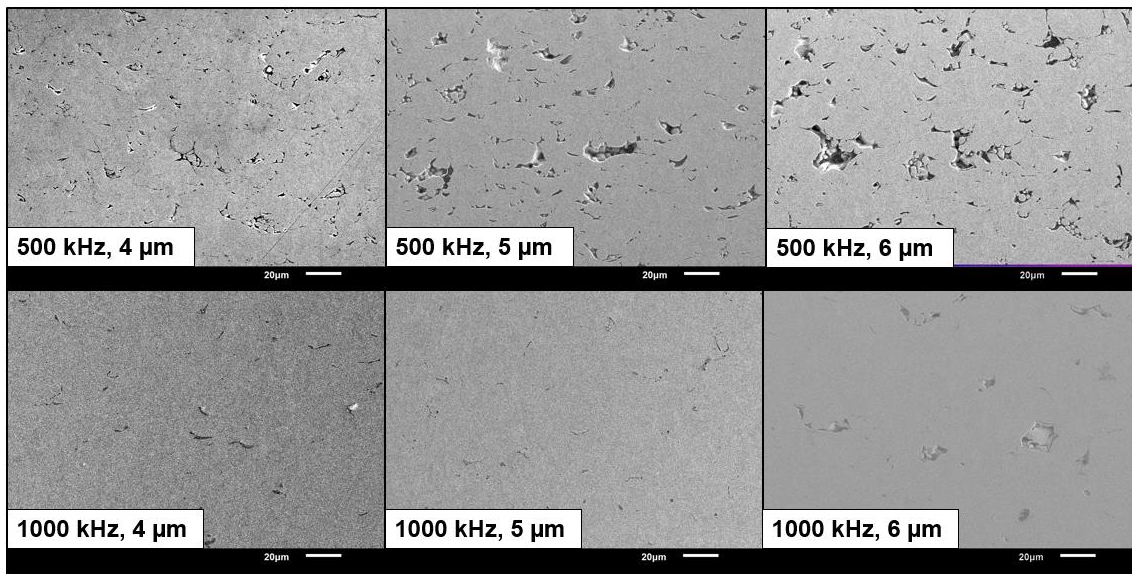


Abbildung 17: REM-Aufnahmen der Querschliffe von 4 µm, 5 µm und 6 µm Schichtdicke für die Pulsfrequenzen 500 kHz und 1000 kHz mit 600-facher Vergrößerung.

Bei genauerer Betrachtung sind in den REM-Aufnahmen einige weitere aufschlussreiche Eigenschaften der Poren zu erkennen. Dazu wurden an den gegebenen Stellen nochmals Bilder mittels REM mit teilweise höherer Vergrößerung aufgenommen. In Abbildung 18 sind diese Bilder und die daraus gezogenen Erkenntnisse zusammengefasst dargestellt.

Grundlegend existieren drei Kategorien von Poren. Die erste Kategorie beschreibt Poren, die sich durch ihre geringe Größe mit Durchmessern im Bereich von 1 µm und ihre sphärische Form auszeichnen (Mikroporen). Dabei handelt es sich um Gaseinschlüsse, die durch die rasche Erstarrung während des Prozesses entstehen, da in der Schmelze befindliches Gas nicht rechtzeitig an die Oberfläche gelangt, um die Schmelze vor der Erstarrung zu verlassen. Da diese rasche Erstarrung ein Hauptmerkmal des LMS darstellt, ist es mit den hier untersuchten Parametern wie Schichtdicke oder VED kaum bzw. nicht möglich, die Bildung von Mikroporen zu verhindern. So waren diese Mikroporen unabhängig vom Parameter in allen Querschliffen gleichermaßen vorzufinden. Allerdings ist durch die geringe Größe dieser Art von Poren ihr Einfluss auf die relative Dichte weitgehend vernachlässigbar.

Die zweite Kategorie von Poren kennzeichnet sich durch ihre charakteristische Form. Poren dieser Art besitzen einen schmalen, länglichen Querschnitt mit einer Länge zwischen 5 – 30 µm und dehnen sich vorrangig senkrecht zur Aufbaurichtung im Material aus. An diesen Stellen wurde das Pulver vollständig aufgeschmolzen, allerdings keine vollständige Anbindung zur darunter befindlichen Schicht hergestellt. Entstehen kann dieser Baufehler dann, wenn das unter dem Pulver befindliche Material nicht ausreichend aufgeschmolzen wird. Das geschieht vorrangig an den Stellen zwischen den Bestrahlungslinien, da dort deren Überlapp am geringsten ist (vgl. Abbildung 12). Poren mit sehr ähnlicher Form wurden

auch von Shi et al. [11] im SLM nachgewiesen. Sie gaben als Grund für die Entstehung dieser Poren einen zu großen Linienabstand an. In Kapitel 5 zeigte sich allerdings, dass eine weitere Verringerung des Linienabstands nicht zu einer Verbesserung der relativen Dichte führte.

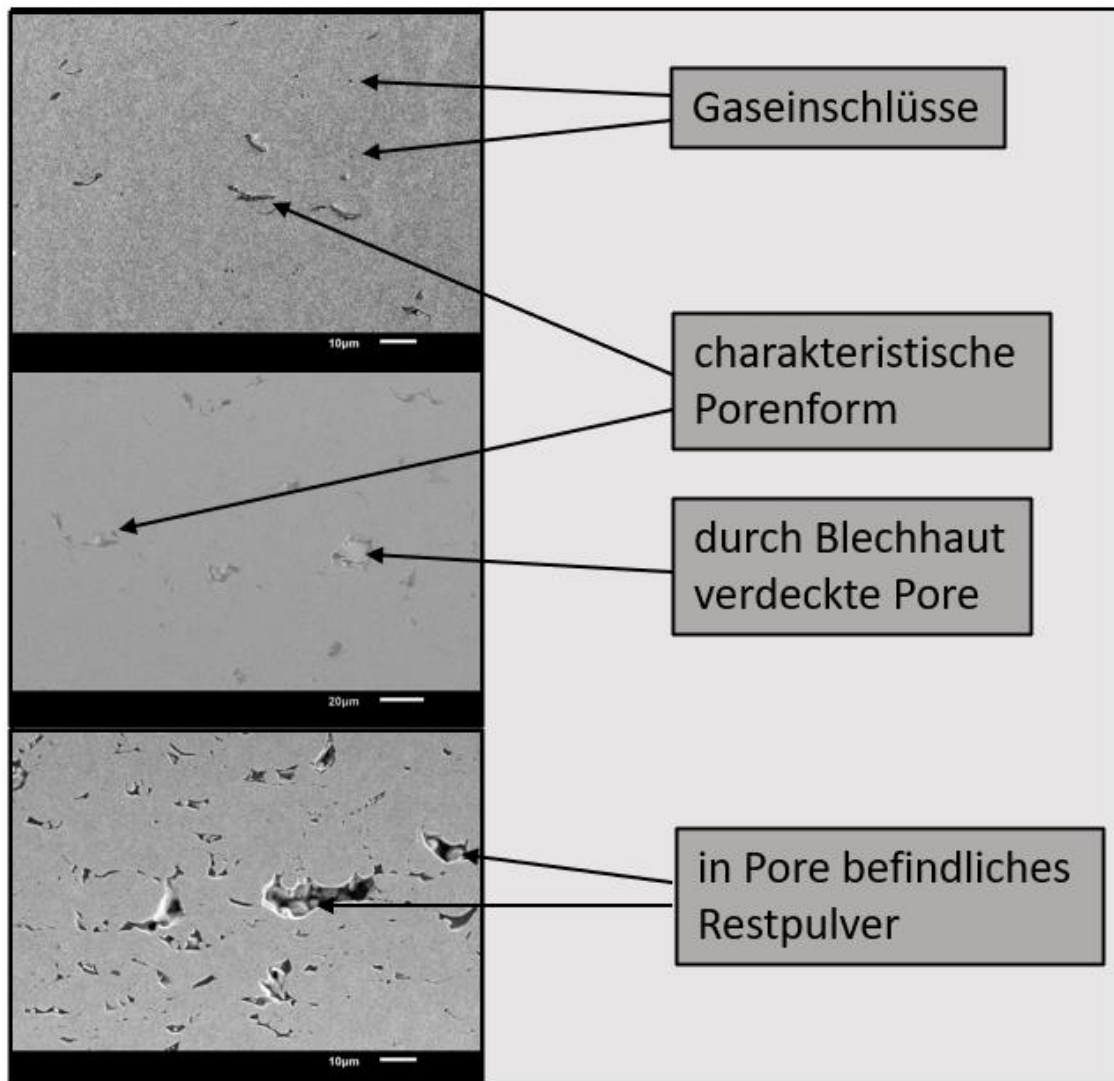


Abbildung 18: Überblick über die in den REM-Aufnahmen erkennbaren Poren.

Die Poren der Kategorie 3 sind mit Größen bis zu 50 µm deutlich größer als die Mikroporen und Poren der zweiten Kategorie und besitzen keine feste Form. Meist befinden sich in diesen Poren nicht geschmolzene Pulverkörner. Bei diesen Poren wurde nicht ausreichend Energie in das Pulver gebracht, um das Pulver vollständig aufzuschmelzen und es entstanden die bereits in Abbildung 12 beschriebenen Baufehler. Dass diese Poren ausschließlich bei den Bauteilen auftreten, die mit 500 kHz Puls wiederholte Frequenz erzeugt wurden, korreliert direkt mit dem Auftreten von Pulverausrück und der damit einhergehenden Limitierung

der VED und damit der ins Pulver eingetragenen Energie. Durch die Nutzung der höheren Pulswiederholffrequenz war der Energieeintrag nicht mehr begrenzt, wodurch Poren der dritten Kategorie vermieden werden konnten.

Daraus könnte man schließen, dass eine weitere Erhöhung der VED auch Poren der Kategorie 2 verhindert, was sich aber in den Untersuchungen zu Kapitel 5 (siehe auch Anlage II) nicht bestätigte. Wenn also eine weitere Erhöhung der VED nicht zu einer Verbesserung der relativen Dichte führt, wäre eine Erhöhung der Pulswiederholffrequenz ebenfalls nicht zielführend, da der Pulveraufschub, der bei 500 kHz der limitierende Faktor ist, bereits mit 1000 kHz vermieden werden kann und damit die VED nicht mehr nach oben hin begrenzt ist. Eine weitere Steigerung der Pulswiederholffrequenz hätte dementsprechend lediglich den Vorteil eines höheren Pulsüberlapps, wobei dieser sich bei einer Verdopplung der Frequenz von 90 % auf lediglich 95 % erhöhen würde. Viel entscheidender wäre es, Möglichkeiten zu finden, um die räumliche Ausdehnung der Schmelzzonen zu vergrößern, da die Mehrheit der Poren (Kategorie 2 und 3) an Stellen entsteht, die nicht ausreichend aufgeschmolzen wurden. Eine dieser Möglichkeiten stellt die Erhöhung der Pulsdauern dar, da durch die längere Bestrahlungszeit eines Laserpulses die Energie tiefer in das Pulver eindringen kann. Auch eine Vergrößerung des Strahldurchmessers auf der Pulveroberfläche, etwa durch eine Defokussierung, würde zu einer Vergrößerung der Schmelzzone führen, dann allerdings auf Kosten der Auflösung. Untersuchungen hierzu waren im Rahmen dieses Bachelorprojektes aber nicht möglich.

Ein anderer Grund, der die Entstehung von Poren generell als Folge haben könnte, sind Unregelmäßigkeiten in der Pulverschichtdicke. Diese treten bei einem nicht optimalen Pulveraufzug durch die Ring- und Klängen rakel auf. Aufnahmen aus dem Prozess zeigen, dass hauptsächlich die Klängen rakel solche Unregelmäßigkeiten verursacht (siehe Abbildung 19). Dabei springt die Klinge während des Aufzugs in beinahe regelmäßigen Abständen und hinterlässt dadurch Erhöhungen des Pulverbetts. Wodurch dieses Springen verursacht wird, ist allerdings nicht klar. Ob beispielweise eine Abhängigkeit von der Bauteilform oder vom gewählten Parameter existiert, wurde nicht betrachtet. Wahrscheinlich ist aber, dass Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche der Keramikplattform der Hauptgrund für das Springen der Klinge sind.

Die entstehenden Erhöhungen stellen im Prozess praktisch höhere Schichtdicken dar, wodurch dieser dann maßgeblich gestört werden kann. Vor allem die Poren der zweiten Kategorie, die bei 1000 kHz Pulswiederholffrequenz auftraten, lassen sich durch diese Unregelmäßigkeiten erklären. An diesen Stellen war die Pulverschichtdicke leicht erhöht und die Schmelzzone reichte damit nicht ausreichend tief genug ins Pulver, wodurch stellenweise keine vollständige Anbindung zur darunter befindlichen Schicht erfolgte. Eine Verbesserung des Pulveraufzugs sollte dementsprechend eine Erhöhung der relativen Dichte nach sich ziehen. Allerdings waren Untersuchungen auch hier nicht im Rahmen des Bachelorprojektes möglich.

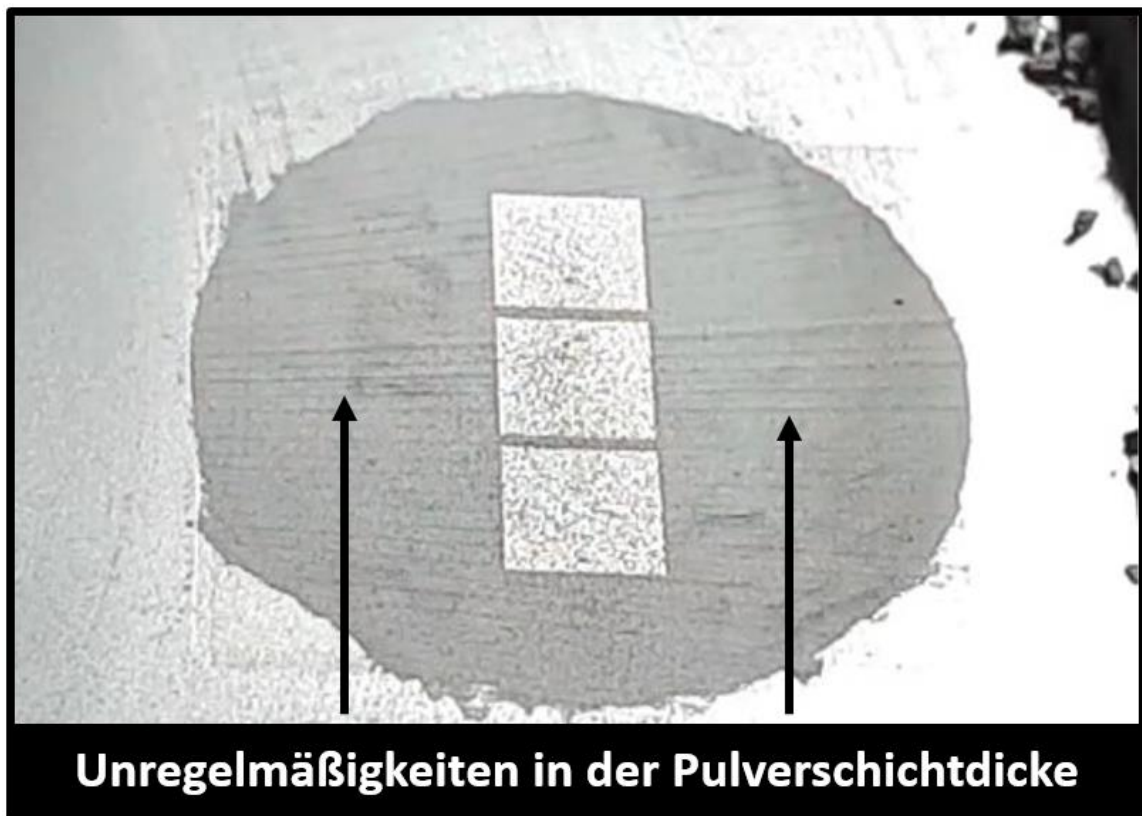


Abbildung 19: Unregelmäßigkeiten in der Pulverschichtdicke durch Springen der Klingenraket.

Die REM-Aufnahmen geben auch Aufschluss darüber, warum die Qualität der Querschliffe und damit die Ergebnisse der bildanalytischen Messung teils starken Schwankungen unterlag. Durch Pulverkörner, die sich insbesondere in Poren der dritten Kategorie befinden, werden die Ergebnisse nach oben hin verfälscht, da diese Poren entweder als deutlich kleiner oder als gar nicht vorhanden erkannt werden. Besonders für die Aufnahmen und Messungen mit 10-facher Vergrößerung ist dies aufgrund der schlechteren Auflösung problematisch. Zwar werden durch den Schleif- und Polierprozess auch Teile dieser Pulverkörner aus den Poren entfernt, allerdings nicht zu 100 %, was stets Abweichungen in der relativen Dichte nach sich zieht. Auch in Bezug auf die archimedische Messung der Dichte im folgenden Kapitel 6.2 wirkt sich die Anwesenheit von nicht geschmolzenen Pulverkörner in den Poren negativ auf die Ergebnisse aus. Ein zweiter Faktor, der lediglich bei der bildanalytischen Messung eine Rolle spielt, sind Blechhäute, die sich durch die Scherverformungen beim Schleifen und Polieren über die Poren legen (siehe Abbildung 18). Dadurch werden diese Poren, unabhängig von der Auflösung, ebenfalls nicht vom Programm als Poren erkannt.

6.2 Archimedische Messung

Zum Ende des Bachelorprojekts ergab sich die Möglichkeit, neben der bildanalytischen Messung der relativen Dichte eine Messung nach dem archimedischen Prinzip durchzuführen. Das Problem lag darin, dass eine Waage mit ausreichender Genauigkeit erst zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stand. Das Prinzip der Messung wurde bereits in Kapitel 4.1 genauer erläutert. Um es kurz zusammenzufassen wird ein Körper in Luft und in einem Fluid bekannter Dichte gewogen und aus der Differenz der Messwerte die Dichte des Körpers bestimmt (vgl. Gleichung 3). Laut Spierings et al. ist diese Messmethode genauer und zuverlässiger als die bildanalytische Messung zur Bestimmung der relativen Dichte von additiv gefertigten Bauteilen [12]. Aus diesem Grund eignet sich diese Messung auch insbesondere um einen Vergleich zu den bisher in dieser Arbeit bestimmten relativen Dichten zu ziehen, da der Schleif- und Polierprozess der Querschleife immer ein Problem darstellte.

Für die Messung wurde eine Analysenwaage des Herstellers METTLER TOLEDO mit einer Ablesbarkeit von 0,1 mg genutzt. Als Fluid diente deionisiertes Wasser, das mit einem geringen Anteil eines Mittels zur Verringerung der Oberflächenspannung gemischt wurde. Die Waage enthielt direkt ein Programm zur Bestimmung der Dichte, in das nacheinander das Gewicht an Luft und im Fluid eingetragen werden konnte. Das Programm berücksichtigte die temperaturabhängige Dichte des Wassers und berechnete aus den eingegebenen Werten direkt die Dichte des gemessenen Körpers. Für jeden Parameter (siehe Tabelle 4) wurden drei Würfel mit einer Kantenlänge von 5 mm erzeugt. Die Würfel wurden mit Ethanol gereinigt und vor der ersten Messung für eine Stunde in einem Ofen ausgeheizt. Für jeden Würfel wurden drei Messungen durchgeführt und anschließend der arithmetische Mittelwert gebildet. Aus den Mittelwerten der drei Würfel wurde dann durch erneute Mittelwertbildung die Dichte für den jeweiligen Parameter berechnet. Zwischen den Messungen wurden die Würfel erneut mit Ethanol gereinigt und mit einem Föhn ausreichend getrocknet. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 6 dargestellt. Die relative Dichte berechnet sich, indem die gemessene Dichte durch eine Referenzdichte teilt, die das Material bei 100-prozentiger relativer Dichte, also Vollmaterial, besitzt. Diese Dichte beträgt für Edelstahl 316L $7,9 \text{ g/cm}^3$.

Die archimedisch bestimmten relativen Dichten weichen insbesondere für 500 kHz Puls-wiederholfrequenz von den bildanalytisch bestimmten Werten ab. Vor allem für $3 \mu\text{m}$ und $4 \mu\text{m}$ Schichtdicke sind relativen Dichten um etwa 3,4 % bzw. 2,9 % niedriger. Erklären lässt sich dies nur damit, dass die Querschleife für diese Parameter trotz mehrmaligem Schleifen und Polieren immer noch stark verschmiert waren. Bildlich feststellen konnte man das allerdings selbst in den REM-Aufnahmen mit hoher Vergrößerung nicht. Es ist also festzustellen, dass die mit einer Puls-wiederholfrequenz von 500 kHz erreichbaren relativen Dichten bedeutend geringer sind, als es vorige Untersuchungen, inklusive der Praktikumsbericht, angedeutet haben. Für $6 \mu\text{m}$ Schichtdicke weicht der archimedisch bestimmte Wert

um etwa 2 % nach oben ab, was sich allerdings durch die hohe Anzahl an nicht geschmolzenen Pulverkörnern in einem Großteil der Poren erklären lässt. Diese werden fälschlicherweise mitgewogen und das Bauteil erscheint dadurch dichter, während bei der bildanalytischen Messung ein Teil dieser Körner aus den Poren entfernt wird.

Tabelle 6: Ergebnisse der Dichtemessung nach dem archimedischen Prinzip und Vergleich der daraus bestimmten relativen Dichten mit den bildanalytisch gemessenen relativen Dichten mit 50-facher Vergrößerung.

Pulswiederhol- frequenz [kHz]	Schichtdicke [μm]	Relative Dichte 50x [%]	Dichte arch. Messung [g/cm³]	Relative Dichte arch. Messung [%]
500	3	97,21	7,41	93,80
	4	96,19	7,37	93,29
	5	92,69	7,31	92,49
	6	88,66	7,15	90,46
1000	4	98,72	7,79	98,57
	5	98,61	7,75	98,14
	6	96,93	7,71	97,55

Für die Pulswiederholfrequenz von 1000 kHz stimmen die Werte der beiden Messmethoden dagegen besser überein. Für 4 μm und 5 μm Schichtdicke sind die Abweichungen klein und eine Differenz von 0,5 % lässt sich mit der angesprochenen Qualität des Querschliffes sowie mit dem Messfehler bei der archimedischen Messung erklären. Für 6 μm Schichtdicke ist die Differenz mit etwa 0,6 % nur marginal größer. Für diesen Parameter waren die Poren teils groß genug, um potenziell Pulverkörner zu enthalten und somit die archimedische Messung zu verfälschen, wodurch sich diese leicht größeren Abweichungen erklärt.

6.3 Betrachtung der Deckflächen

Zur näheren Betrachtung der Deckflächen, um weitere Informationen über die Entstehung von Poren und die Abhängigkeit der Schmelzspuren von Pulswiederholfrequenz und Linienabstand zu erhalten, wurden für beide Pulswiederholfrequenzen Testfelder erzeugt. Diese bestanden aus 500 μm hohen Quadern mit einer Grundfläche von 2 mm * 2 mm. Für jede Schichtdicke und jeden Linienabstand wurde ein Quader mit der jeweils optimalen VED (siehe Kapitel 5.2.1 und Anlage I) erzeugt. Die Höhe von 500 μm sollte verhindern, dass die Anbindung zum Substrat einen Einfluss auf die Deckflächen hat. Für jeden Parameter wurden dann mittels REM Aufnahmen mit 600-facher Vergrößerung aufgenommen.

Die Bilder bestätigen die Ergebnisse aus den vorherigen Untersuchungen. In Abbildung 20 ist die Deckfläche für 500 kHz Pulsfrequenz, 3 μm Schichtdicke und 30 μm Linienabstand, also der im Praktikumsbericht ermittelte Parameter, zu sehen.

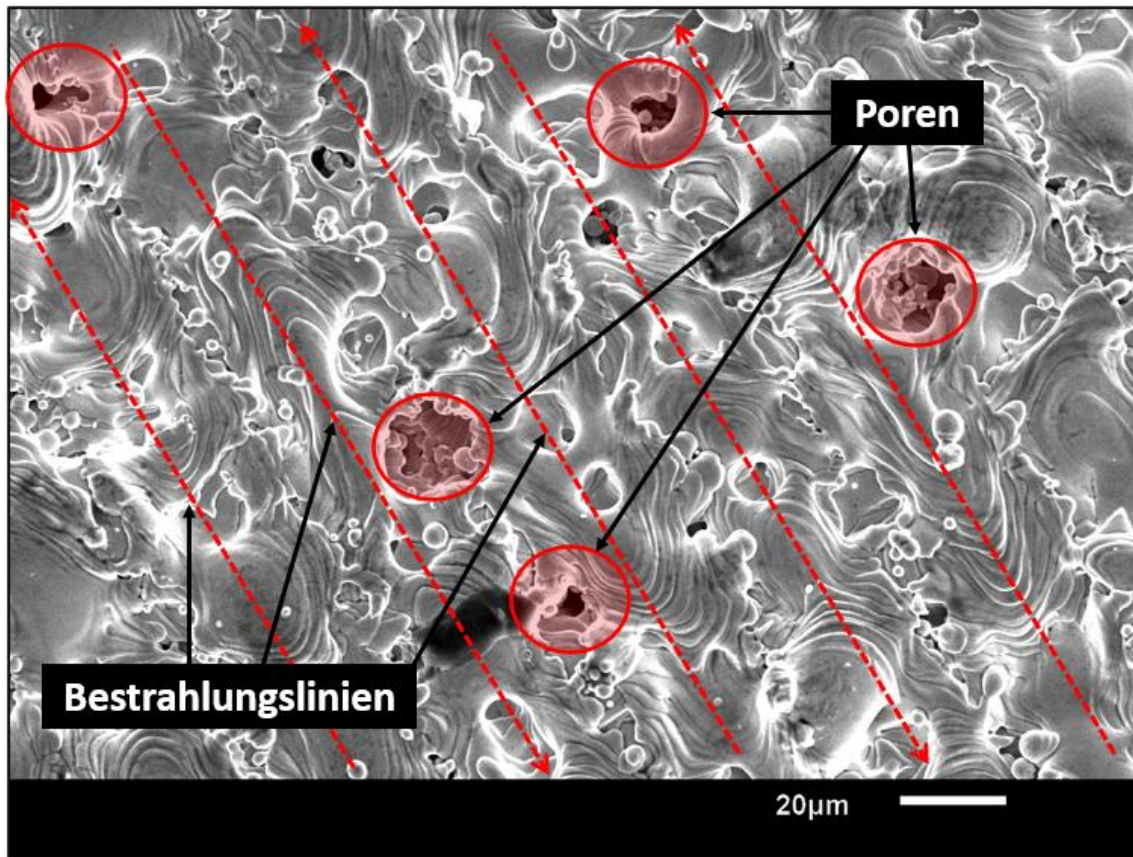


Abbildung 20: REM-Aufnahme der Deckfläche für den Parameter mit 500 kHz Pulsfrequenz, 3 μm Schichtdicke, und 30 μm Linienabstand. Eingezeichnet sind die Bestrahlungslinien mit Richtungsangabe (Pfeile) und Poren.

Darin sind gut die Bestrahlungslinien und die Richtung der Bestrahlung zu sehen. Auch die einzelnen Pulse sind zum Großteil zu erkennen. Es bestätigt sich die Annahme aus Kapitel 5.2.1, dass Poren vor allem zwischen den Bestrahlungslinien bzw. den dort entstehenden Schmelzzonen entstehen. Die roten Kreise in Abbildung 20 zeigen Stellen, die bei weiterem Aufbau des Bauteils sehr wahrscheinlich als Poren im Material zurückgeblieben wären. Teilweise sind in diesen Poren auch die nicht geschmolzenen Pulverkörner zu sehen, die bereits in den Querschliffen in Kapitel 6.1 zu beobachten waren.

Deutlich zu erkennen war auch der Unterschied zwischen den Pulsfrequenzen. In Abbildung 21 sind die Aufnahmen für 4 μm Schichtdicke und 20 μm Linienabstand für beide Pulsfrequenzen dargestellt. Die Deckfläche für 1000 kHz Pulsfrequenz ist im Vergleich homogener, die geschlossenen Schmelzspuren sind klar zu erkennen und große Poren wie in Abbildung 20 sind nicht vorhanden. Für 500 kHz ist dagegen keine klare Struktur zu erkennen. Die Deckfläche ist nicht vollständig geschlossen, die Schmelzspuren können nur erahnt werden und die Anzahl an Poren ist deutlich größer als für 1000 kHz.

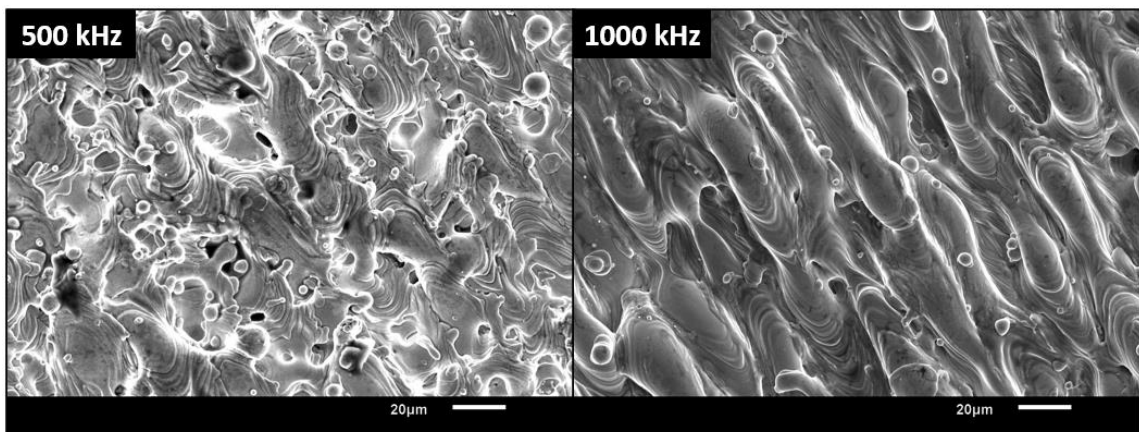


Abbildung 21: REM-Aufnahmen der Deckflächen für die Parameter mit 4 µm Schichtdicke, 20 µm Linienabstand und 500 kHz bzw. 1000 kHz Pulswiederhol frequenz.

Abschließend zeigt Abbildung 22 die Veränderung der Deckfläche in Abhängigkeit des Linienabstands. Dafür sind in Ergänzung zu dem bereits in Abbildung 19 dargestellten Parameter mit 1000 kHz Pulswiederhol frequenz, 4 µm Schichtdicke und 20 µm Linienabstand noch die weiteren Linienabstände 30 µm und 40 µm abgebildet.

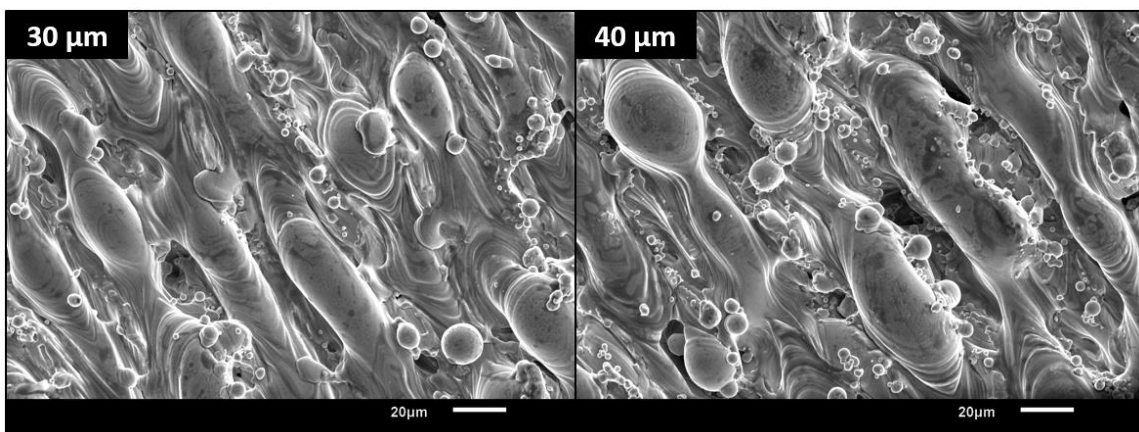


Abbildung 22: REM-Aufnahmen der Deckflächen für die Parameter mit 1000 kHz Pulswiederhol frequenz, 4 µm Schichtdicke und 30 µm bzw. 40 µm Linienabstand.

Es zeigt sich, dass mit Zunahme des Linienabstands die Qualität der Deckfläche hinsichtlich ihrer Homogenität verschlechtert. Durch den geringeren Überlapp der Schmelzspuren entstehen mehr Poren und insbesondere für 40 µm Linienabstand nimmt die Menge an nicht geschmolzenen Pulverkörner stark zu.

Die Aufnahmen der Deckfläche dienen damit zur Bestätigung der bisherigen Erkenntnisse. Erklärungen für die in diesem Kapitel dargestellten Sachverhalte wurden bereits in vorherigen Kapiteln, insbesondere Kapitel 5.2.1, geliefert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden umfassende Ergebnisse über die Erzeugung von hohen Bauteildichten im quasikontinuierlichen Lasermikrosintern in Abhängigkeit von der Schichtdicke und der Volumenenergiedichte geliefert. Dieses Verfahren ist im Vergleich zum klassischen Lasermikrosintern durch die Nutzung von hohen Pulswiederhol frequenzen von 500 kHz oder höher charakterisiert.

In der Vorbetrachtung wurde der Stand der Technik hinsichtlich der lasergestützten additiven Fertigungsverfahren aufgezeigt. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Diskussion von verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung der relativen Bauteildichte. Dabei wurde besonders auf die Problematik des Schleif- und Polierprozesses zur Herstellung von Querschliffen, die für die bildanalytische Dichtebestimmung benötigt werden, eingegangen. Das Verschmieren von Poren, welches auch bei mehrmaligem Polieren der Proben nicht vollständig verhindert werden konnte und zu teils eklatanten Abweichungen der Messwerte führte, soll an dieser Stelle nochmals genannt werden.

In den Untersuchungen stellte sich heraus, dass eine Pulswiederhol frequenz von 500 kHz nicht geeignet ist, um die erwünschten relativen Bauteildichten im Bereich von 98 – 99 % zu erzeugen. Die Hauptproblematik bestand im Effekt des Pulveraufschubs, welcher in dieser Arbeit genauer betrachtet und erläutert wurde. Dieser begrenzt die Energie, die in das Material eingetragen werden kann und verhindert so die Erzeugung von dichten Strukturen. Möglichkeiten zur Vermeidung des Pulveraufschubs, beispielsweise eine Erhöhung der Pulsdauer, wurden diskutiert.

Als einer dieser Möglichkeiten wurde die Erhöhung der Pulswiederhol frequenz genauer untersucht. Mit einer Pulswiederhol frequenz von 1000 kHz konnte der Pulveraufschub vermieden werden, wodurch die Erzeugung von relativen Bauteildichten größer 98 % mit Schichtdicken von 4 μm und 5 μm ermöglicht wurde. Diese Ergebnisse konnten durch eine Messung nach dem archimedischen Prinzip bestätigt werden.

7.2 Ausblick

Für die weitere Forschung zur Erzeugung von hohen Bauteildichten mit höheren Schichtdicken im Lasermikrosintern gibt es viele Anhaltspunkte. Einige, wie die Nutzung von längeren Pulsdauern oder die Erhöhung der Scangeschwindigkeit, wurden bereits in dieser Arbeit diskutiert. Diese Möglichkeiten können zunächst einzeln und im Anschluss kombiniert untersucht werden, um die optimalen Parameter zur Erzeugung der höchsten Bauteildichten zu ermitteln.

Interessant wäre außerdem die genauere Betrachtung des quasi-cw Lasermikrosinterns unter einer Schutzgasatmosphäre, da die Auswirkungen des Luftsauerstoffes auf den Prozess bisher kaum untersucht wurden, während bei dem Lasermikrosintern verwandten Verfahren wie dem μ SLM eine Nutzung von Schutzgas bereits Standard ist.

Das Endziel dieser Bemühungen sollte zum Schluss sein, über einen möglichst großen Schichtdickenbereich dichte Strukturen zuverlässig erzeugen zu können, um dann die schichtdickenabhängigen Prozess- (z.B. Bauzeit) und Bauteileigenschaften (z.B. minimale Strukturbreite, minimaler Downskin-Winkel) charakterisieren zu können.

Literatur

- [1] Bertoli, Umberto Scipioni, et al. "On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting." *Materials & Design* 113 (2017): 331-340.
- [2] Drechsel, Julian, et al. „Pulver- und Prozessuntersuchung für die generative Fertigung von Edelstahlbauteilen mittels Mikro-SLM.“ *11. Mittweidaer Lasertagung* (2019).
- [3] Fischer, Jakob, Martin Kniepkamp and Eberhard Abele. "Micro laser melting: analyses of current potentials and restrictions for the additive manufacturing of micro structures." *Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication* (2014).
- [4] Ma, Mingming, et al. "Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel." *Journal of Materials Processing Technology* 215 (2015): 142-150.
- [5] Peters, R., P. Beiss and S. Lindlohr. "Density Determination of Sintered Steel—Results of a Round Robin Test: Dedicated to Stefan Lindlohr who had to leave us much too early." *Practical Metallography* 56.11 (2019): 731-746.
- [6] Prashanth, K. G., et al. "Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?." *Materials Research Letters* 5.6 (2017): 386-390.
- [7] Regenfuss, Peter, et al. "Microparts by a novel modification of selective laser sintering." *TECHNICAL PAPERS-SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS-ALL SERIES-* (2004).
- [8] Regenfuss, Peter, Lars Hartwig and Sascha Klotzer. *Advancements in laser micro sintering*. Society of Manufacturing Engineers, 2000.
- [9] Regenfuss, Peter, et al. "Principles of laser micro sintering." *Rapid Prototyping Journal* (2007).
- [10] Roberts, Robert C. and Norman C. Tien. "3D printed stainless steel microelectrode arrays." *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*. IEEE, 2017.

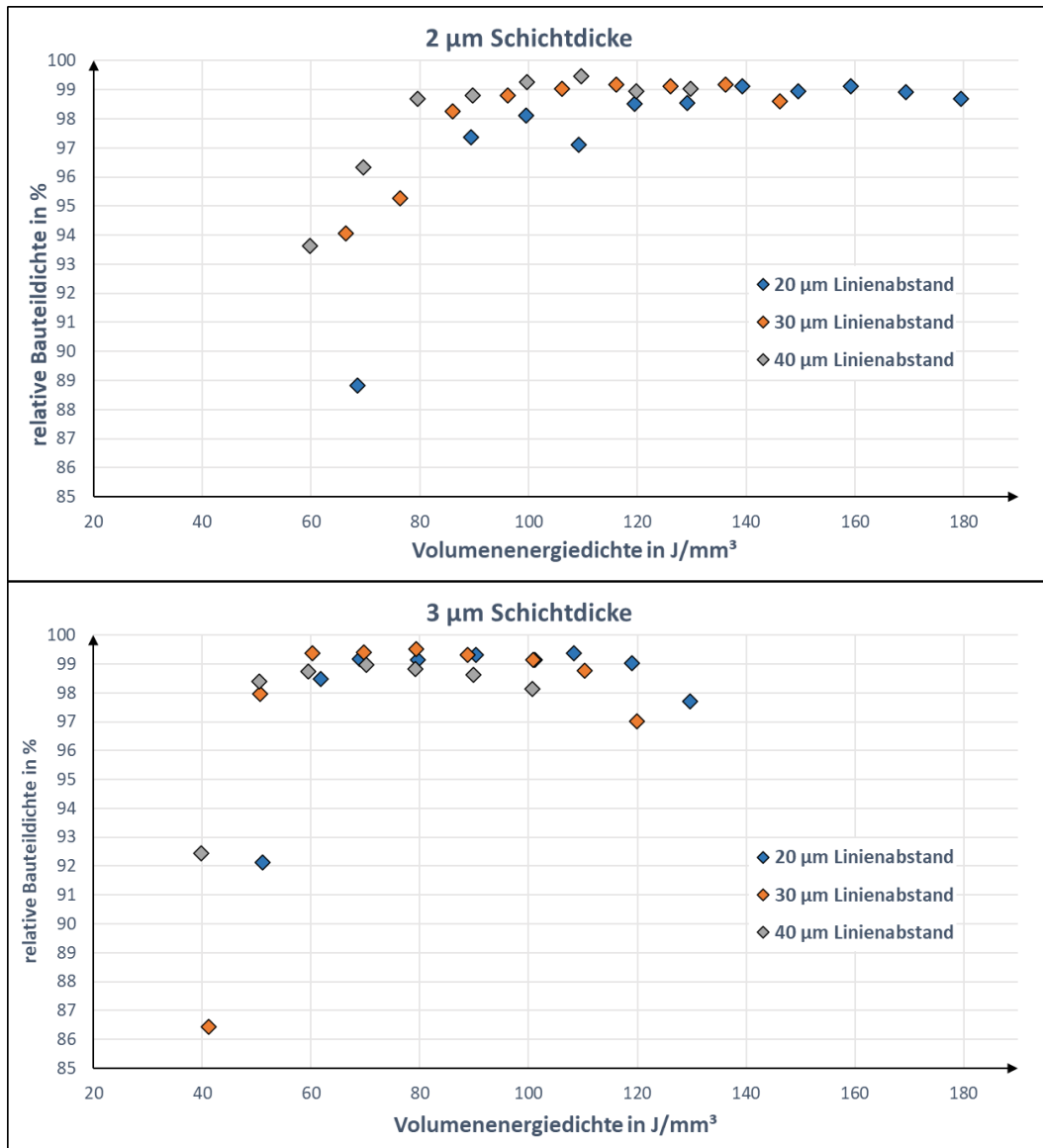
-
- [11] Shi, Wentian, et al. "Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 μm layer thickness." *Powder Technology* 360 (2020): 151-164.
- [12] Spierings, Adriaan B., M. Schneider and R. Eggenberger. "Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts." *Rapid Prototyping Journal* (2011).
- [13] Streek, André, et al. "Laser micro sintering - upgrade of the technology." *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Vol. 2009. No. 1. Laser Institute of America, 2009.
- [14] Ullmann, Frank, et al. "Untersuchungen zur Pulsanordnung beim Lasermikrosintern." *11. Mittweidaer Lasertagung* (2019).
- [15] Wang, Shuo, et al. "Research on high layer thickness fabricated of 316L by selective laser melting." *Materials* 10.9 (2017): 1055.
- [16] Yap, Chor Yen, et al. "Review of selective laser melting: Materials and applications." *Applied physics reviews* 2.4 (2015): 041101.

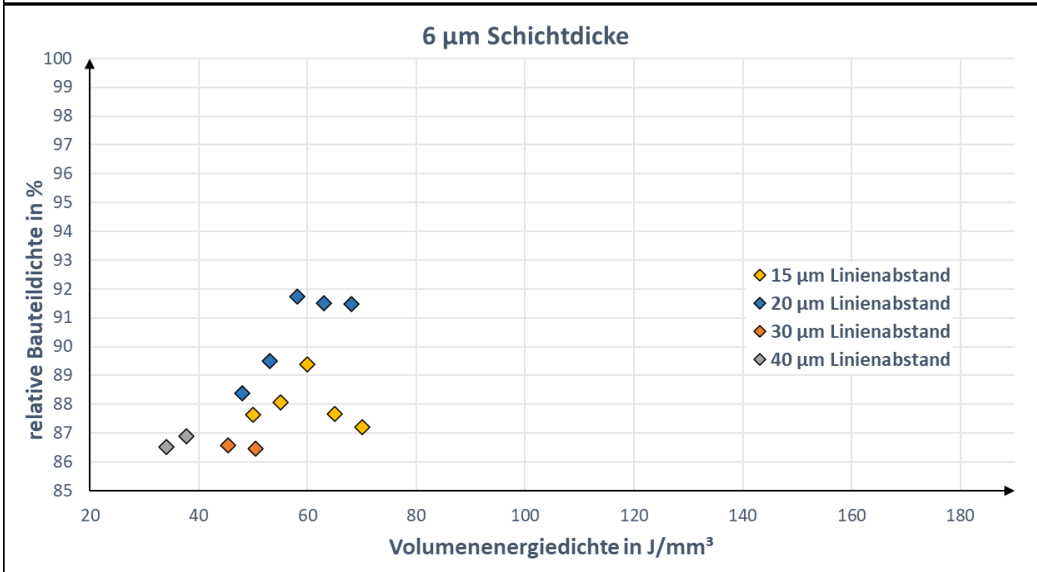
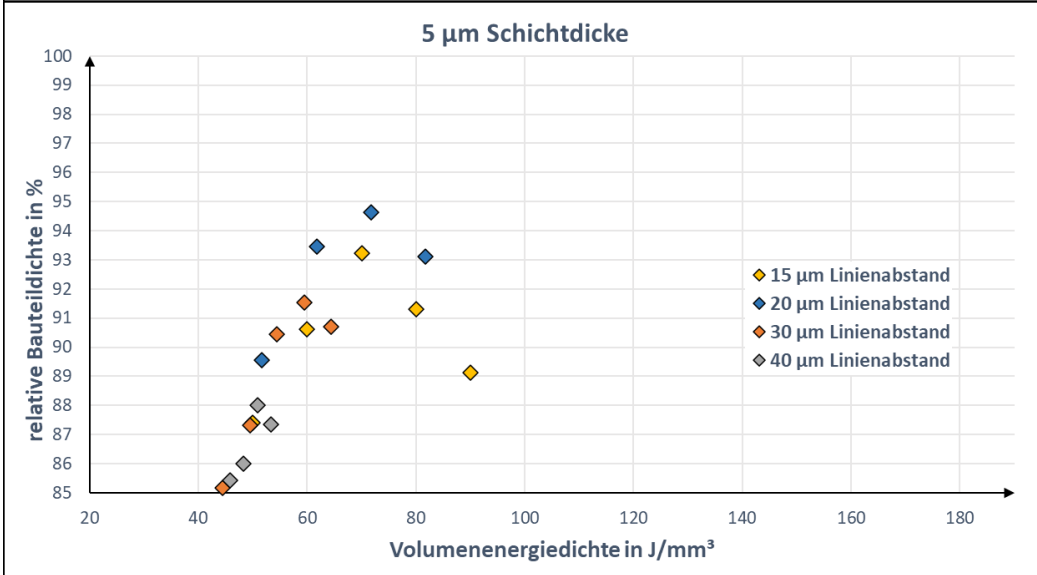
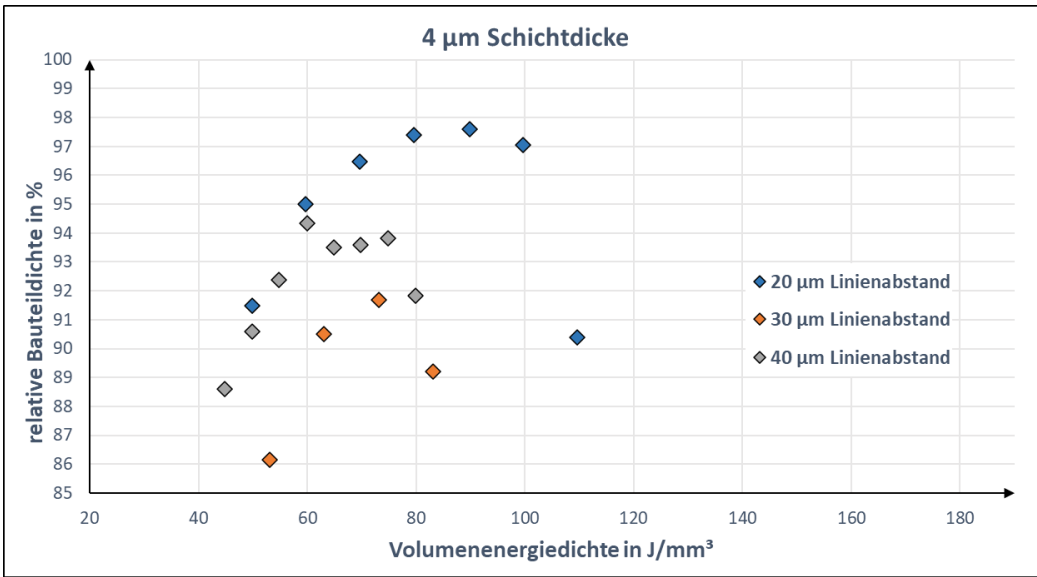
Anlagen

Anlage I, Dichtemessung mit 500 kHz..... A-LVII

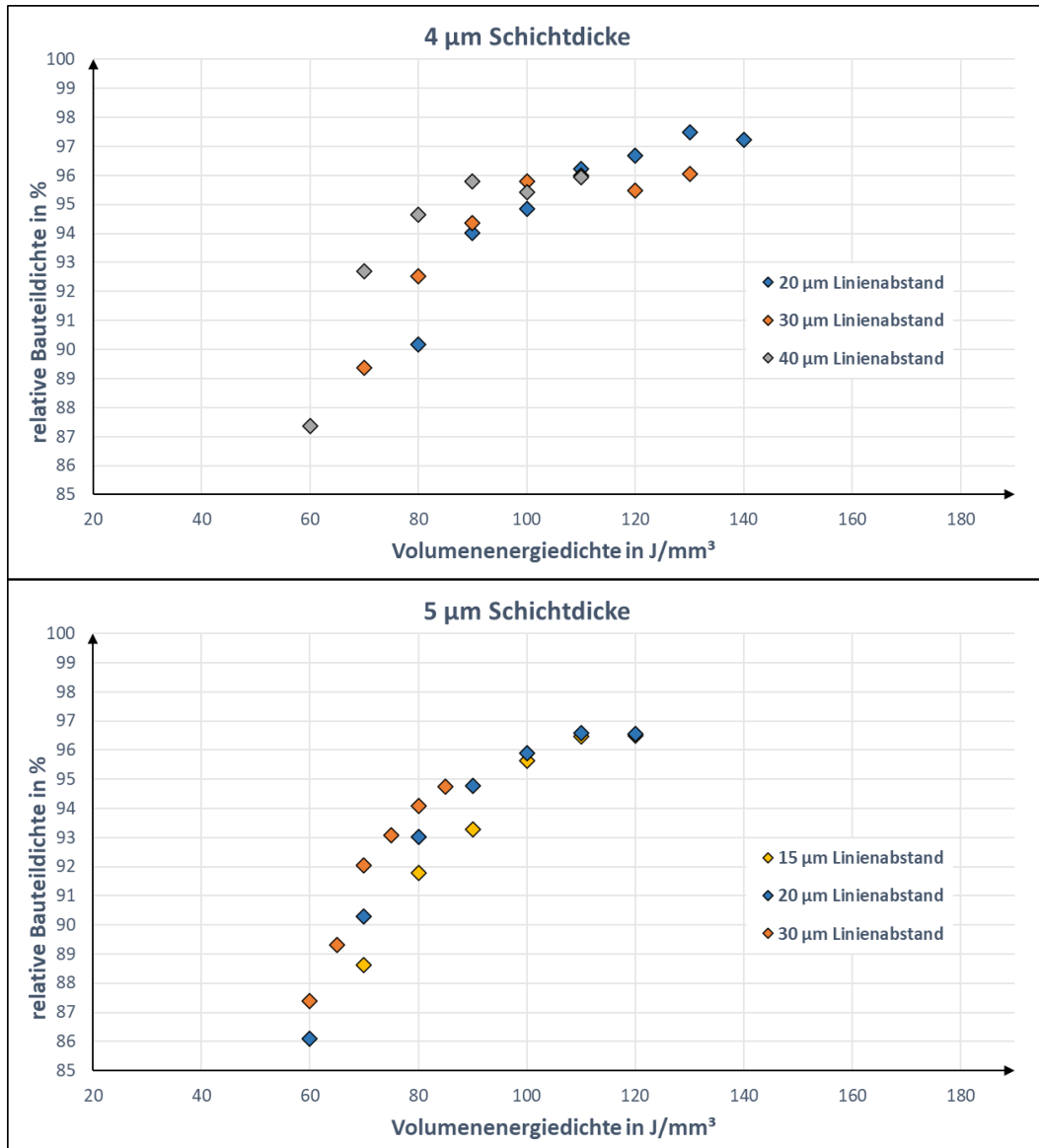
Anlage II, Dichtemessung mit 1000 kHz..... A-LIX

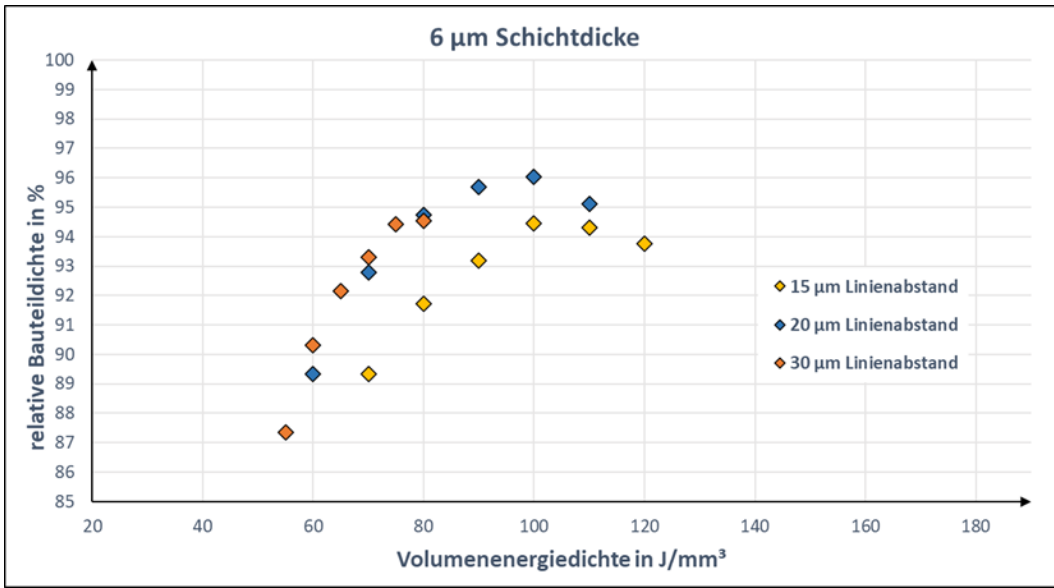
Anlage I, Dichtemessung mit 500 kHz





Anlage II, Dichtemessung mit 1000 kHz





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 15. Januar 2021

Florian Heinrich