

Fachbereich Maschinenbau

Arbeitsgruppe Chemie, Oberflächentechnik und Korrosion

Bachelorarbeit zu Thema

**Machbarkeitsstudie zu Selektivem Laserschmelzen von Reinkupfer
mit einem Metall-3D-Drucker mit 100 W Leistung**

Feasibility study of Selective Laser Melting of pure copper with a metal
3D printer with 100 W power

Vorgelegt von
Matrikelnummer

Patrik Adolph
7089861

Erstprüfer
Zweitprüfer

Prof. Dr. Tamara Appel
Dr. Roland Hergenröder

Vorgelegt am

02.11.2018

Abstract

Selective laser melting is continuing to gain importance in a steadily expanding area of applications. To this date there exists no study that describes the selective laser melting of pure copper for laser powers with less than 195 watt. For this reason a feasibility study of selective laser melting of pure copper with a metal 3D printer with 100 W power is conducted.

The aim of this study is to find out, whether it is possible to achieve the same results different studies achieved while using less laser power than these studies. Experimental investigations showed that only a very low reproducibility of component properties can be achieved. While some of the components created in this study have the same or even better properties than the properties described in the studies, the lacking reproducibility makes it unlikely to achieve the same results again even when using the same parameters.

Zusammenfassung

Das Selektive Laserschmelzen setzt sich in neuen Anwendungsgebieten durch und gewinnt stetig an Bedeutung. Da für das Selektive Laserschmelzen von Kupfer bisher keine Studien existieren, bei denen Laserleistungen von weniger als 195 Watt genutzt wurden, wird in dieser Arbeit eine Machbarkeitsstudie an einer Anlage mit einem Laser von 100 Watt Leistung durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob trotz der niedrigeren Laserleistung ähnliche Ergebnisse erzielt werden können, wie in vorangegangenen Studien. Hierbei wird durch experimentelle Versuche festgestellt, dass eine sehr geringe Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften möglich ist. Es werden die Eigenschaften der Probekörper der vorangegangenen Studien für einzelne Probekörper erzielt, allerdings ist eine Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse selbst bei Benutzung gleicher Parameter nicht gegeben.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen	VI
1 Einleitung	1
2 Konventionelle Methoden der Kupferverarbeitung	3
2.1 Gießverfahren	3
2.2 Metallpulverspritzguss	3
2.3 Lost Foam	4
3 Additive Fertigungsverfahren	6
3.1 Elektronenstrahlschmelzen	6
3.2 Selektives Lasersintern	7
3.3 Selektives Laserschmelzen	8
3.3.1 Prozessablauf	8
3.3.2 Stützstrukturen	11
3.3.3 Parameter	12
4 Kupfer	14
4.1 Werkstoffkennwerte	14
4.2 Chemische Eigenschaften	14
4.3 Elektrische Leitfähigkeit	14
5 Selektives Laserschmelzen von Kupfer	17
5.1 Wärmeleitfähigkeit	17
5.2 Sauerstoffgehalt	19
5.3 Absorption von Laserstrahlung	20
6 Verwendete Methoden und Mittel	25

6.1	SLM-Anlage	25
6.2	Lichtmikroskop	26
6.3	Analysenwaage	26
6.4	Rasterelektronenmikroskop	26
6.5	Energiedispersive Röntgenspektroskopie	27
6.6	Zugversuch	27
6.7	Hydrostatische Waage	28
7	Vorgehen	30
7.1	Pulverauswahl	30
7.2	Untersuchung des Pulvers	33
7.3	Parameterbestimmung	37
7.3.1	Energiedichteabschätzung	38
7.3.2	Festlegung der Parameter	41
7.4	Herstellbarkeit, Scangeschwindigkeit und Stützstrukturen	43
7.4.1	Versuchsaufbau	43
7.4.2	Auswertung	45
7.4.3	Zusammenfassung	48
7.5	Eingrenzen der optimalen Scangeschwindigkeit	49
7.5.1	Versuchsaufbau	49
7.5.2	Auswertung	50
7.5.3	Zusammenfassung	53
7.6	Bestimmung Zugfestigkeit und Dichte	54
7.6.1	Versuchsaufbau	54
7.6.2	Auswertung	56
7.6.3	Zusammenfassung	62
7.7	Zugproben mit erhöhter Scangeschwindigkeit	65

7.7.1	Versuchsaufbau	65
7.7.2	Auswertung	65
8	Fazit und Ausblick	68
8.1	Zusammenfassung	68
8.2	Fazit	70
8.3	Ausblick	71
8.3.1	Messmethoden	71
8.3.2	Prozess	72
	Literaturverzeichnis	73
	Erklärung über selbständig erbrachte Leistungen	79
	Anhang	80
A1:	Materialanalyse des Pulvers	80
A2:	Materialanalyse der Bruchflächen	81
A3:	Datenträger	82

Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
3D	Dreidimensional
CAD	Computer-Aided Design (Deutsch: rechnerunterstütztes Konstruieren)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBM	Electron Beam Melting (Deutsch: Elektronenstrahlschmelzen)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Deutsch: Energiedispersive Röntgenspektroskopie)
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation (Deutsch: Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
PIM	Powder Injection Moulding (Deutsch: Metallpulverspritzgießen)
REM	Raserelektronenmikroskop
SLS	Selektives Lasersintern
SLM	Selective Laser Melting (Deutsch: Selektives Laserschmelzen)
Stabw	Standardabweichung

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ε	%	Dehnung
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
σ	$\text{m}/(\Omega \times \text{mm}^2)$	Elektrische Leitfähigkeit
σ_n	N/mm^2	Nennspannung
τ		Anteil transmittierter Laserstrahlung
A	%	Absorptionsgrad
$E^\circ_{\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}}$	V	Standardpotential Kupfer
E_v	J/mm^3	Volumenenergiedichte
F	N	Kraft
h_s	mm	Spurabstand
l_p	mm	Punktabstand
l_s	mm	Schichtdicke
L	$\text{W} \times \Omega \times \text{K}^{-2}$	Lorenz-Zahl
P_L	W	Laserleistung
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
S_0	mm^2	Querschnittsfläche
t_e	S	Belichtungszeit
T_S	K	Schmelztemperatur
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit

1 Einleitung

Das Selektive Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) setzt sich stetig in neuen und größeren Anwendungsfeldern durch und nutzt dabei seine Vorteile bei der Fertigung komplexer Bauteile gegenüber den fest etablierten Verfahren wie zum Beispiel dem Fräsen, Drehen oder Gießen. So zeichnet sich das Verfahren vor allem durch die folgenden Aspekte aus: [1]

- Verarbeitung von schwer zu gießenden oder spanenden Werkstoffen
- Große geometrische Freiheit
- Geringer Materialverbrauch

Für metallische Werkstoffe wie beispielsweise Stahl-, Titan-, Nickel- oder Aluminiumlegierungen werden bereits Bauteile mit Eigenschaften erstellt, wie sie bei konventionell hergestellten Bauteilen vorhanden sind. Mittels SLM ist es bisher jedoch noch nicht gelungen dichte und defektfreie Bauteile aus Kupfer zu fertigen. [2] Kupfer ist schon seit über 6000 Jahren ein für die Menschheit unverzichtbarer Werkstoff, welcher zunächst vor allem für Werkzeuge, Waffen und Schmuck verwendet wurde. Heutzutage ist Kupfer wegen seiner guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit aus der Industrie nicht wegzudenken. [3] So wird Kupfer, als zweitbesten metallischer Leiter nach Silber, aufgrund der besseren Verfügbarkeit für elektrische Leitungen in Kabeln, als Spulen in Transformatoren, auf Leiterbahnen und für weitere Anwendungen genutzt. Die Kombination der hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer und der großen geometrischen Freiheit beim Selektiven Laserschmelzen erweitert die Möglichkeiten bei der Konstruktion von Kupferbauteilen. [2]

Das Leibniz-Institut für analytische Wissenschaften in Dortmund interessiert sich für neue Fertigungsverfahren zur Herstellung von komplexen Leiterbahnen. Aus diesem Anlass wird in der Arbeitsgruppe Chemie, Oberflächentechnik und Korrosion am Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Dortmund, in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut eine Machbarkeitsstudie zum Selektiven Laserschmelzen von Reinkupfer durchgeführt. Die hierfür genutzte SLM-Anlage hat mit 100 Watt eine Laserleistung die deutlich unter den Leistungen liegt, mit welchen das Selektive Laserschmelzen von Kupfer bisher geprüft wurde.

Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit die Prozessparameter aus bereits vorhandenen Studien zu dem Thema verglichen und es wird versucht diese vergleichbar zu machen. Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es herauszufinden, ob es trotz der niedrigen Laserleistung möglich ist, durch eine Anpassung der Prozessparameter, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Als Vergleichswerte dienen die in den Studien für Kupferproben erreichten Massendichten.

2 Konventionelle Methoden der Kupferverarbeitung

Die additiven Fertigungsverfahren sind als eines der jüngeren Fertigungsverfahren anzusehen. Vor der Möglichkeit Bauteile mit Hilfe der additiven Fertigungsverfahren herzustellen, wurden komplexe metallische Bauteile häufig durch das Verbinden von Einzelteilen, wie dem Kleben, Schweißen oder Löten, hergestellt. Abgesehen vom Verbinden von Einzelteilen, gibt es noch andere Verfahren um komplexe Kupferbauteile zu fertigen. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt. [2]

2.1 Gießverfahren

Aus einer Vielzahl verschiedener Gießverfahren wird für komplexe Bauteile aus Kupfer hauptsächlich der Feinguss gewählt. Das Verfahren ermöglicht die Fertigung von sowohl dünnwandigen, als auch komplexen Bauteilen.

Das Verfahren besteht aus mehreren Schritten. Zunächst wird das Werkzeug gefertigt und anschließend werden Modelle aus Wachs oder Schaum-Polystyrol erstellt. Auf das Modell wird daraufhin ein feuerfestes Material, welches häufig eine Keramik ist, aufgebracht. Nach einer Verdichtung und Trocknung des Materials wird das Wachs entfernt. Danach wird die Form mit Kupfer gefüllt. Bei der Verwendung von Schaum-Polystyrol kann direkt auf das sich zersetzende Polystyrolmodell gegossen werden. Durch das Vergießen unter Vakuum kann die Formgenauigkeit verbessert werden. [4] Durch zusätzliche Beaufschlagung von Überdruck können Formen mit Wandstärken unter einem Millimeter hergestellt werden. [2]

2.2 Metallpulverspritzguss

Unter dem Metallpulverspritzgießen (engl.: Powder injection moulding, PIM) versteht man ein urformendes Fertigungsverfahren, bei welchem das Kunststoffspritzgießen und das Sintern zu einem einzelnen Prozess verbunden ist. Durch die Verbindung beider Verfahren kann eine hohe Formgebungsvielfalt erreicht werden und die produzierten Teile können durch das Sintern besser eingestellt werden. Das Ausgangsmaterial beim Pulverspritzgießen ist eine Mischung aus einem Metallpulver und einem Kunststoffbinder, welche zusammen granuliert werden. Das dabei entstehende Granulat wird als Feedstock bezeichnet. [5] Die Fertigungsschritte des Prozesses sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

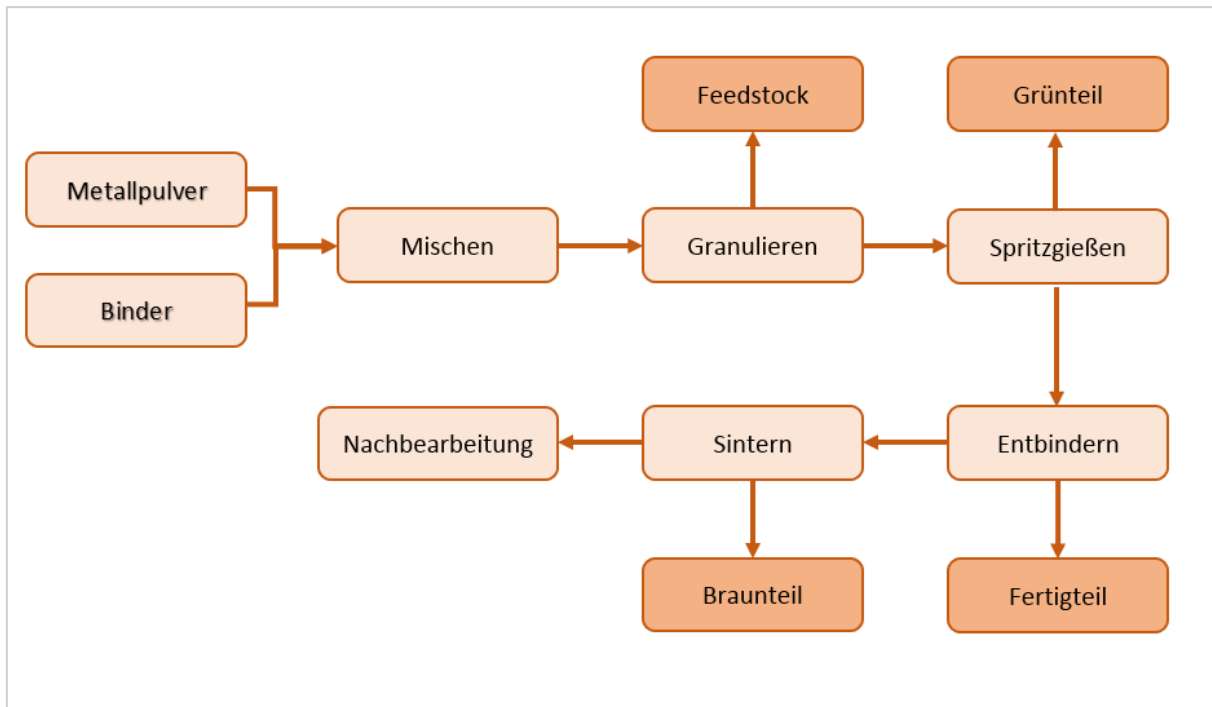


Abbildung 2-1 Der Pulverspritzgussprozess

Der Feedstock wird mit Hilfe einer Spritzgussmaschine in Form gebracht. Das produzierte Grünteil wird in der anschließenden Entbinderung von zuvor zugemischtem Kunststoffbinder befreit. [6] Dies geschieht entweder durch eine thermische Zersetzung oder durch eine Entfernung mit Hilfe von Lösungsmittel. Das hier entstehende Fertigteil wird durch nachfolgendes Sintern verdichtet und erreicht so seine endgültigen geometrischen und mechanischen Eigenschaften. Die beim Metallpulverspritzgießen entstehenden Bauteile weisen Dichten von mehr als 96 % auf. [6]

2.3 Lost Foam

Unter Lost Foam versteht man ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von gegossenen metallischen Bauteilen mit komplexen Geometrien. Hierbei wird ein einmal verwendbares Positivmodell des eigentlichen Bauteils aus Schaumstoff erstellt. [7] Dieses Modell wird an ein Angussystem gefügt und mit einer keramischen Schicht überzogen. Nach einer Einbettung in Formsand wird flüssiges Metall in das Modell gegossen. Hierbei wird das Schaumstoffmodell zersetzt und der entstehende Hohlraum vom Metall ausgefüllt. Da das Positivmodell bei dem Prozess zerstört wird, ist dieser als Prozess mit verlorener Form einzuordnen. [8] Der Vergleich zwischen Positivmodell und dem so entstehenden Bauteil ist in Abbildung 2-2 dargestellt.



Abbildung 2-2 Lost Foam - Fertiges Bauteil (links) und Positivmodell (rechts) [9]

Das Verfahren erlaubt die Herstellung von komplexen Gussteilen, die nah am End- und Belastungszustand sind. Die Anforderungen an das Schaumstoffmodell sind bei diesem Verfahren von Nachteil, da das Modell keine scharfen Kanten aufweisen darf. Diese erschweren die Haftung der Schlichte und können beim Einfließen der Schmelze zu Problemen führen. Des Weiteren können mit Hilfe des Verfahrens keine Hohlräume hergestellt werden. [10]

3 Additive Fertigungsverfahren

Unter additiven Fertigungsverfahren versteht man alle Fertigungsverfahren bei denen nach dem Schichtbauprinzip automatisiert Bauteile hergestellt werden. [11] Hierfür werden nur die in Schichten unterteilten (geslicten) CAD-Daten des Bauteils benötigt und die produzierten Bauteile entstehen in einem einzigen Produktionsschritt als fertige Produkte. [12] Der Ablauf

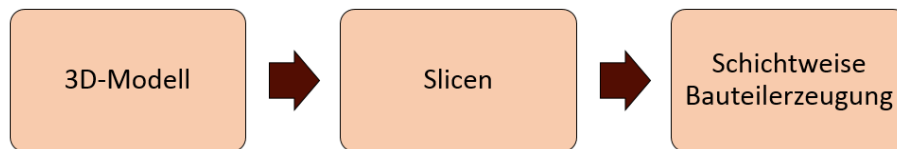


Abbildung 3-1 Prozessablauf Additive Fertigung

ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Nach der Konstruktion eines 3D-Modells des Bauteils mit Hilfe von CAD-Software, wie zum Beispiel SolidWorks, wird das Modell mit Hilfe einer speziellen Software in Schichten mit zuvor definierter Dicke unterteilt. Dieser Prozess wird als Slicen bezeichnet. Nach dem Slicen wird das Bauteil, je nach Prozess unterschiedlich, Schicht für Schicht erzeugt.

Im Folgenden wird ausschließlich auf die für Kupfer relevanten additiven Fertigungsverfahren eingegangen. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf das Selektive Laserschmelzen gelegt, welches das für diese Arbeit genutzte Fertigungsverfahren ist. Für Informationen über weitere additive Fertigungsverfahren siehe [11].

3.1 Elektronenstrahlschmelzen

Beim Elektronenstrahlschmelzen (Electron Beam Melting, EBM) handelt es sich um einen Prozess zum Versintern reiner Metallpulver. Wie bei allen additiven Fertigungsverfahren wird hier schichtweise das Bauteil erzeugt. Hierfür wird im Vakuum durch einen mit Magnetfeldern gelenkten Elektronenstrahl das Pulver dem im CAD-Modell erzeugten Bauteil entsprechend aufgeschmolzen. [11] Mit Hilfe des Verfahrens werden bei elektronenstrahlgeschmolzenen Probekörpern aus Kupfer Dichten von bis zu 99 % erreicht, wobei die elektrische Leitfähigkeit noch 95% des Wertes für Reinkupfer beträgt. [2]

3.2 Selektives Lasersintern

Unter Selektivem Lasersintern (SLS) versteht man eine Wärmebehandlung von Pulvermaterialien, bei welchen die Pulverpartikel mit Hilfe eines Lasers angeschmolzen und zu einer Schicht verbunden werden. Dies entspricht nicht dem klassischen Sinterprozess, bei dem bei einer Temperatur, welche höchstens 80 % des Schmelzpunktes T_S beträgt, unter hohem Druck und über längere Zeit die einzelnen Pulverpartikel ineinander diffundieren. [13] Beim Selektiven Lasersintern werden Mehrkomponenten-Pulversysteme genutzt, von denen eine Komponente als Bindemittel dient. Der als Bindemittel dienende Werkstoff ist ein niedrigschmelzender Werkstoff, welcher beim Erhitzen durch den Laserstrahl vollkommen aufschmilzt und den Raum zwischen den Pulverkörnern des hochschmelzenden Werkstoffes ausfüllt. [14] Bei einem Werkstoff aus Kupfer und Kupfer-(I)-phosphid (Cu_3P), mit einem Bindemittel, wurden mittels Selektiven Lasersinterns Probekörper mit bis zu 82,2 % Dichte erzeugt. Je größer der Anteil des Bindemittels ist, desto größer ist die letztendliche Dichte. [15]

3.3 Selektives Laserschmelzen

3.3.1 Prozessablauf

Beim Selektiven Laserschmelzen (SLM) wird, wie beim Selektiven Lasersintern (siehe Kapitel 3.2), Metallpulver mit Hilfe eines Lasers zu einem Bauteil verbunden. Beim Selektiven Laserschmelzen wird das Pulver allerdings nicht angeschmolzen, sondern aufgeschmolzen. [16] Dabei wird sowohl die oberste Pulverschicht vollkommen, als auch die bereits verschmolzene Schicht darunter zum Teil aufgeschmolzen. Das Ergebnis ist eine schmelzmetallurgische Verbindung von nebeneinanderliegenden Schichten und den darunterliegenden Schichten. Durch das vollständige Aufschmelzen sind die mechanischen Eigenschaften mit denen von gießtechnisch hergestellten Materialien vergleichbar. [16]

Die grundsätzliche Prozesskette für den SLM-Prozess ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

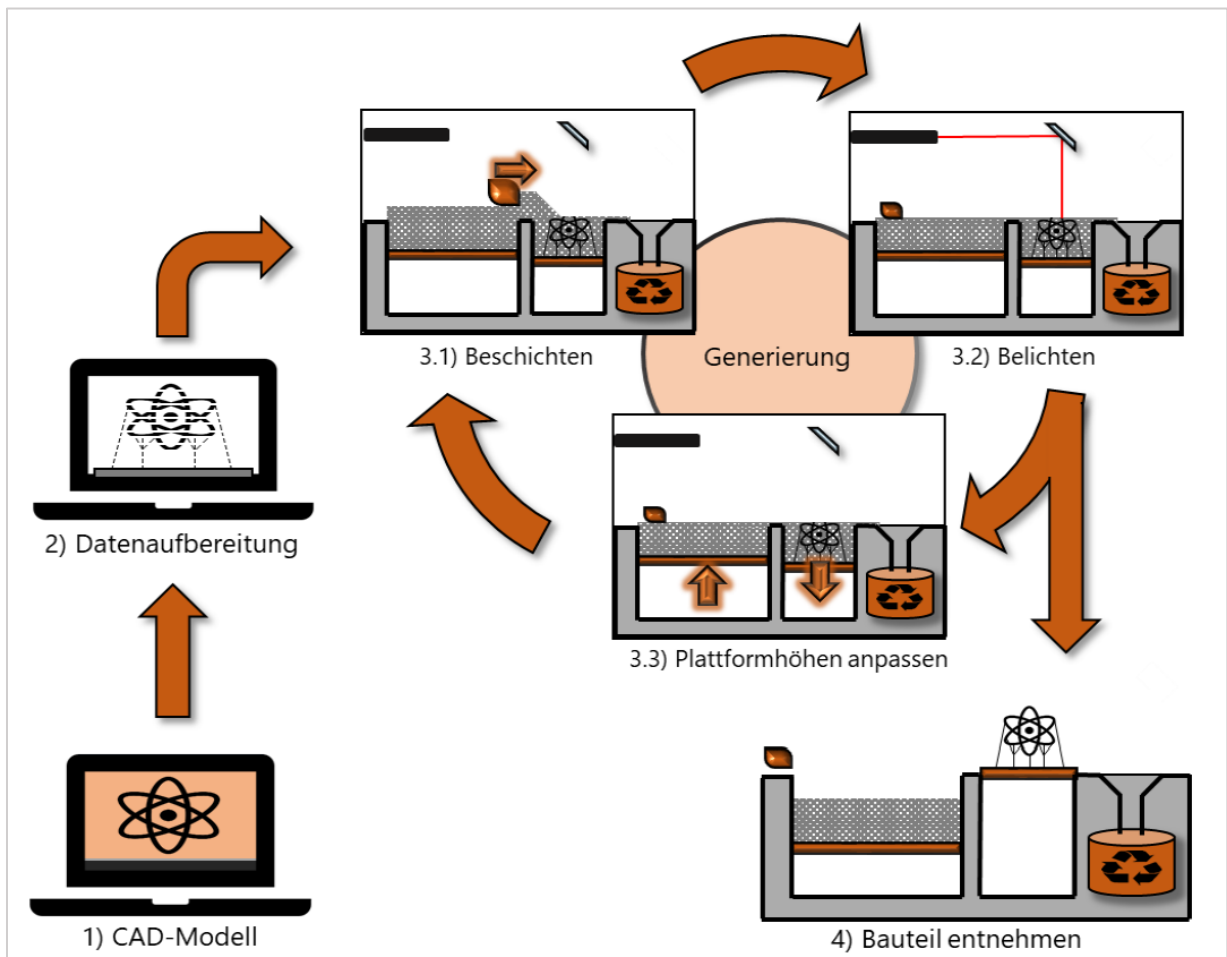


Abbildung 3-2 SLM-Prozesskette [17]

Im Folgenden werden die in Abbildung 3-2 dargestellten Schritte der Prozesskette erläutert.

1. *CAD-Modell*: Der erste Schritt jeder Produktentwicklung ist es Ideen für Funktion und Aussehen des Produktes zu finden. Konzepte können dazu viele verschiedene Formen

aufweisen. Von schriftlichen über bildliche Beschreibungen zu Skizzen und repräsentativen Modellen. [18] Bei additiven Fertigungsverfahren muss zwangsläufig ein digitales Modell in Form eines CAD-Modells genutzt werden, da dies für die Erzeugung der Schichten notwendig ist. [19] Die für diese Arbeit genutzte CAD-Software ist SolidWorks.

2. Datenaufbereitung

2.1. *Datenkonvertierung:* Das Standard-Dateiformat für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren ist das STL-Format. [19] Das STL-Format bietet einen leichten Weg das CAD-Modell alleine mit seiner Geometrie zu beschreiben. Hierzu werden alle Konstruktionsdaten, Materialeigenschaften, etc. entfernt und die Flächen des Modells mit Dreiecksfacetten dargestellt. Die minimale Größe der Dreiecke kann in der CAD-Software bestimmt werden, wobei es das Ziel ist im späteren Modell keine Dreiecke an der Oberfläche zu erkennen. [18] In Abbildung 3-3 ist der Einfluss der Anzahl der

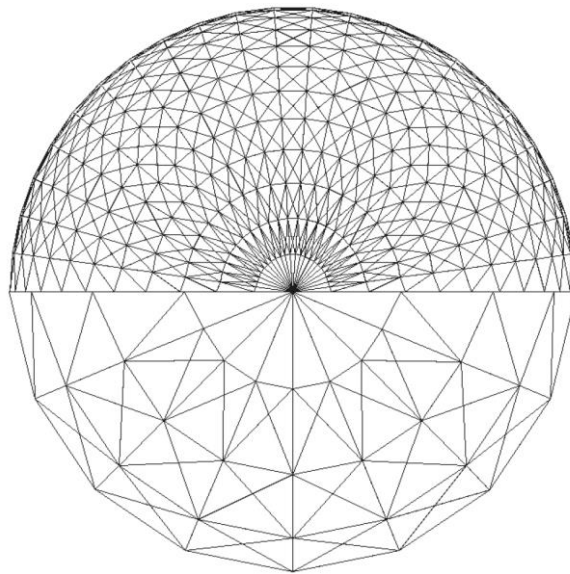


Abbildung 3-3 Einfluss der Anzahl der Dreiecke auf die Modellierung der Oberfläche einer Kugel [11]

Dreiecke auf die Modellierung eines Modells abgebildet. Je mehr Dreiecke vorhanden sind und somit auch je kleiner die einzelnen Dreiecke sind, desto genauer kann der eigentliche Körper dargestellt werden. [11]

2.2. *Erstellung von Fertigungsdaten:* Im Rahmen der Datenaufbereitung wird zunächst die Position im Bauraum des 3D-Druckers, das so genannte „Nesting“, festgelegt. Daraufhin ist die Orientierung des Bauteils im Bauraum zu definieren. Diese hat Auswirkungen auf die entstehende Oberflächenqualität des Bauteils. Des Weiteren sind Stützstrukturen („Supports“) zu generieren. Sie dienen zur Stabilisierung des

Bauteils und zur Wärmeableitung. (Siehe Kapitel 3.3.2 Stützstrukturen). [19] Damit das Bauteil physisch gefertigt werden kann, müssen geometrische Informationen über die jeweilige Schichtdicke und Kontur der Schicht vorhanden sein. Der letzte Schritt der Datenaufbereitung ist somit das Erzeugen der einzelnen Schichten („Slicen“). [16]

3. *Generierung*: Die Generierung bzw. der Bauprozess findet in der SLM-Anlage statt.

Abbildung 3-4 beschreibt schematisch den Aufbau einer Anlage zum Selektiven Laserschmelzen.

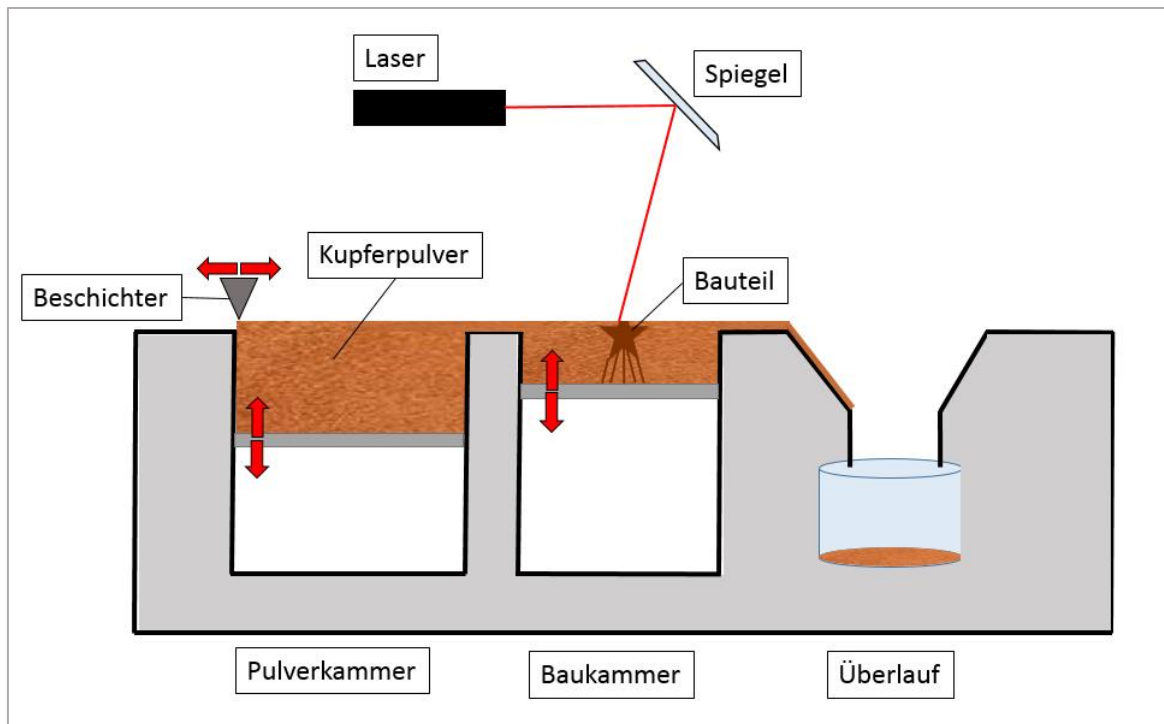


Abbildung 3-4 Schematische Darstellung einer SLM-Anlage

Der Bauprozess besteht aus einer sich wiederholenden Abfolge von Prozessschritten. Sie laufen ab bis alle Schichten des Bauteils generiert sind.

3.1. *Beschichten*: Beim Beschichten wird durch den Beschichter Pulver von der Pulverkammer zur Baukammer befördert. Hierbei entsteht eine dünne Schicht mit vorher definierter Schichtdicke.

3.2. *Belichten*: Durch den Laserstrahl wird das Pulver in den Bereichen aufgeschmolzen, welche das Bauteil bilden. Das aufgeschmolzene Pulver und die darunter angeschmolzene, bereits erstellte Schicht bilden einen Verbund.

3.3. Die Bauplatte in der Baukammer wird um eine Schichtdicke herabgefahren und die Pulverkammer wird hochgefahren um das Pulver für die nächste Schicht bereitzustellen.

4. *Bauteil entnehmen und nachfolgende Arbeiten:* Um das Bauteil aus der Baukammer entnehmen zu können, ist zunächst das nicht verschmolzene Pulver aus der Baukammer zu entfernen. Nach dem Entnehmen des Bauteils ist dieses zunächst von der Bauplatte zu lösen. Nachträgliche Arbeiten können das Entfernen von Überresten der Stützstrukturen oder das Aufbereiten des benutzten Pulvers sein.

3.3.2 Stützstrukturen

Stützstrukturen verbinden das, durch Selektives Laserschmelzen hergestellte, Bauteil mit der Bauplatte.

Stützstrukturen haben im Wesentlichen drei Aufgaben:

1. *Ablösung des Bauteils von der Bauplatte:* Über die Stützstrukturen ist das Bauteil mit der Bauplatte verbunden. Da diese im Normalfall weniger Fläche in Anspruch nehmen als das Bauteil und häufig aus einer Vielzahl einzelner Stützen bestehen, erleichtern sie die Ablösung von der Bauplatte. [19]
2. *Ausgleich der schlechten Stützwirkung des Pulvers:* Bei zu großen Überhängen der Bauteilgeometrie kann es, bedingt durch die schlechte Stützwirkung des Pulvers, zu Fehlern im Bauteilaufbau kommen. Die aufgeschmolzene Bauteilschicht fließt in diesem Fall in die darunterliegenden Pulverschichten. Stützstrukturen verhindern dies durch Abstützung. [20]
3. *Verringerung der Eigenspannung:* Durch Temperaturunterschiede zwischen der Laserstrahl-Stoff-Wechselwirkungsstelle und den angrenzenden bereits aufgeschmolzenen Bereichen kommt es beim Abkühlvorgang zu unterschiedlichen Schwindungen. Dies führt zu Eigenspannungen. [11] Das Resultat können ein Bauteilverzug oder das Ablösen einzelner Schichten, was zu einer Kollision mit dem Beschichter führen kann, sein. Eine solche Kollision kann zu Beschädigungen an Bauteil und Beschichter führen. In beiden Fällen weist das fertige Bauteil mit großer Wahrscheinlichkeit Defekte auf. [20] Entsprechend platzierte Stützstrukturen helfen die thermisch induzierten Spannungen aufzufangen und diese, durch das Ableiten der Temperatur zur Bauplatte, zu verringern. [11]

3.3.3 Parameter

Beim Selektiven Laserschmelzen spielen verschiedene Faktoren (Parameter) eine Rolle. Abbildung 3-5 gibt in Anlehnung an Richard et al. [1] einen kurzen Überblick über die Parameter.

SLM-Prozessparameter				
Laser	Belichtung	Pulver	Temperatur	weitere
Laserleistung	Scan- geschwindigkeit	Partikelgröße	Pulvertemperatur	Schutzgas- atmosphäre
Laserstrahl- durchmesser	Spurabstand	Partikelform	Temperatur- schwankungen	Oxidations- produkte
	Belichtungs- strategie	Schichtdicke		Verunrei- nigungen
		Material- eigenschaften		

Abbildung 3-5 Prozessparameter beim Selektiven Laserschmelzen

Bei den meisten SLM-Prozessen können nicht alle hier aufgezählten Parameter verändert werden. So ist eine Veränderung der Pulvertemperatur durch Vorheizen nur bei wenigen SLM-Anlagen möglich. Die für diese Arbeit wichtigsten Parameter sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Die Laserleistung beschreibt hierbei die Energie, die der Laser pro Zeitspanne aufbringen kann. Die Scangeschwindigkeit gibt an mit welcher Geschwindigkeit der Laser sich über das Pulver bewegt. Je schneller die Scangeschwindigkeit ist, desto schneller ist auch der Druckprozess abgeschlossen. Daher werden häufig hohe Scangeschwindigkeiten angestrebt. Da die Scangeschwindigkeit Auswirkungen auf die einbringbare Energie hat (siehe Kapitel 7.3), ist eine Erhöhung nur begrenzt möglich. Beim SLM-Prozess besteht eine Schicht aus sich überschneidenden Schmelzspuren. Die Breite der einzelnen Schmelzspuren wird als Schmelzspurbreite bezeichnet und ist abhängig von der Laserleistung, dem Laserfocus, der Scangeschwindigkeit und dem Material des Pulvers. Der Spurabstand ist der Abstand

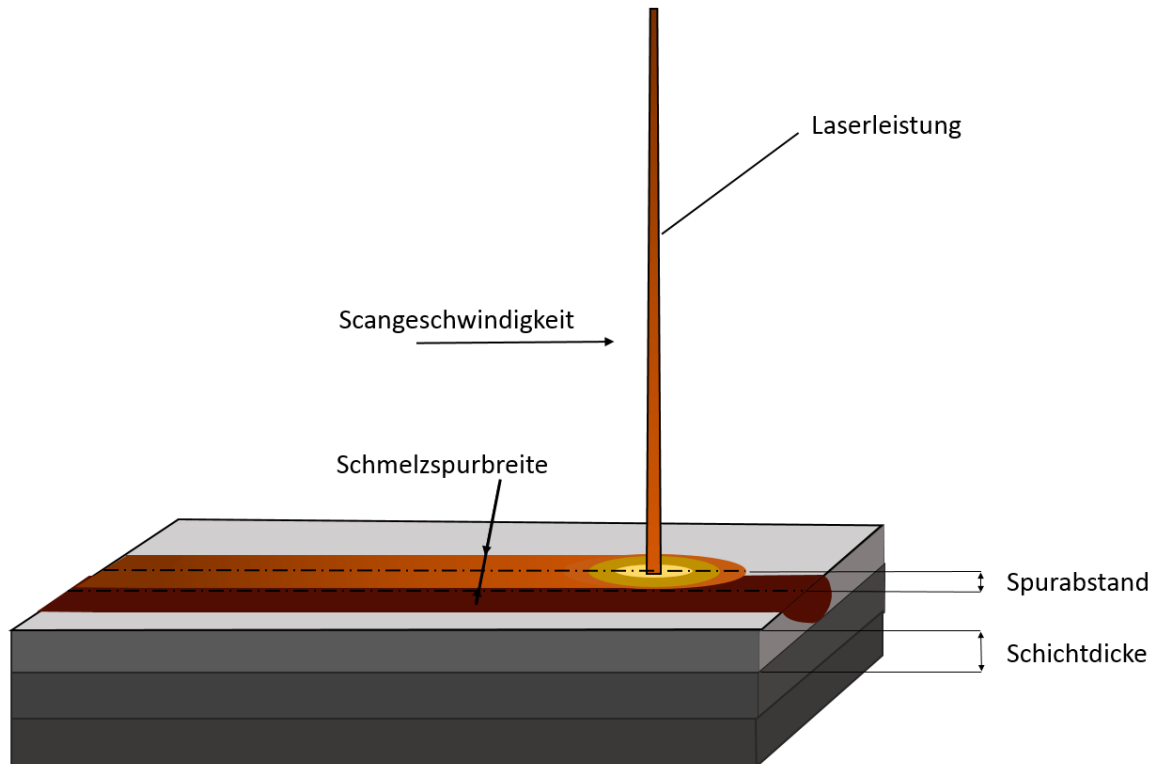


Abbildung 3-6 Prozessparameter

angrenzender Spuren voneinander. Er wird berechnet durch das Produkt aus Schmelzspurweite und einem Abstandsfaktor, welcher für Eisenlegierungen im Allgemeinen mit 0,7 angegeben ist. [2] [14]

4 Kupfer

Kupfer ist ein, im reinsten Zustand, gelbrot glänzendes Metall [21]. Es ist das älteste Gebrauchsmetall. So wurde es bereits in der mittleren Steinzeit (ca. 8000 v.Chr.) gefunden und verarbeitet, ab 6000 v. Chr. geschmolzen und ab 2000 v. Chr. aus sulfidischen und anderen Erzen verhüttet. [22] Die große Bedeutung von Kupfer liegt in seiner hohen Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme, seiner guten Kaltumformbarkeit und seiner guten Korrosionsbeständigkeit gegen Außenklima und Wasser. [23] Als technisch wichtigste Eigenschaft kann hiervon die elektrische Leitfähigkeit angesehen werden. [24] Da für diese Arbeit Kupferlegierungen nicht von Bedeutung sind, wird im Folgenden nur auf Reinkupfer eingegangen.

Im Folgenden werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Kupfer behandelt und erläutert.

4.1 Werkstoffkennwerte

Kupfer hat eine kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur und zählt mit einer Dichte von $8,93 \text{ g/cm}^3$ zu den Schwermetallen. Es hat einen Schmelzpunkt von 1083 °C und einen Siedepunkt von 2595 °C .

Kupfer ist sehr gut kaltumformbar. So besitzt Kupfer eine Zugfestigkeit von ca. 200 N/mm^2 , eine Dehngrenze von $40 - 80 \text{ N/mm}^2$ und eine Bruchdehnung von mehr als 45% . [23]

4.2 Chemische Eigenschaften

Aufgrund seines positiven Standardpotenzials von $E^\circ_{\text{Cu/Cu}^{2+}} = +0,35 \text{ V}$ weist Kupfer eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf. An Luft oxidiert es oberflächlich zu rotem Kupferoxid (Cu_2O). Durch Reaktionen mit der Umgebungsluft (O_2 , CO_2 , SO , H_2O) entsteht nach einiger Zeit an der Oberfläche eine grünliche Kupfer-Carbonat Schicht (Patina-Schicht). Sie ist festhaftend und dient als Schutz vor weiterer Zerstörung. [21]

4.3 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine physikalische Größe, welche die Fähigkeit eines Stoffes angibt, elektrischen Strom zu leiten. [25] Metalle weisen grundsätzlich eine relativ hohe

elektrische Leitfähigkeit auf. Diese ist auf geladene Teilchen zurückzuführen, welche sich frei durch das Kristallgitter der Metalle bewegen und durch elektrische Felder beschleunigt werden können. Die sich frei bewegenden Leitungselektronen bilden ein „Elektronengas“, welches die metallische Bindung bewirkt. Obwohl eine Beschleunigung der Elektronen durch ein elektrisches Feld realisierbar ist, ist dies nur eingeschränkt möglich. So sorgen Stöße mit den Ionen des Kristallgitters für Abbremsung, die zu einer viskosen Bewegung der Elektronen führt. In einem perfekten Kristallgitter würde dies bedeuten, dass die elektrische Leitfähigkeit nur durch Stöße mit den Ionenrümpfen des Kristalls begrenzt wird. Tatsächlich sind auch Streuungen der Elektronenwellen durch Gitterbaufehler und Fremdatome von Bedeutung. [26] Reines Kupfer besitzt nach Silber das beste elektrische Leitvermögen unter den Metallen, wobei dieses stark vom Reinheitsgrad des Kupfers abhängig ist. Bei hochreinem Kupfer (99,9998 %

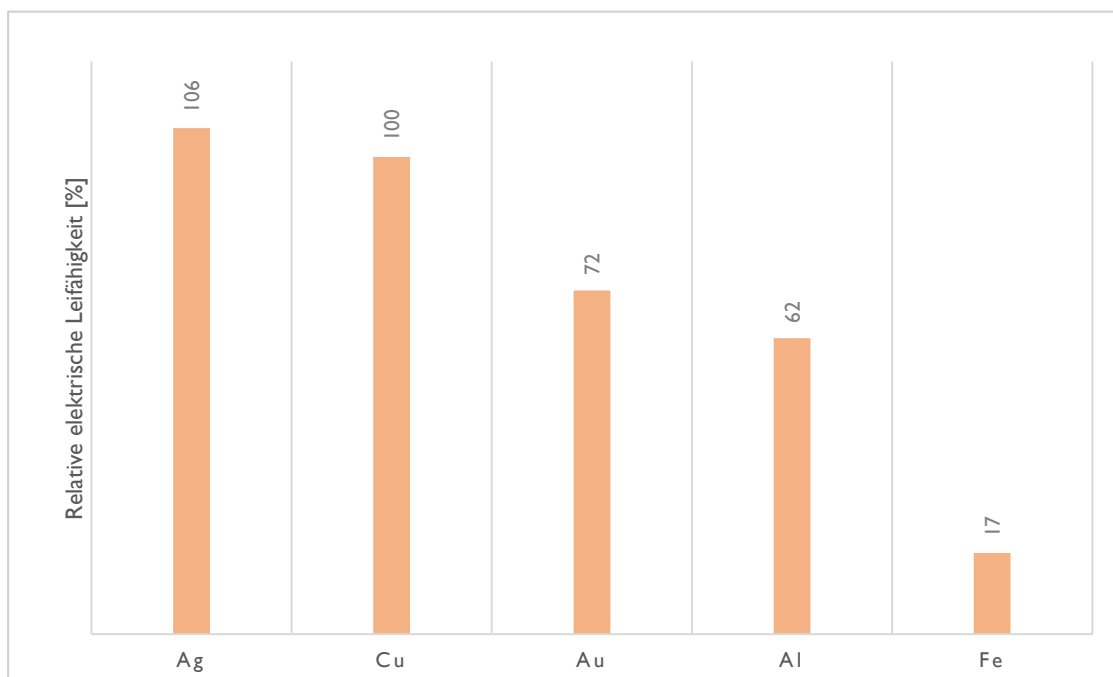


Abbildung 4-1 Vergleich einiger Leitwerkstoffe für elektrischen Strom. Relative Werte für Reinetalle, Cu = 100 gesetzt (In Anlehnung an [23])

Cu) kann die Leitfähigkeit nahezu $60 \text{ m}/(\Omega \times \text{mm}^2)$ betragen. Bei Kupfer mit 99,5 % Kupferanteil ist die Leitfähigkeit bei 20 °C mit $57 \text{ m}/(\Omega \times \text{mm}^2)$ angegeben. Wie hoch das elektrische Leitvermögen im Vergleich zu anderen Metallen ist, kann Abbildung 4-1 entnommen werden. [23]

Wie groß der Einfluss der einzelnen Elemente auf die elektrische Leitfähigkeit ist, zeigt Abbildung 4-2. Die Abhängigkeit vom Reinheitsgrad ist damit zu erklären, dass in festem

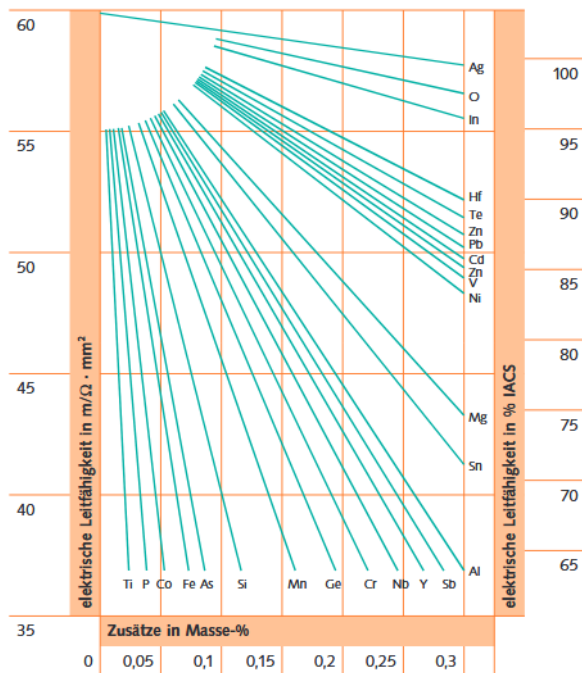


Abbildung 4-2 Einfluss von Zusätzen auf die elektrische Leitfähigkeit [49]

Kupfer lösliche Stoffe (Mischkristallbildung) Störpotentiale bilden und damit die Bewegung der Elektronen behindern. Stoffe, welche sich im festen Zustand nicht in Kupfer lösen, wie zum Beispiel Sauerstoff, haben kaum Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit. [24]

5 Selektives Laserschmelzen von Kupfer

Das Selektive Laserschmelzen von Kupfer ist mit den auf dem Markt vertretenen SLM-Anlagen nur sehr bedingt möglich. Grund hierfür ist, dass nicht genug Energie in den Werkstoff eingebracht werden kann. Der Prozess wird im Wesentlichen durch die folgenden Werkstoffeigenschaften bestimmt: [2]

- Wärmeleitfähigkeit
- Sauerstoffgehalt
- Absorption von Laserstrahlung

Im Folgenden werden die Materialeigenschaften in Hinblick auf den SLM-Prozess betrachtet. Da zum Selektiven Laserschmelzen von Kupfer nur sehr wenige Studien vorhanden sind, werden auch die beim Laserschweißen von Kupfer relevanten Einflüsse behandelt.

5.1 Wärmeleitfähigkeit

Für Metalle sind die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit nahezu proportional. [24] Grund hierfür ist, dass die Leitungselektronen außer Ladung auch Energie transportieren und damit den größten Teil der Wärmeleitfähigkeit eines Metalls ausmachen. Beschrieben wird der Sachverhalt durch das Wiedemann-Franz-Gesetz

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T \quad \text{Formel 5.1}$$

nach welchem das Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit σ zu der Wärmeleitfähigkeit λ proportional zur absoluten Temperatur T und einer allgemeinen Proportionalitätskonstante, der Lorenz-Zahl L ist. [26] Da Kupfer, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweist, ist die Wärmeleitfähigkeit mit dieser vergleichbar. Wie ähnlich die relativen Werte für thermische und elektrische Leitfähigkeit sind, ist in Abbildung 5-1 zu erkennen. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer hängt maßgeblich von der Homogenität des Gefüges ab und wird durch Gitterdefekte oder Verunreinigungen maßgeblich reduziert. [2] Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer führt beim SLM-Prozess dazu, dass die eingebrachte Energie, in Form von Wärmeenergie, schnell durch das angrenzende Material abgeführt wird.

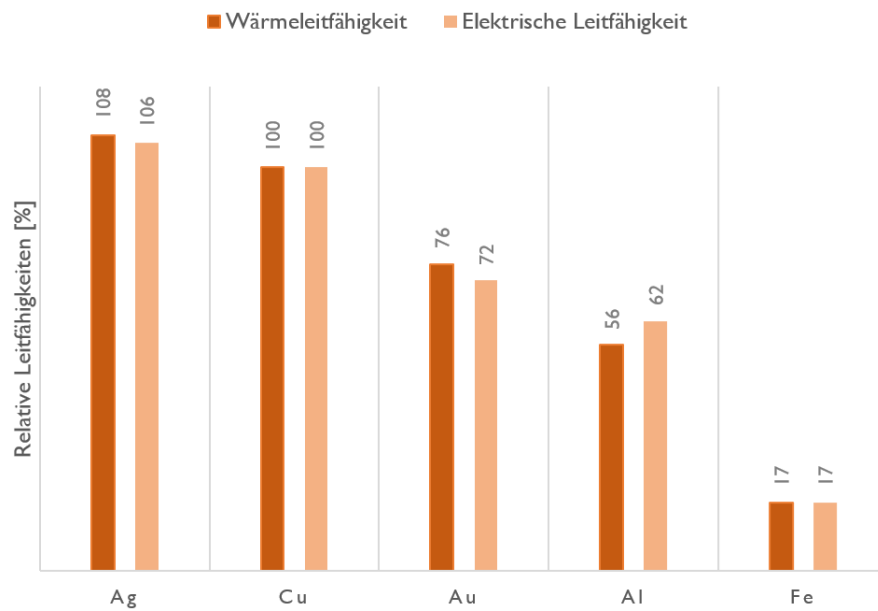


Abbildung 5-1 Vergleich einiger Leitwerkstoffe für Wärme und elektrischen Strom. Relative Werte für Reinelemente, Cu = 100 gesetzt (In Anlehnung an [23])

In Abbildung 4-2 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Elemente und Legierungen bei 300 K aufgezeigt und in bereits mit SLM verarbeitete und noch nicht durch SLM verarbeitete Elemente beziehungsweise Legierungen unterteilt. Kupfer ist farblich hervorgehoben. Erkennbar

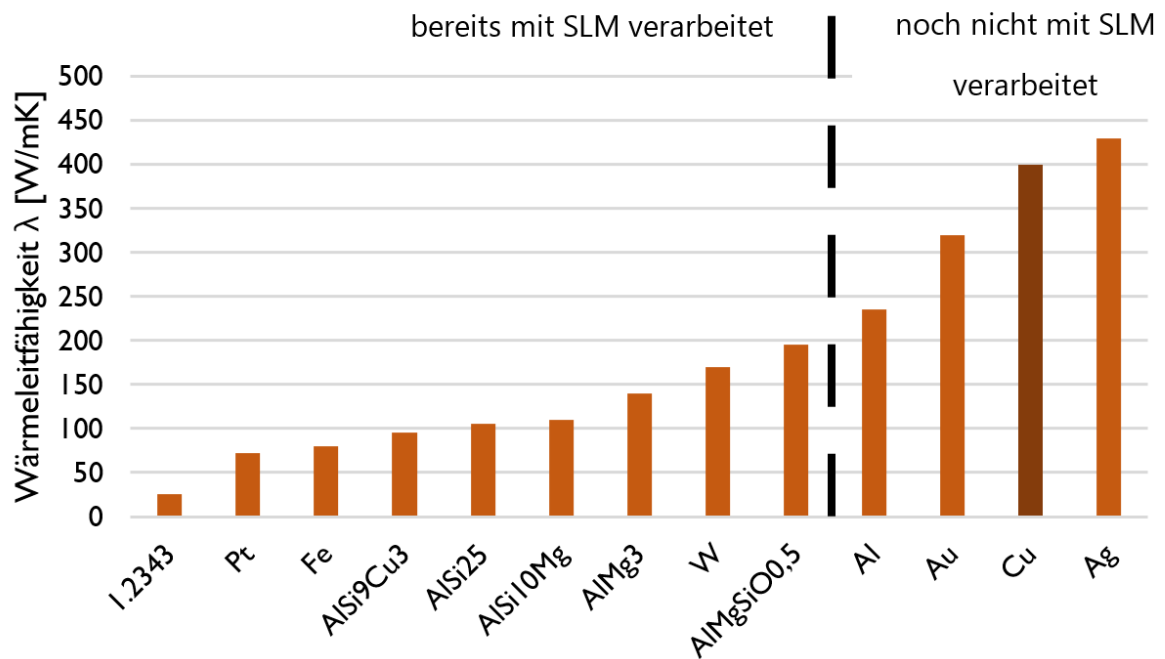


Abbildung 5-2 Wärmeleitfähigkeit von bereits verarbeiteten und noch nicht verarbeiteten Elementen und Legierungen bei 300 K (In Anlehnung an [2])

ist, dass alle bereits mit SLM zu dichten Bauteilen verarbeiteten Materialien eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit haben als Aluminium, welches selber eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit als Kupfer aufweist. [2]

Die Wärmeleitfähigkeit eines Werkstoffes ist somit einer der limitierenden Faktoren beim SLM-Prozess. Grund hierfür ist die Ableitung der Wärmeenergie aus dem Schmelzbereich und somit die fehlende Energie um die Schmelze zu erzeugen bzw. das Schmelzbad aufrechtzuerhalten.

5.2 Sauerstoffgehalt

Flüssiges Kupfer besitzt eine hohe Löslichkeit für Sauerstoff und bildet die stabilen Kupferoxide Cu_2O und CuO . Die Sauerstofflöslichkeit von Kupfer bei Raumtemperatur ist hingegen sehr gering, wodurch Kupfer und Cu_2O als eutektisches System vorliegen. Normalerweise wird beim Abkühlen einer sauerstoffhaltigen Schmelze das spröde Eutektikum durch die Rekristallisation während der Warmformgebung zerkleinert und neu verteilt. Bei Schweißprozessen, bei denen Temperaturen oberhalb von 1065 °C erreicht werden, schmelzen die eutektischen Reste allerdings in den Wärmeeinflusszonen erneut und sammeln sich an den Korngrenzen. So entsteht eine sehr spröde Korngrenzsubstanz. [27] Diese Versprödung führt zu einer Reduzierung der Zähigkeit.

Außerdem kann Wasserstoff die Festigkeit bei sauerstoffhaltigen Kupferwerkstoffen herabsetzen, indem er das im Kupfer enthaltene Kupferoxid zu Kupfer reduziert. Die Reaktionsgleichung ist in Formel 5.2 abgebildet. [2]



Das bei der Reaktion entstehende Wasser, in Form von Wasserdampf, kann in Metallen, aufgrund der Molekülgrößen, praktisch nicht diffundieren und sprengt das Gefüge. [23]

5.3 Absorption von Laserstrahlung

Die Laserstrahlung wird beim SLM-Prozess anteilig reflektiert (R), absorbiert (A) und transmittiert (τ), siehe Formel 5.3. [2] Dies ist, bei konstanter Wellenlänge und Temperatur, abhängig von dem jeweiligen Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Materials. [14]

$$1 = R + A + \tau \quad \text{Formel 5.3}$$

Die Laserleistung, welche vom Werkstoff absorbiert wird und somit für das Aufschmelzen zur Verfügung steht wird als effektive Laserleistung P_{eff} bezeichnet. Sie berechnet sich als Produkt des Absorptionsgrades A und der eingestrahlt Laserleistung P_L , siehe Formel 5.4. [2]

$$P_{\text{eff}} = A + P_L \quad \text{Formel 5.4}$$

Der Absorptionsgrad beschreibt den Energieanteil, welcher von der bestrahlten Oberfläche aufgenommen wird und im Fall eines SLM-Prozesses für das Aufschmelzen zur Verfügung steht. Er ist abhängig von der Temperatur, dem Material, der Oberflächenbeschaffenheit, der Wellenlänge der Strahlung und dem Eintrittswinkel. In Abbildung 5-3 sind die Absorptionsgrade verschiedener Metalle bei 1063 nm Wellenlänge und einem senkrechten Strahleinfall dargestellt. Silber absorbiert bei dieser Wellenlänge von allen Metallen mit 1 % den geringsten Anteil der Strahlung. Kupfer folgt mit 1,4 %. Wesentlich größere Absorptionsgrade weisen zum Beispiel Stahl mit 60 % oder Wolfram mit 42 % auf. [2]

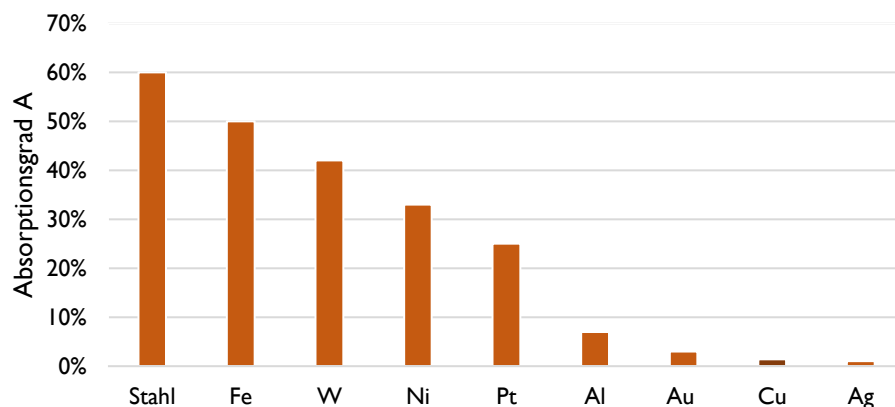


Abbildung 5-3 Absorptionsgrade verschiedener Metalle bei 1063 nm und senkrechtem Strahleinfall (In Anlehnung an [2])

Während die Absorptionsgrade von Kupfer unter den beschriebenen Bedingungen bekannt sind, ist der Absorptionsgrad für die meisten im SLM-Prozess vorhandenen Bedingungen unbekannt. Daher wurden von Becker [2] die Absorptionsgrade bei einer Wellenlänge von 1030 – 1080 nm in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit sowohl in der festen, als auch

in der flüssigen Phase untersucht. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden im weiteren Verlauf vorgestellt: [2]

Wellenlänge: Mit steigender Wellenlänge sinkt der Absorptionsgrad. Dieser Zusammenhang ist bei allen Metallen gleich. So ist die Absorption im sichtbaren Bereich von zum Beispiel 515 nm Wellenlänge deutlich höher als bei der von herkömmlichen SLM-Anlagen verwendeten Wellenlänge von ca. 1064 nm, siehe Abbildung 5-4. Dieser Zusammenhang wird beim

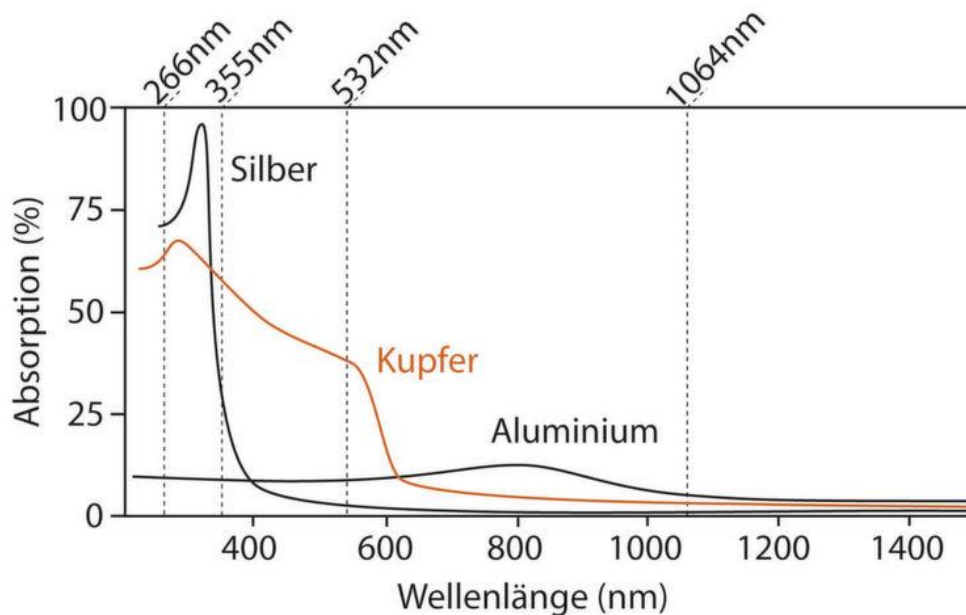


Abbildung 5-4 Absorptionsgrad von Silber, Aluminium und Kupfer (in orange) [28]

Schweißen von Kupfer beachtet, indem kurzwelligere Strahlung genutzt wird um stabilere Schmelzprozesse zu erzeugen. Da die Laser im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich (515 nm) noch relativ kleine Laserleistungen von weniger als 200 W aufweisen, wird im Dauerbetrieb eine Kombination der beiden Strahlenquellen vorgenommen. Dabei wird mit einem grünen Laser die Stelle erwärmt und mit einem leistungsstärkeren roten Laser (1064 nm) verschweißt. Das Vorgehen führt zu einer Erhöhung der Prozesssicherheit und einer Reduzierung der Schweißnahtbreite bei gleichbleibender Tiefe. [2]

Oberflächenbeschaffenheit: Wie groß der Einfluss verschiedener Oberflächenbeschaffenheiten ist, ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Absorptionsgrad von einer entoxidierten Oberfläche und der Absorptionsgrad der Oberfläche zu Lieferzeitpunkt (Lagerdauer und Lagerbedingungen unbekannt) um nahezu den Faktor sechs unterscheiden. Daraus lässt sich schließen, dass Oxidation den Absorptionsgrad signifikant steigert. Diese

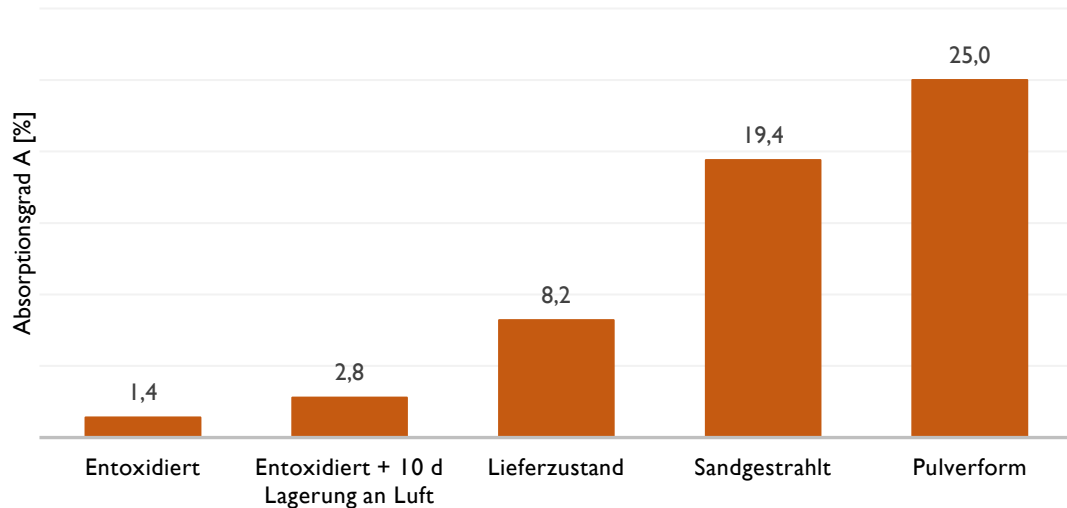


Abbildung 5-5 Absorptionsgrad von Kupfer bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten bei einer Wellenlänge von 1064 nm (In Anlehnung an [2])

These wird ebenfalls durch eine Erhöhung des Absorptionsgrades durch Lagerung an Luft gestützt. Durch Vergrößerung der Rauheit bzw. Oberfläche durch Sandstrahlen kann der Absorptionsgrad ebenfalls erhöht werden. [2] Die Erhöhung der Absorption in Pulverform ist ebenfalls auf eine Erhöhung der Oberfläche und das mehrfache Reflektieren der Laserstrahlung im Pulver zurückzuführen.

Absorption in der Schmelze: Nach Drude steigt bei Kupfer der Absorptionsgrad mit steigender Temperatur linear und beim Übergang in die flüssige Phase sprunghaft an. Hierbei springt der Wert von ca. 3 % auf ca. 6 %. Danach geht mit einer Erwärmung von 100 K eine Erhöhung des Absorptionsgrades von 0,3 % einher. Die Werte nach Drude sind rein theoretisch ermittelt, wurden aber durch experimentelle Untersuchungen unterstützt. Der Absorptionsgrad für flüssiges Kupfer wird mit 6,7 % angegeben. Er liegt somit deutlich über dem Absorptionsgrad einer entoxidierten Oberfläche und deutlich unter dem Absorptionsgrad des Metalls in Pulverform. [2]

Auf Grundlage dieser Fakten stellt Becker Vermutungen dazu an, wie die Absorption während des SLM-Prozesses abläuft. So beschreibt er bei der Absorption den in Abbildung 5-6 dargestellten Zyklus. Die Absorption durch das Pulver stellt die Startbedingung dar. Mit einem

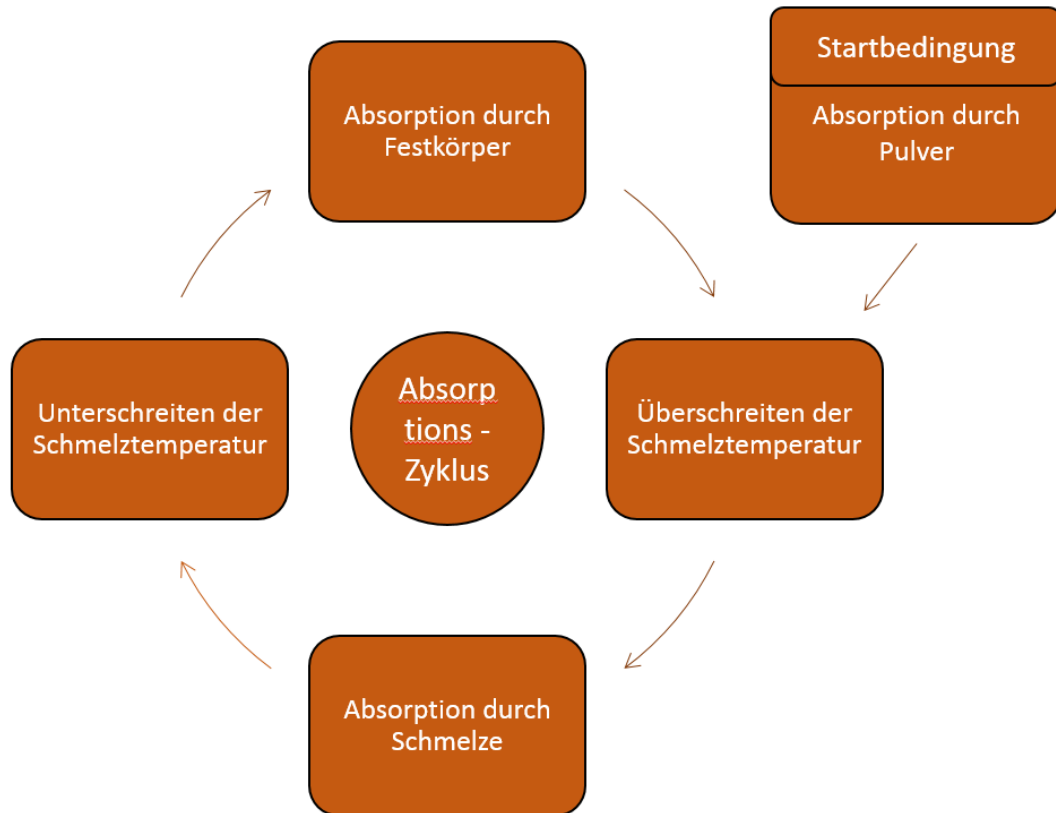


Abbildung 5-6 Zyklus bei der Absorption der Laserstrahlung beim SLM – Prozess (In Anlehnung an [2])

Absorptionsgrad von 25 % wird genug Energie vom Pulver absorbiert, damit die Schmelztemperatur überschritten wird. Aufgrund des kleinen Absorptionsgrades der Schmelze (6,7 %) reicht die effektive Laserleistung nun nicht mehr aus um weiteres Aufschmelzen, bzw. ein Aufrechterhalten der Schmelze zu gewährleisten. Die Schmelztemperatur wird daraufhin unterschritten und die Laserstrahlung auf dem noch nicht geschmolzenem Festkörper oder einer sich gebildeten Oxidschicht auf der Schmelze absorbiert. Der Zyklus pendelt sich bei bewegtem Laserstrahl als quasistationärer Zustand ein. [2] Die sich bildende Kupfer- bzw. Oxidschicht muss eine höhere Absorption aufweisen als die Schmelze, damit der Zyklus ablaufen kann.

Die verschiedenen Absorptionsgrade der Aggregatzustände wirken sich außerdem auch auf die Auswahl der optimalen Scangeschwindigkeit aus. So läuft der Laserstrahl bei steigender Scangeschwindigkeit dem Schmelzbad voraus. Das führt zu einer Erhöhung des Anteils der Absorption im Pulver, siehe Abbildung 5-7. [2]

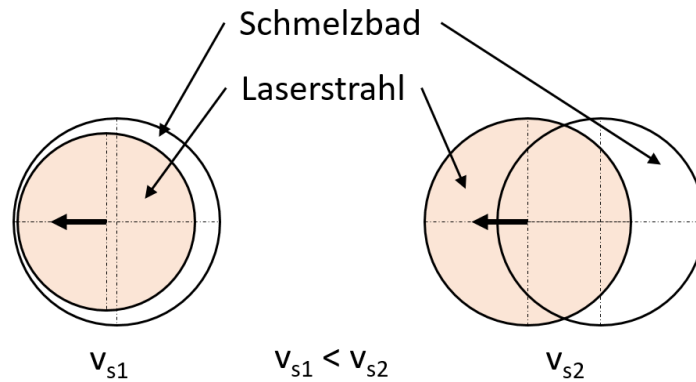


Abbildung 5-7 Abhängigkeit des Überdeckungsgrades des Laserstrahls mit der Schmelze von der Scangeschwindigkeit

Da die Absorptionsrate im Pulver deutlich höher ist als in der Schmelze, ist mit steigender Scangeschwindigkeit also eine Erhöhung der effektiven Laserleistung und somit eine Erhöhung der zu erwartenden Dichte verbunden. Bei einer weiteren Erhöhung der Scangeschwindigkeit wird letztendlich die Volumenenergie zu gering werden, was zu einer Verringerung der Dichte führen würde. [2]

Zusammenfassend sind die geringe Laserabsorption und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die wesentlichen Faktoren, welche das Selektive Laserschmelzen von Kupfer einschränken. Sie erschweren eine Einbringung der Laserenergie in den Schmelzprozess.

6 Verwendete Methoden und Mittel

Im Folgenden wird auf die für diese Arbeit genutzten Geräte, Messmittel und Messmethoden eingegangen.

6.1 SLM-Anlage

Bei der genutzten SLM-Anlage handelt es sich um die „Concept Laser Mlab cusing R“. Die Anlage ist in Abbildung 6-1 dargestellt.



Abbildung 6-1 „Mlab cusing R“ und Handhabungsstation [29]

Zu der Anlage gehört eine Handhabungsstation, welche mit Schutzgas durchströmt und an die Anlage angedockt werden kann. Hierdurch können auch Materialwechsel und die Bauteilentnahme in einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden.

Für die Anlage werden folgende Daten vom Hersteller angegeben: [30]

Bauraum:	90 mm x 90 mm x 80 mm (x,y,z)
Schichtdicken:	20 – 50 μm
Laser:	Yb-Faserlaser (diodengepumpt)
Max. Laserleistung:	100 W
Scangeschwindigkeit:	bis 7 m/s

6.2 Lichtmikroskop

Die zur lichtmikroskopischen Gefügeanalyse benötigten Präparationsschritte bestehen aus Probenentnahme, Schleifen, Polieren und gegebenenfalls Ätzen der Proben. Durch das Warmeinbetten der Proben in Epoxidharz wird eine bessere Handhabung bei den anschließenden Prozessen erreicht. Sehr kleine Proben sind erst durch die Einbettung bearbeitbar. [31]

Im Gegensatz zu lichtdurchlässigen Präparaten (zum Beispiel Zellgewebe), müssen lichtundurchlässige Metallschliffe im Auflicht betrachtet werden. Hierbei fällt das Licht einer Lichtquelle durch das Objektiv, wird reflektiert und gelangt zurück durch das Objektiv zu den beiden Okularen, welche eine Betrachtung mit beiden Augen ermöglicht. Bei digitalen Lichtmikroskopen erfolgt die Bildgebung über einen Bildschirm. Übliche Vergrößerungen liegen zwischen 50 : 1 und 1000 : 1. [3] Lichtmikroskopische Untersuchungen werden normalerweise an geschliffenen, polierten und geätzten Proben eines Werkstoffs durchgeführt. [31]

Das in dieser Arbeit verwendete digitale Lichtmikroskop ist das „VHX-2000“ von Keyence.

6.3 Analysenwaage

Für die Bestimmung von Massen wird die Analysenwaage „A 200 S“ von Sartorius genutzt. Sie hat eine Auflösung von bis zu 0,1 mg.

6.4 Rasterelektronenmikroskop

Bei einem Rasterelektronenmikroskop (REM) wird ein fokussierter Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche gerichtet, wo er Sekundär- bzw. Rückstreuielektronen erzeugt, welche wiederum vom REM erfasst werden können. Das Verfahren hat, mit 100 : 1 bis 500.000 : 1, einen deutlich größeren Vergrößerungsbereich als ein Lichtmikroskop. Es kann außerdem zur Bestimmung von Zusammensetzungen und Kristallorientierungen mit Zusatzkomponenten wie einem energiedispersiven Röntgenspektrometer ausgestattet werden. [32]

In dieser Arbeit wird das Rasterelektronenmikroskop „Phenom Pro X“ genutzt, was einen Vergrößerungsbereich von 80 : 1 bis 130.000 : 1 aufweist. [33]

6.5 Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) kann die chemische Zusammensetzung einer Probe bestimmt werden. Im Rasterelektronenmikroskop wird die Probe mit einem energiereichen Elektronenstrahl „beschossen“. Hierbei wird Röntgenstrahlung frei, welche durch ein Röntgenspektrometer detektiert wird. Die Emission von Röntgenstrahlung ist die Folge einer Umordnung in der Elektronenhülle eines Atoms. Durch den Elektronenstrahl wird eines der Elektronen aus einer der inneren Elektronenschalen, beispielsweise der K-Schale, herausgeschlagen. Da der Zustand energetisch nicht stabil ist, geht eines der Elektronen auf einer äußeren Schale in die innere Vakanz über. Dieser Übergang ist mit einem Energiegewinn verbunden, welcher als Röntgenstrahlung emittiert oder an ein anderes Elektron (Auger-Elektron) übertragen wird. Die Emission dieser Röntgenstrahlung ist für alle Elemente verschieden und wird als charakteristische Röntgenstrahlung bezeichnet. Auger-Elektronen sind mit einem Röntgenspektrometer nicht nachweisbar. Wie wahrscheinlich es ist, dass Röntgenstrahlung und nicht Auger-Elektronen emittiert werden, hängt stark von der Ordnungszahl des Elementes ab. Es gilt: Je leichter das Element, desto höher die Wahrscheinlichkeit der Emission eines Auger-Elektrons. Daraus folgt, dass leichte Elemente, wie zum Beispiel Wasserstoff oder Sauerstoff, mit Hilfe der Röntgenspektroskopie am REM nur schwer genau bestimmt werden können. [34]

6.6 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren zur Bestimmung von Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze. Es handelt sich um ein zerstörendes Prüfverfahren, da die Probe über die Streckgrenze hinaus belastet wird. Proben mit bekannter Querschnittsfläche werden beim Zugversuch bis zum Bruch gleichmäßig gedehnt, wobei Dehnung und Weg gleichmäßig gesteigert werden. Während des Zugversuchs werden die Kraft F und die Längenänderung kontinuierlich gemessen. Aus der gemessenen Kraft und der Querschnittsfläche S_0 der Probe kann die Nennspannung σ_n berechnet werden: [35]

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad \text{Formel 6.1}$$

Für diese Arbeit wird eine Prüfmaschine von Zwick Roell genutzt.

6.7 Hydrostatische Waage

Eine hydrostatische Waage nutzt das archimedische Prinzip, um das Volumen eines Körpers zu bestimmen. Nach dem archimedischen Prinzip wird durch einen in eine Flüssigkeit eingetauchten Körper eine senkrecht nach oben gerichtete Kraft (Auftrieb) erzeugt. Die Größe der Kraft entspricht der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit. Der Körper verliert so viel an Gewichtskraft, wie das verdrängte Flüssigkeitsvolumen besitzt.

Um die Dichte eines Körpers festzustellen, wird die Masse des Körpers zunächst an der Luft und dann in der Flüssigkeit bestimmt. Als Flüssigkeit bietet sich Wasser an, da die Dichte ein Gramm pro Kubikzentimeter beträgt. Danach werden die beiden gemessenen Massen voneinander subtrahiert. Durch den Massenunterschied und der bekannten Dichte der Flüssigkeit lässt sich das Volumen des Körpers bestimmen. Da auch die Masse des Körpers bekannt ist, ist die Dichte des Körpers bestimmbar. [36]

Für diese Arbeit wird eine Waage nach dem archimedischen Prinzip entworfen und getestet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt.

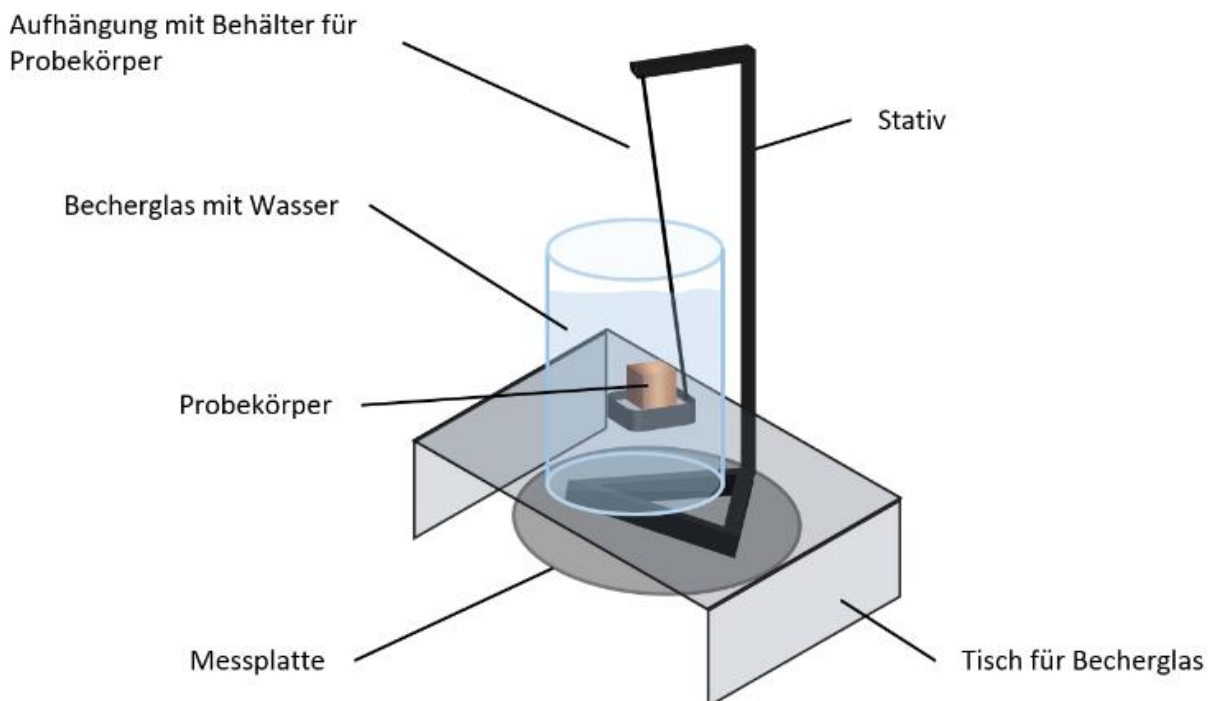


Abbildung 6-2 Schematische Darstellung hydrostatische Waage

Der „Tisch“ trennt das Becherglas von der Messplatte, sodass nur das durch den Auftrieb leichtere Gewicht des Probekörpers in der Flüssigkeit gemessen wird. Mit Hilfe eines Körpers mit bekanntem Volumen wird die Messgenauigkeit des Verfahrens bestimmt. Dazu werden 20 Messungen durchgeführt und daraufhin das durchschnittlich gemessene Volumen mit dem tatsächlichen Volumen des Körpers verglichen. Hierbei werden eine Messabweichung von ca. zwei Prozent zum tatsächlichen Volumen und eine Standardabweichung der Messungen von 0,07 Prozent festgestellt. Die Abweichung kann durch Ungenauigkeiten im Messprozess entstehen. So wird zum Beispiel die Temperatur des Wassers nicht beachtet. Unter Berücksichtigung der Messabweichung ist die Messgenauigkeit der hydrostatischen Waage als für diese Arbeit ausreichend einzuschätzen.

7 Vorgehen

7.1 Pulverauswahl

Bei den für den SLM-Prozess etablierten Materialien, wie verschiedene Edelstähle (1.4404, 1.2709, etc.) oder Aluminiumlegierungen (AlSi12, AlSi10Mg, etc.), gibt es eine Vielzahl von Anbietern, die für den SLM-Prozess optimierte Pulver anbieten. Häufig werden diese Pulver von den SLM-Anlagen-Herstellern mit passenden Parametersätzen vermarktet. [37] Da das Selektive Laserschmelzen von Kupfer, aufgrund der Herausforderungen im Prozess (siehe Kapitel 5) außerhalb der Forschung zum jetzigen Zeitpunkt keine Anwendung findet, gibt es kein für den SLM-Prozess vorgesehenes Pulver auf dem Markt. Im Folgenden wird der Prozess der Pulverauswahl beschrieben. Hierfür werden zunächst die Faktoren behandelt, welche bei der Entscheidung ins Gewicht fallen.

Die Parameter, welche sich rein durch die Auswahl des Pulvers beeinflussen lassen, sind die Korngröße und die Morphologie der Körner. Um zu verstehen, wie die Morphologie des Pulvers zustande kommt, ist der Herstellungsprozess zu betrachten.

Die am weitesten verbreitete Methode zu Herstellung von Kupferpulver ist die Verdüsung einer Schmelze durch Wasser oder Gas. [5] Der Prozess ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

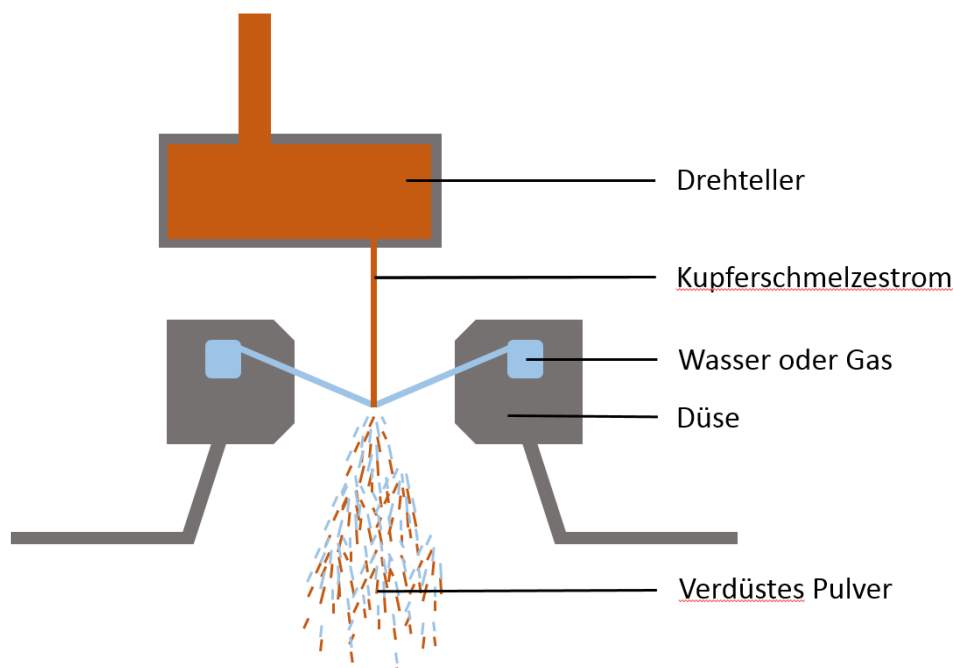


Abbildung 7-1 Verdüungsverfahren

Die Schmelze wird hierbei durch einen Gas- oder Wasserstrom zerstäubt. Ob eine Schmelze mit Gas oder Wasser verdüst wird, ist abhängig davon welche Morphologie der Körner erwünscht ist. Bei einer Verdüsung durch Wasser wird die Schmelze schnell abgekühlt. Die Pulverteilchen erstarren bevor sie eine sphärische Form erreicht haben und haben daher eine undefinierte Morphologie. [5] Bei einer Verdüsung durch Gas kühlt die Schmelze, aufgrund der geringen Wärmekapazität der Gase, deutlich langsamer ab. Das Ergebnis sind sphärisch

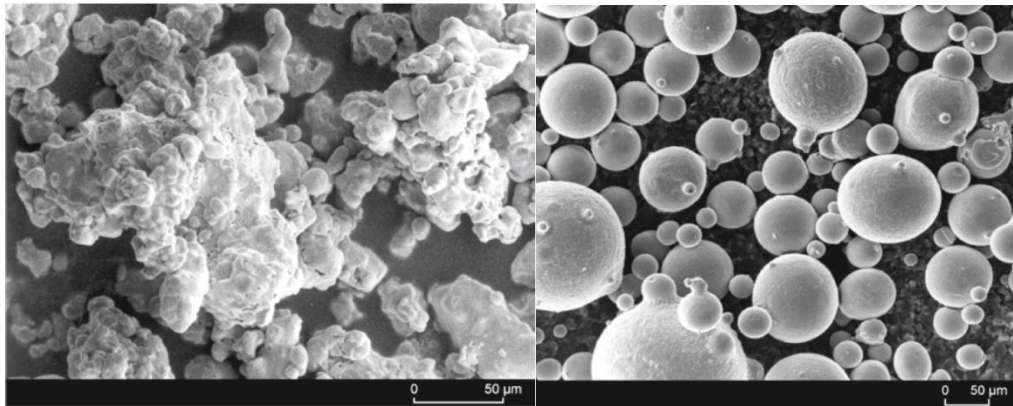


Abbildung 7-2 Wasserverdüstes (links) und Gasverdüstes Pulver (rechts) [38]

geformte Körner. Die unterschiedliche Morphologie ist in Abbildung 7-2 dargestellt. Durch die kurze Einwirkdauer sollen Gase und Metall bis zum Erkalten nicht miteinander reagieren. Hierdurch entstehen sehr sauerstoffarme Pulver, welche nicht mit Feuchtigkeit oder Luftsauerstoff in Kontakt kommen dürfen. [38] Als Zerstäubungsgase werden Mischungen aus Wasserstoff, Stickstoff oder Inertgasen, wie zum Beispiel Argon, genutzt. [5]

Die Morphologie wirkt sich bei Pulver vor allem auf die Schüttdichten und das Fließverhalten aus. So hat das undefinierte Pulver eine sehr niedrige Schüttdichte und ein schlechtes Fließverhalten. Es eignet sich aufgrund seiner Form allerdings gut für traditionelle Sinterprozesse, da bei einer Verdichtung unter Druck durch mechanische Verhakungen, aufgrund der plastischen Verformungen, der Zusammenhalt des Presslings erhöht wird. Beim Selektiven Laserschmelzen ist die bevorzugte Morphologie allerdings die sphärische. Die sphärische Form ermöglicht eine hohe Schüttdichte und ein gutes Fließverhalten. [38] Das gute Fließverhalten ist wichtig, damit der Beschichter die einzelnen Schichten gleichmäßig auftragen kann. Die Schüttdichte ist eine Kenngröße zur Bestimmung des Füllraumes, also wie viel Volumen Pulver für den SLM-Prozess notwendig sind. [5] Da die Pulverkammer in der in dieser Arbeit genutzten SLM-Maschine ein relativ geringes Volumen aufweist, führt eine niedrige

Schüttdichte des Pulvers zu Einschränkungen, da effektiv weniger Material zur Verfügung steht. Für diese Arbeit ist somit Pulver mit sphärischer Morphologie zu nutzen.

Neben der Morphologie ist auch die Korngröße von Bedeutung. Sie hat ebenfalls Auswirkungen auf die Schüttdichte des Pulvers. Hierbei gilt, je kleiner die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung, desto größer die Schüttdichte. [5] Außerdem beeinflusst die Korngrößenverteilung die minimal erzeugbare Schichtdicke. So ist es schwer bis nicht möglich

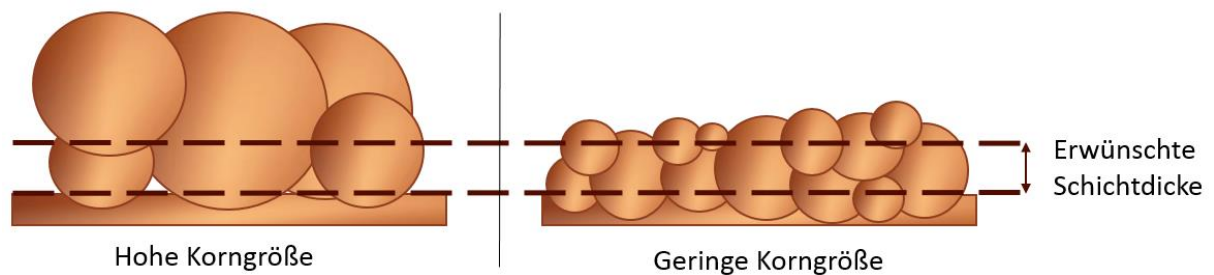


Abbildung 7-3 Zusammenhang zwischen Korngröße und möglicher Schichtdicke

eine Schicht zu erzeugen, welche deutlich unter dem durchschnittlichen Durchmesser der Körner liegt. Begründet ist dies dadurch, dass durch ein Aufschmelzen der verhältnismäßig großen Körner zu viel Material vorhanden ist um eine niedrige Schichtdicke zu erzeugen. Der Zusammenhang ist in Abbildung 7-3 verdeutlicht dargestellt. Die erwünschte Schichtdicke ist schwer mit der hohen Korngröße zu erreichen, sehr leicht aber mit der geringen Korngröße. Somit ist ein Pulver zu wählen, welches eine sphärische Morphologie und eine kleine Korngröße besitzt. Die erwünschte Schichtdicke beträgt 25 μm (siehe Kapitel 0).

Aufgrund der Anforderungen von hohem Reinheitsgrad, geringer Korngröße und sphärischer Morphologie wird sich für das ROGAL Kupferpulver GK 0/50 von Schlenk entschieden. Die Eigenschaften von ROGAL Kupferpulver GK sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Kupfergehalt	Morphologie	Siebanalyse	Füllichte	Anwendungsgebiete
> 99 %	Sphärisch	Max. 5 % > 50 $[\mu\text{m}]$	4,4 – 5,0 $[\text{g}/\text{cm}^3]$	Pulvermetallurgie, Sintertechnik Löt- und Verbindungstechnik

Tabelle 7-1 ROGAL Kupferpulver GK – kugelig [39]

Das Pulver wird in einem luftdichten Behälter (Fass mit Deckel) geliefert, in welchem es noch einmal verpackt ist (Plastiktüte mit Kabelbinder verschlossen). Das Pulver nimmt nur einen kleinen Teil des Volumens des äußeren Behälters ein und die innere Verpackung kann nicht als vollkommen luftundurchlässig bewertet werden.

7.2 Untersuchung des Pulvers

Um die Aussagefähigkeit der späteren Ergebnisse gewährleisten zu können, ist zunächst eine Untersuchung des gelieferten ROGAL Kupferpulvers GK durchzuführen. Hierfür sind sowohl die Bestimmung der Morphologie, der Kornfraktion als auch eine Bestimmung der Zusammensetzung des Kupferpulvers notwendig.

Zunächst ist die Morphologie des Pulvers zu beurteilen. Dafür wird das Pulver mit einem Rasterelektronenmikroskop (siehe Kapitel 6.4) untersucht. Ein Ausschnitt des betrachteten Pulvers ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Die hauptsächlich vorliegende Morphologie des

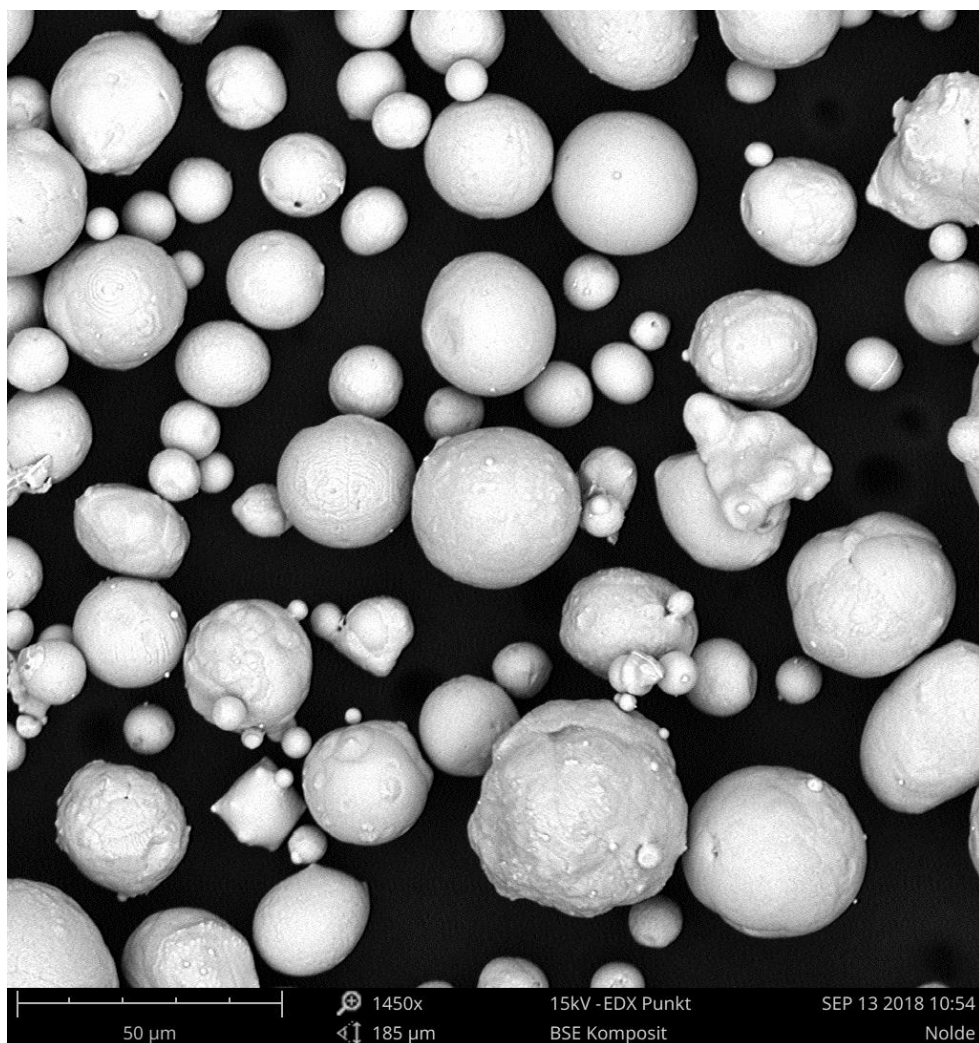


Abbildung 7-4 Kupferpulver - 1450fache Vergrößerung

Pulvers ist die sphärische. Vereinzelt sind Satelliten an der Oberfläche einzelner Körner zu erkennen und einige wenige Körner weisen eine von der sphärischen abweichende Morphologie auf. Das Auftreten von Satelliten auf der Oberfläche größerer Körner lässt sich beim Verdünnungsprozess schwer unterbinden und schränkt den Prozess nicht ein. [38]

Insgesamt ist die Morphologie des Pulvers als sphärisch zu bewerten, da der Anteil der nicht sphärisch geformten Pulverpartikel sehr gering ist.

Für die Bestimmung der Korngröße wird ein digitales Lichtmikroskop (siehe Kapitel 6.2) genutzt. Die Durchmesserbestimmungen werden mit einer systemeigenen Messmethode durchgeführt, siehe Abbildung 7-6. Hierbei werden insgesamt 200 Körner aus 10

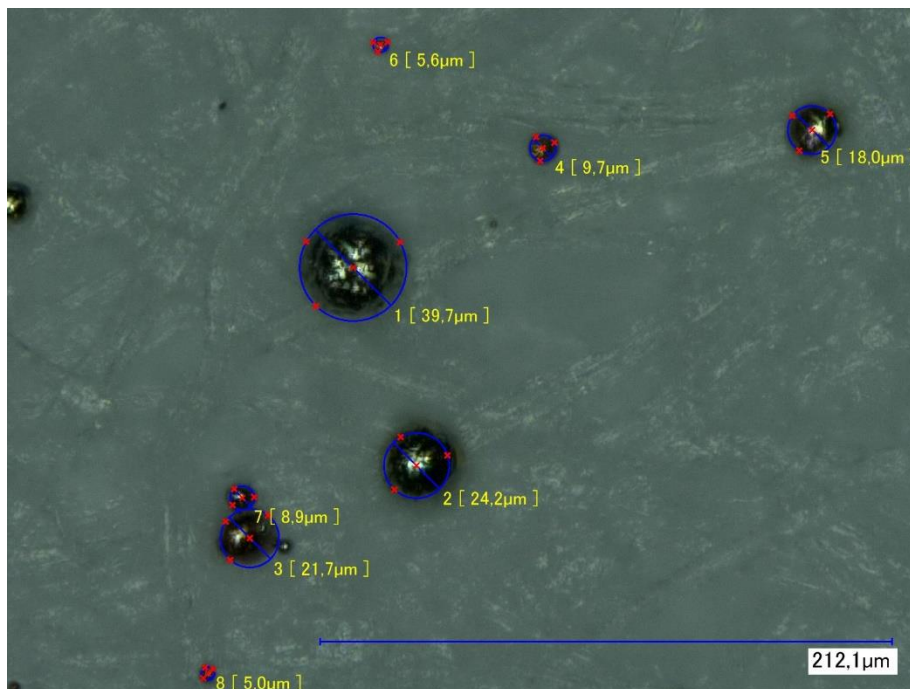


Abbildung 7-6 Lichtmikroskopieaufnahme mit ausgemessenen Pulverkörnern

verschiedenen Pulverproben vermessen. Das Ergebnis ist, der Übersicht halber in Klassen mit je 5 µm eingeteilt, in Abbildung 7-5 in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

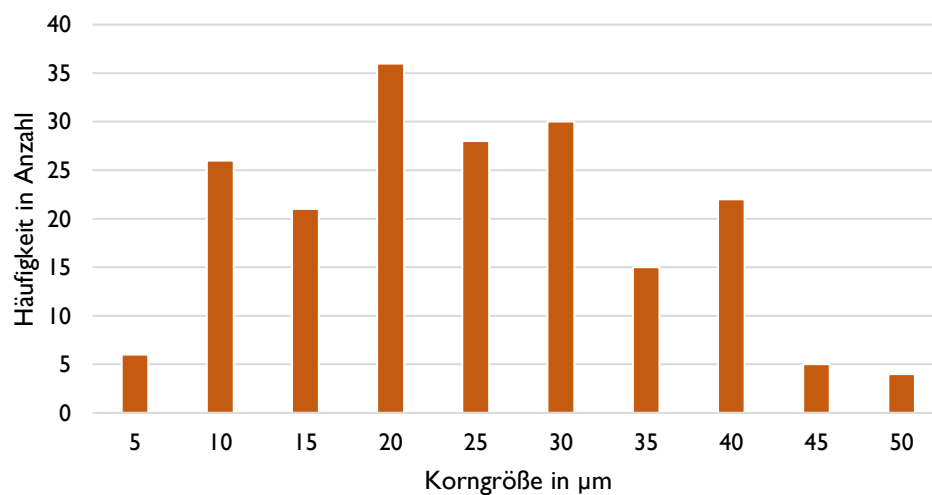


Abbildung 7-5 Korngrößenverteilung Kupferpulver

Die durchschnittliche Korngröße der Proben liegt bei ca. 24 μm mit einer Standardabweichung von 14 μm . Ca. 3,5 Prozent der Proben sind größer als 50 μm . Dies liegt im Bereich der von Schlenk angegebenen fünf Prozent. Die durchschnittliche Korngröße liegt mit 24 μm geringfügig unter der zu erstellenden Schichtdicke von 25 μm und ist somit als für den Prozess geeignet einzustufen.

Die letzte durchzuführende Untersuchungsmethode für das Pulver ist eine Bestimmung seiner chemischen Zusammensetzung. Die Bestimmung erfolgt mit Hilfe der EDX-Einheit des Rasterelektronenmikroskops. Mit dieser wird die chemische Zusammensetzung von mehr als 40 Pulverkörnern in sechs Bereichen bestimmt. Einer der Bereiche ist in Abbildung 7-7 abgebildet. In diesem Bereich wird die chemische Zusammensetzung von acht Körnern

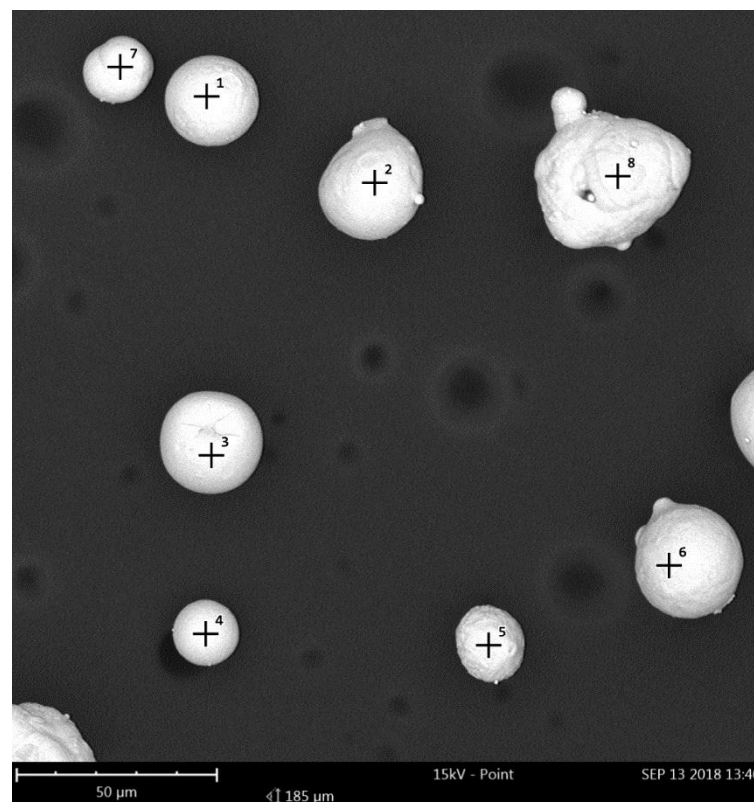


Abbildung 7-7 REM-Aufnahme mit EDX-Analysepunkten

bestimmt. Der Bereich wird gewählt, weil hier eine geringe Anzahl von Pulverkörnern vorhanden ist. Bei einer großen Anzahl von Körnern auf engem Raum (siehe Abbildung 7-4) zeigt sich die Tendenz eine geringe Anzahl von Signalen und somit ein hohes Signalrauschen zu erhalten. Die genauen Messstellen sind durch Kreuze mit Nummerierung gekennzeichnet. Sie werden an Stellen mit möglichst geringen sichtbaren Unebenheiten durchgeführt, da auch Unebenheiten zur Bildung des Signalrauschens beitragen.

Das bei einer Messung entstehende EDX-Spektrum gibt Auskunft über die in der Probe enthaltenen Elemente. Abbildung 7-8 zeigt das EDX-Spektrum von Messpunkt Nummer sieben

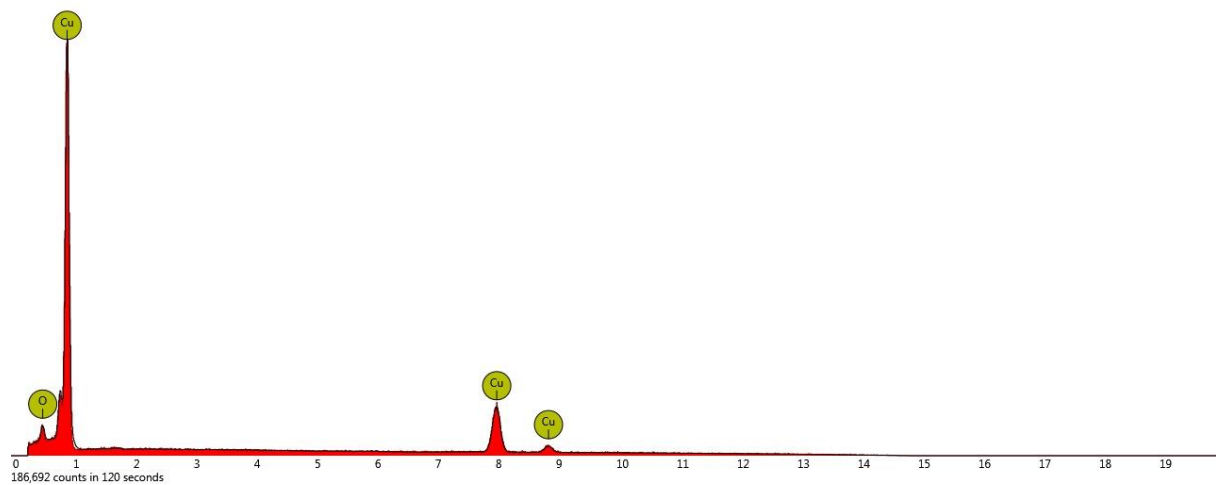


Abbildung 7-8 EDX-Spektrum Messpunkt 7

aus Abbildung 7-7. Die Messung hat mit ca. 187.000 Signalen eine ausreichende Anzahl von Signalen und entspricht einem Massenverhältnis von 92,3 % Kupfer zu 7,7 % Sauerstoff. Nach Auswertung aller Proben ist ein durchschnittlicher Kupferanteil von 93,6 % zu verzeichnen. Außer Sauerstoff mit 6,4 % Anteil können keine weiteren Elemente nachgewiesen werden. Die gesamten Messergebnisse sind in Anhang A1 beigefügt. Durch die hohe Wahrscheinlichkeit der Auger-Elektronenemission bei leichten Elementen wie Sauerstoff (siehe Kapitel 6.5) ist die Einschätzung des Sauerstoffgehaltes hier nicht als Quantifizierung anzusehen. Vielmehr ist sie als nicht genau quantifizierbarer Nachweis von Sauerstoff zu betrachten.

Die Anwesenheit von Sauerstoff ist sehr wahrscheinlich auf eine Oxidation des Kupferpulvers mit der Luft zurückzuführen. Das Pulver hat aufgrund seiner großen Oberfläche viel Kontaktfläche zu Luft, was eine weitreichende Oxidation begünstigt. Der große mit Luft gefüllte Raum des Behälters, in welchem das Pulver geliefert wurde und die nicht als vollkommen luftdicht anzusehende innere Verpackung des Pulvers legen die Vermutung nahe, dass eine Oxidation schon während des Transportes und der Lagerung stattfand.

Ein hoher Sauerstoffanteil kann negative Auswirkungen auf die späteren mechanisch-technologischen Eigenschaften haben (siehe Kapitel 5.2). Wenn man das Vorhandensein einer Oxidschicht rein unter dem Gesichtspunkt des SLM-Prozesses betrachtet, so ist allerdings eine Verbesserung der Laserabsorption im Pulver und somit eine Erhöhung der einzubringenden Energie zu erwarten (siehe Kapitel 5.3).

7.3 Parameterbestimmung

Das Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob die Erstellung eines Bauteils aus Kupfer mit Hilfe Selektiven Laserschmelzens möglich ist. Des Weiteren ist ein Parametersatz zu finden, bei welchem eine möglichst hohe Massendichte des Bauteils erzeugt wird. Das Vorgehen der Parameterbestimmung ist in Abbildung 7-9 dargestellt.

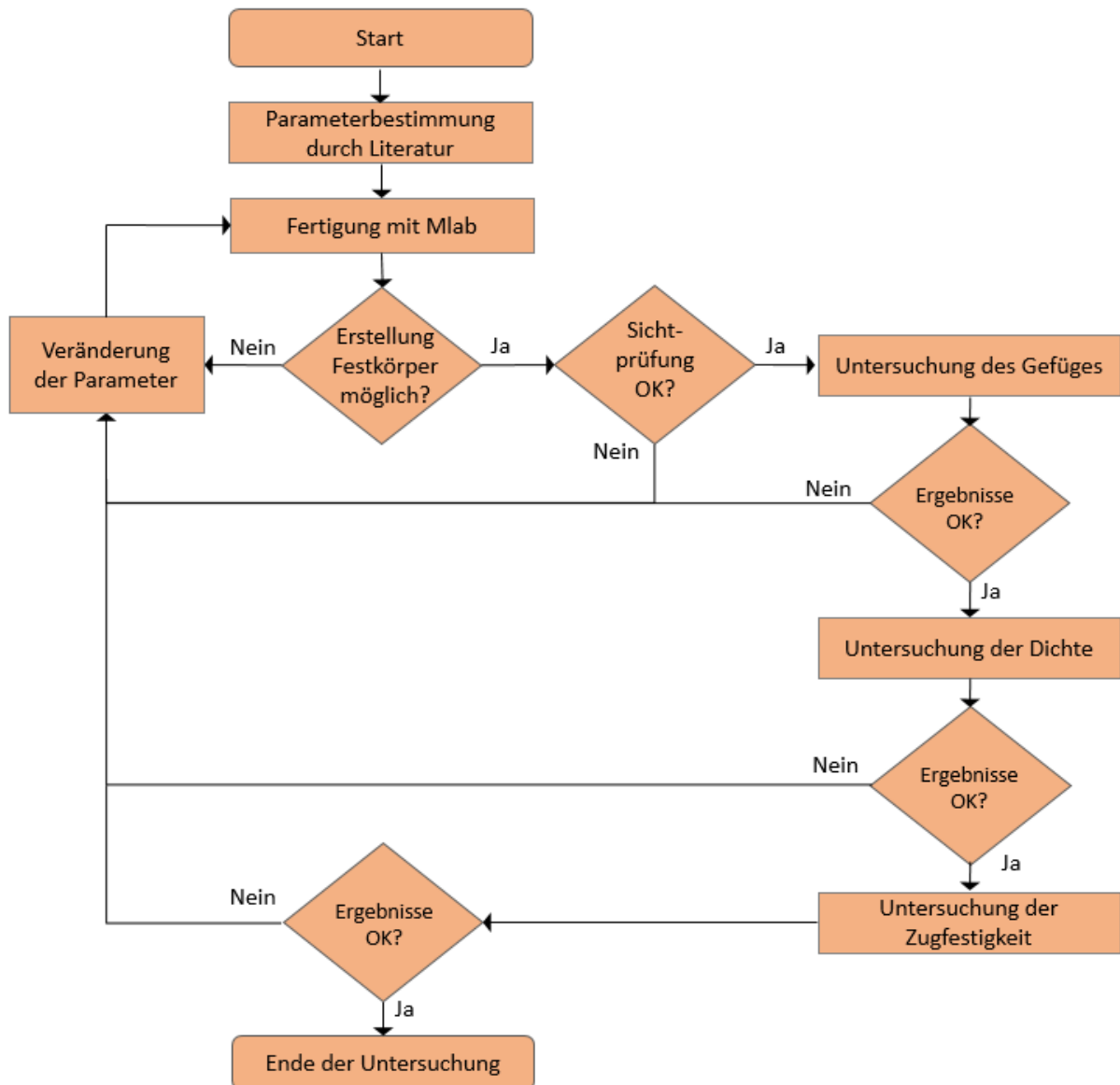


Abbildung 7-9 Prozessablauf Parameterbestimmung

Bei der „Parameterbestimmung durch Literatur“ handelt es sich um eine Abschätzung eines möglichen Parametersatzes aufgrund von Studien zum Thema „Selektives Laserschmelzen von Kupfer“. Da bisher keine Studien zum Selektiven Laserschmelzen von Kupfer mit einer Laserleistung von 100 W vorhanden sind, ist die erfolgreiche Erstellung eines äußerlich fehlerfreien Festkörpers nicht garantiert.

7.3.1 Energiedichteabschätzung

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben ist das Ergebnis beim SLM-Prozess von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Da zum Selektiven Laserschmelzen von Kupfer mit Leistungen im Bereich von 100 Watt keine Studien existieren, kann hier kein Parametersatz übernommen werden. Mögliche Wechselwirkungen und Korrelationen der Einzelparameter sind nur schwer zu überblicken. Grund hierfür sind die Vielzahl der Einzelparameter und die Tatsache, dass die Parameter in den einzelnen Studien stark variieren. Um die existierenden Studien vergleichbar zu machen, wird im Folgenden auf die für den SLM-Prozess benutzten Volumenenergiedichten E_V der einzelnen Studien eingegangen, da diese einen Vergleichswert bezüglich der eingebrachten Energie je Volumen bieten können.

Die Volumenenergiedichte berechnet sich aus der Laserleistung P_L , der Scangeschwindigkeit v_s , dem Spurabstand h_s und der Schichtdicke l_s nach Formel 7.1. [40]

$$E_V = \frac{P_L}{v_s \times h_s \times l_s} \quad \text{Formel 7.1}$$

Im Folgenden werden verschiedene Studien, welche sich mit dem Selektiven Laserschmelzen von Kupfer befasst haben, hinsichtlich ihrer Volumenenergiedichte und der damit erzielten Bauteildichte verglichen. Betrachtet werden vier Studien, bei welchen mit Laserleistungen von 195 W – 960 W gearbeitet wurde:

1. *“Selective laser melting of chemical pure copper”* von Trevisan, et al.: [41]

Leistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Spurabstand [μm]	Schichtdicke [μm]	Energiedichte [J/mm^3]	Dichte [%]
195	400	80	30	203	83

Bei der von Trevisan, et. al. durchgeführten Studie wurde das Selektive Laserschmelzen von Kupfer an einer SLM-Anlage mit einem 200 W CO_2 -Laser durchgeführt. Für den Prozess wurden allerdings nur 195 W genutzt. Des Weiteren verfügt die SLM-Anlage über die Möglichkeit den Bauraum auf 100 °C aufzuheizen, was die Vergleichbarkeit für diese Studie herabsetzt. Insgesamt wird in dieser Studie mit einer Volumenenergiedichte von 203 J/mm^3 eine Dichte von 83 Prozent erreicht. [41]

2. "Selective Laser Melting of Copper" von Lykov, et al.: [42]

Leistung [W]	Spurabstand [μm]	Schichtdicke [μm]	Punktabstand [μm]	Belichtungszeit [μs]	Energiedichte [J/mm^3]	Dichte [%]
200	120	50	50	400	267	88

In der Studie von Lykov et. al. wurde ebenfalls eine SLM-Anlage mit einem 200 W CO₂-Laser genutzt. Der Laser wurde allerdings so modifiziert, dass er nicht mit einer voreingestellten Scangeschwindigkeit, sondern mit einem „move-fire“ System arbeitet. Hierbei findet keine gleichmäßige Bewegung des Laserstrahls statt. Der Laser wird vielmehr an einem Punkt gehalten und belichtet für eine bestimmte Zeit (Belichtungszeit) diesen Punkt. Daraufhin wird die Belichtung unterbrochen und der Laser bewegt sich um eine vordefinierte Strecke (Punktabstand) zum nächsten Belichtungspunkt. Die sich überschneidenden Punkte bilden bei diesem Verfahren die Schmelzspur. [43] Die Volumenenergiedichte wird für dieses System ebenfalls mit dem bereits vorgestellten Weg bestimmt. Die Scangeschwindigkeit setzt sich hier allerdings aus dem Quotienten der Belichtungszeit t_e und dem Punktabstand l_p zusammen, siehe Formel 7.2. [1]

$$v_s = \frac{t_e}{l_p} \quad \text{Formel 7.2}$$

Auf Formel 7.1 angewendet folgt somit Formel 7.3.

$$E_v = \frac{P_L}{\frac{t_e}{l_p} \cdot h_s \cdot l_s} \quad \text{Formel 7.3}$$

Hiermit kann für die Studie eine angewendete Volumenenergiedichte von 267 J/mm³ bestimmt werden. Erreicht wurde eine Dichte von 88 %. [42]

3. "Selective Laser Melting of Pure Copper" von Ikeshoji, et al.: [44]

Leistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Spurabstand [μm]	Schichtdicke [μm]	Energiedichte [J/mm^3]	Dichte [%]
800	300	100	50	533	96

Bei dem in dieser Studie eingesetzten Laser handelt es sich um einen Faserlaser mit 1 kW Leistung. Für den SLM-Prozess werden 800 W genutzt. Die Volumenenergiedichte betrug 533 J/mm³ und führte zu einer Dichte von 96 %. [44]

4. „Selektives Laserschmelzen von Kupfer und Kupferlegierungen“ von Becker: [2]

Leistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Spurabstand [μm]	Schichtdicke [μm]	Energiedichte [J/mm^3]	Dichte [%]
940	100	140	30	2238	96

Wie bei der vorherigen Studie wurde ein Faserlaser mit 1 kW Leistung genutzt. Die maximale mittlere Laserleistung nach der F-Theta Linse wird mit 940 W angegeben. Die verfügbare Volumenenergiedichte liegt hier, aufgrund der geringen Scangeschwindigkeit deutlich höher als bei den anderen Studien, bei $2238 \text{ J}/\text{mm}^3$. Die erzielte Dichte beträgt ebenfalls 96 %. [2]

Die Dichten in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte der einzelnen Studien sind in Abbildung 7-10 dargestellt.

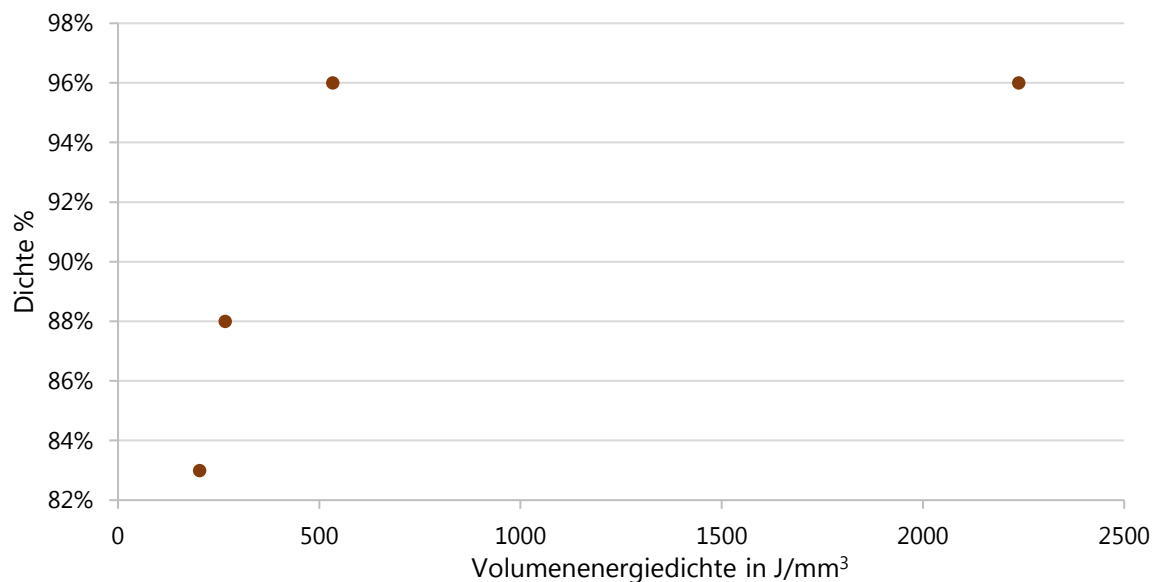


Abbildung 7-10 Dichte in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte

Es lässt sich erkennen, dass mit höherer Energiedichte, bis zu einem gewissen Punkt, eine höhere Dichte erreicht werden kann. Da Studie drei und Studie vier trotz großer Abweichungen der Energiedichte auf die gleiche erzeugte Dichte kommen, liegt die Vermutung nahe, dass sich bei steigender Volumenenergie die Dichte exponentiell einer Dichte von 96 % annähert und diese schon bei einer Volumenenergiedichte von $533 \text{ J}/\text{mm}^3$ nahezu erreicht ist. Da eine Stichprobenmenge von vier allerdings nicht repräsentativ ist, kann dies tatsächlich nur als Vermutung bewertet werden.

7.3.2 Festlegung der Parameter

Da allerdings ein deutlicher Zusammenhang zwischen Volumenenergiedichte und Dichte des Bauteils erkennbar ist, werden im Folgenden Parameter bestimmt, die zu einer ähnlichen Volumenenergiedichte führen wie in Studie zwei. Die Studie wird gewählt, da sie trotz des „move-fire“ Systems am vergleichbarsten ist. Es findet keine Vorwärmung des Pulvers statt und die genutzte Laserleistung ist der maximalen Laserleistung des „Mlab cusing R“ näher als die der übrigen Prozesse. Die zu erreichende Volumenenergiedichte beträgt somit 267 J/mm^3 . Ziel ist es zu prüfen, ob mit gleicher Energiedichte, trotz geringerer Laserleistung, die gleiche Dichte erzeugt werden kann.

Wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben wird die Energiedichte durch die nachfolgenden Parameter bestimmt:

1. Laserleistung
2. Scangeschwindigkeit
3. Spurbstand
4. Schichtdicke

Da abzusehen ist, dass bei dem SLM-Prozess an einer Anlage mit einem 100 W Laser das Aufschmelzen des Pulvers und das Aufrechterhalten der Schmelze problematisch sein werden, wird die Laserleistung auf die volle Leistung festgelegt. Sie liegt somit bei 100 W.

Die Schichtdicke kann variiert werden. Der „Mlab cusing R“ kann Schichtdicken von $20 - 50 \mu\text{m}$ erstellen. Aus Formel 7.1 folgt, dass eine Verkleinerung der Schichtdicke eine Erhöhung der Volumenenergiedichte zur Folge hat. Die kleinste in den vorgestellten Studien genutzte Schichtdicke beträgt $30 \mu\text{m}$. Um auf möglichst hohe Werte für die Volumenenergiedichte zu gelangen wird die Schichtdicke für alle folgenden Versuche auf $25 \mu\text{m}$ festgelegt.

Der Spurbstand ist wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben das Produkt aus Schmelzspurbreite und Abstandsfaktor. Auch hier führt eine Verkleinerung zu einer Erhöhung der Energiedichte. In den Studien wurden Spurbstände von $80 - 140 \mu\text{m}$ genutzt. Da dem Schmelzprozess mit 100 Watt verhältnismäßig wenig Leistung zur Verfügung steht, ist eine eher geringe Schmelzspurbreite zu erwarten. Um eine hohe Energiedichte zu erzeugen wird sich am niedrigsten Spurbstand orientiert. Es wird eine Schmelzspurbreite von $120 \mu\text{m}$ vermutet, was zu einem Spurbstand von $84 \mu\text{m}$ führt.

Die drei Parameter Laserleistung, Schichtdicke und Spurabstand sind für diese Arbeit als nicht mehr variabel anzusehen. Daraus ist der entscheidende Parameter die Scangeschwindigkeit. Mit den festgelegten Parametern ergibt sich für verschiedene Scangeschwindigkeiten der in Abbildung 7-11 dargestellte Zusammenhang.

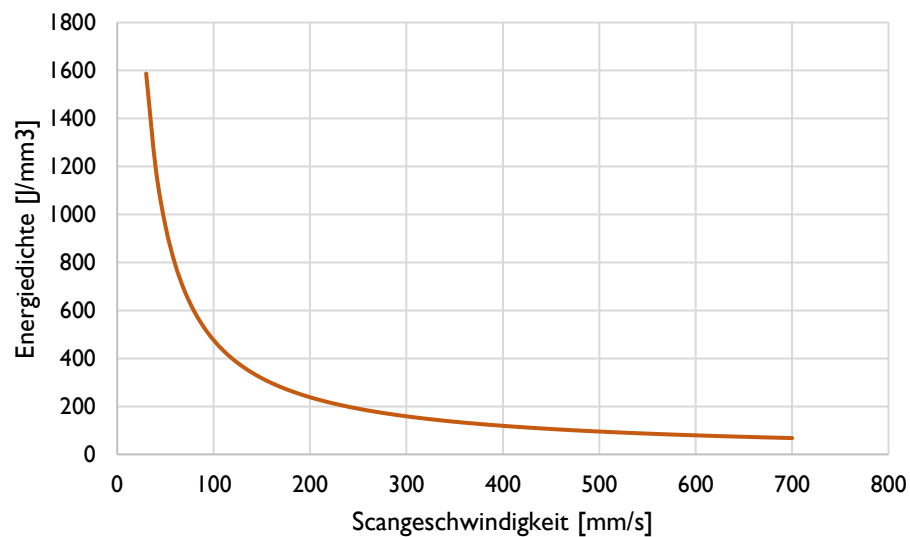


Abbildung 7-11 Energiedichte in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit für Laserleistung = 100 W, Schichtdicke = 25 μm und Spurabstand = 84 μm

Deutlich erkennbar ist der exponentielle Anstieg der Energiedichte bei sinkender Scangeschwindigkeit. Die zu erreichende Energiedichte von 267 J/mm^3 wird bei einer Scangeschwindigkeit von ca. 180 mm/s erreicht.

7.4 Herstellbarkeit, Scangeschwindigkeit und Stützstrukturen

7.4.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Herstellbarkeit von äußerlich fehlerfreien Festkörpern mittels Selektiven Laserschmelzens werden zunächst Probekörper mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten gefertigt und dann mittels digitalem Lichtmikroskop untersucht. Dabei können Rückschlüsse über das Gefüge gezogen werden, da Fehlstellen das Licht anders reflektieren als das polierte Gefüge und dadurch gut sichtbar werden. [45]

Die für diesen Versuch genutzten Probekörper werden von Kremer [17] für diesen Prozess als geeignet befunden. Abbildung 7-12 zeigt eine Skizze des Probekörpers. Die Probekörper, im Folgenden als Dichtequader bezeichnet, haben die Maße 5 mm x 6 mm x 7 mm und sind an

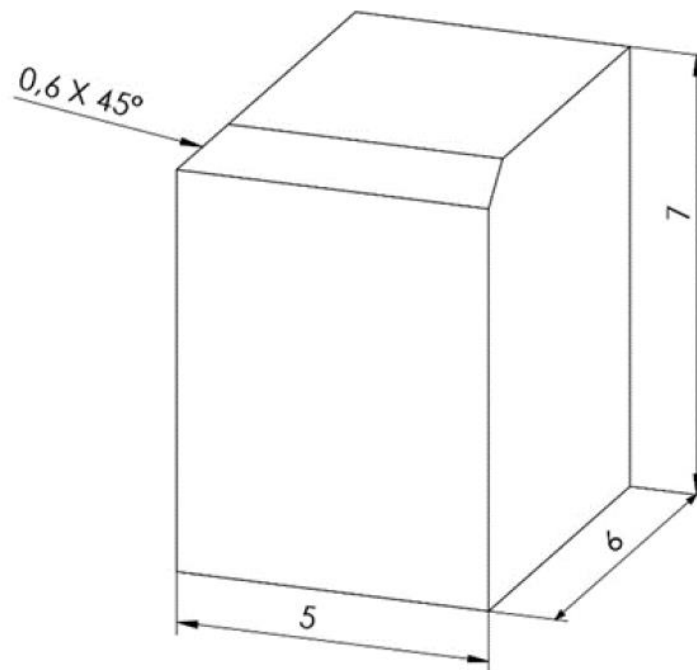


Abbildung 7-12 3D - Skizze des Probekörpers [17]

zwei Kanten mit einer Fase versehen. Diese ermöglichen eine genaue Bestimmung der Ansichten während der metallographischen Untersuchungen. [17]

Da sich die, zum Erreichen der Energiedichte notwendige, Scangeschwindigkeit im Bereich von 180 mm/s befindet, werden für diesen Versuch Dichtequader mit den Scangeschwindigkeiten 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s und 200 mm/s gedruckt. Die niedrigeren Geschwindigkeiten werden gewählt, da mit ihnen eine deutlich höhere Volumenenergiedichte zu erzielen ist.

Der Versuch wird außerdem genutzt um mit konstanter Geschwindigkeit den Einfluss der Stützstrukturen auf den Prozess zu untersuchen. Hintergrund ist die gute Wärmeableitung von Kupfer. Getestet wird, ob durch weniger Stützstrukturen und die dadurch bedingte schlechtere Wärmeableitung, eine höhere Dichte erzeugt werden kann. Die schlechtere Wärmeableitung führt zu einem höheren Energieanteil, welcher im Schmelzbereich zurückbleibt. Inwiefern diese Theorie zutrifft wird geprüft, indem Dichtequader mit 9, 12, 20 und 25 Stützkegeln mit einer Scangeschwindigkeit von 100 mm/s gedruckt werden.

Die gefertigten Dichtequader sind in Abbildung 7-13 zu sehen. Jede Reihe, bestehend aus acht

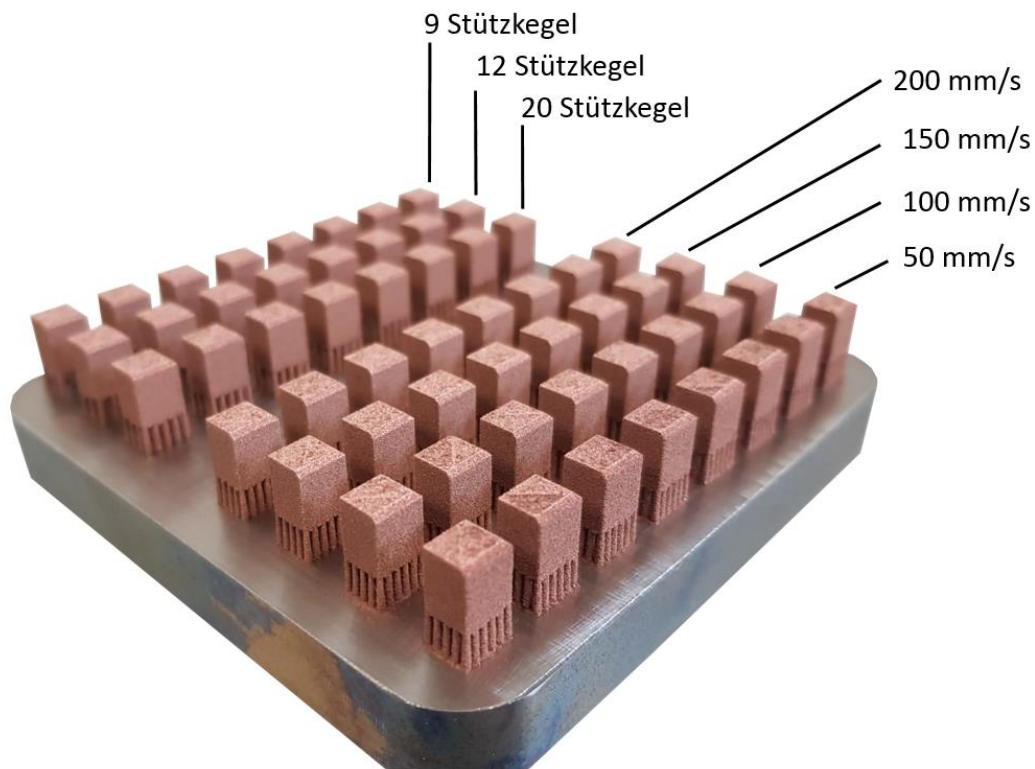


Abbildung 7-13 Dichtequader verschiedener Scangeschwindigkeiten und Stützstrukturen

Dichtequadern, ist mit verschiedenen Parametern gefertigt. Die vorderen vier Reihen variieren in der genutzten Scangeschwindigkeit und die hinteren drei Reihen haben jeweils eine unterschiedliche Anzahl an Stützkegeln.

7.4.2 Auswertung

Stützstrukturen

Zunächst werden die Dichtequader einer Sichtprüfung unterzogen. Alle hergestellten Proben haben eine raue Oberfläche infolge von Pulveranhaftung. Des Weiteren sind bei den Dichtequadern, welche mit verschiedenen vielen Stützkegel gefertigt wurden, deutliche

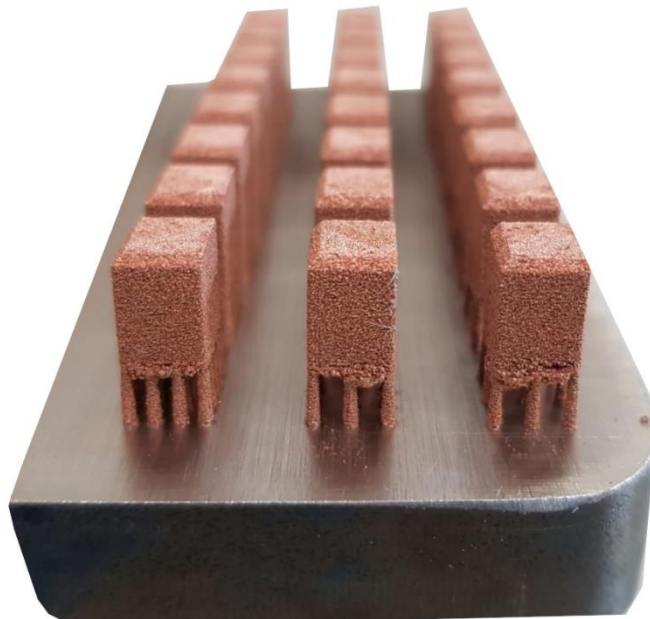


Abbildung 7-14 Dichtequader mit 20 (links), 12 (mitte) und 9 (rechts) Stützkegeln

Aufbaufehler zu erkennen, siehe Abbildung 7-14. Es ist zu erkennen, dass das Pulver, auch mit einer geringeren Anzahl von Stützstrukturen, im oberen Bereich vollkommen aufgeschmolzen zu sein scheint. Die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers scheint daher das Fehlen der Wärmeableitung von zusätzlichen Stützstrukturen auszugleichen. Nicht ausgeglichen wird die fehlende Stützwirkung des Pulvers. An Stellen mit größerem Abstand zu Stützstrukturen läuft die Schmelze, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, in das Pulver. Dieser Effekt tritt mit abnehmender Anzahl von Stützkegeln verstärkt ein. Inwieweit dies Auswirkungen auf das Gefüge im oberen Bereich des Quaders hat, ist durch eine reine Sichtprüfung nicht festzustellen.

Für die Auswertung mit dem Lichtmikroskop werden die Dichtequader, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, durch Warmeinbetten vorbereitet. Jeweils vier Würfel mit verschiedener Ausrichtung (Draufsicht, Frontansicht, Ansicht von links und Ansicht von unten) werden für jede

Scangeschwindigkeit präpariert. Danach sind die eingebetteten Proben zu schleifen und polieren.

Eine Betrachtung der erzeugten Schliffbilder, siehe Abbildung 7-15, zeigt, dass die Stützstrukturen sich nicht nur auf die unmittelbar anliegenden Bereiche auswirken, wie es die

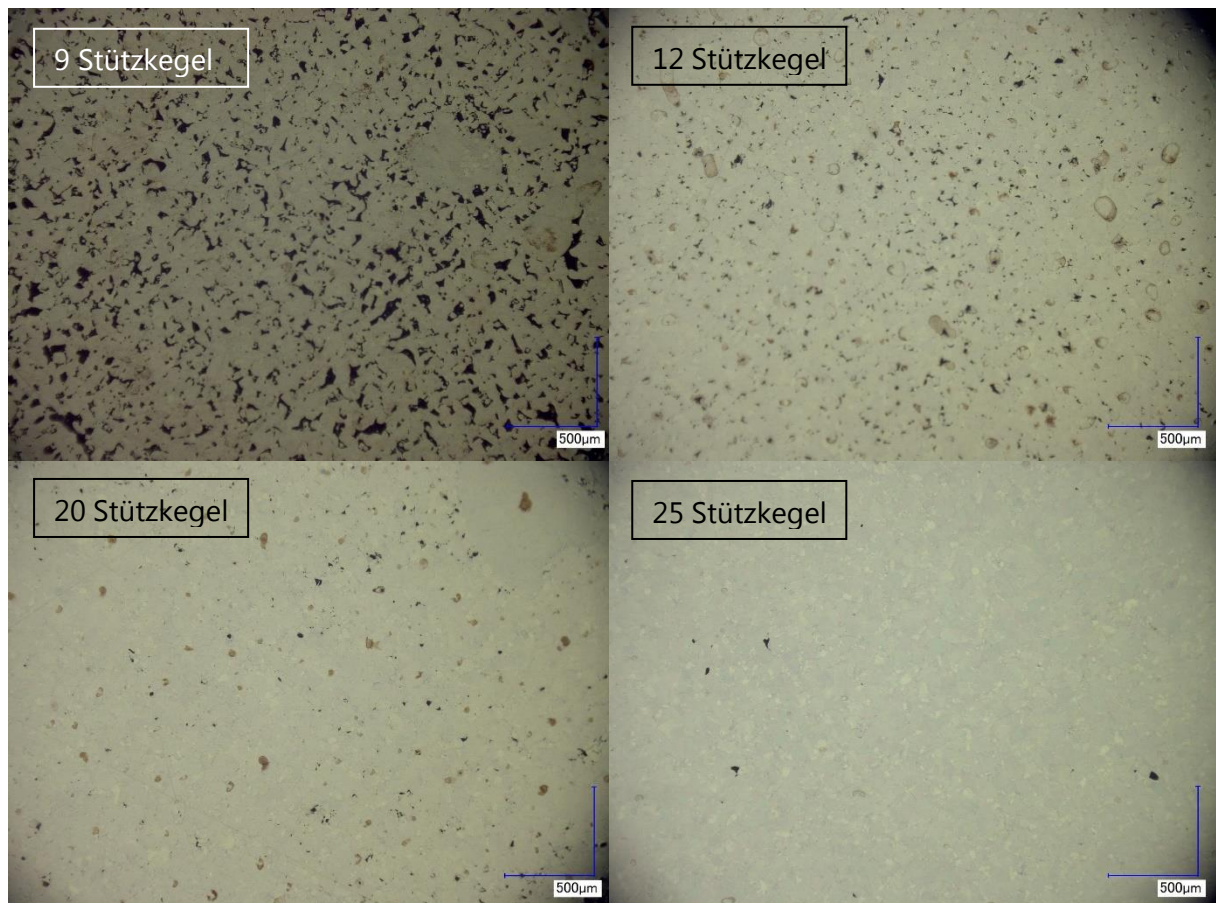


Abbildung 7-15 Schliffbilder Dichtequader (Oberseite) mit verschiedenen Stützstrukturen 100 fache Vergrößerung: 9 (links oben), 12 (rechts oben), 20 (links unten), 25 (rechts unten)

rein äußerliche Betrachtung vermuten lässt. Die Schliffbilder werden an der Oberseite der Würfel durchgeführt. An ihnen lässt sich erkennen, dass die Anzahl der Stützkegel deutliche Einflüsse auf die Anzahl der Fehlstellen und die Homogenität des Gefüges hat. So weisen die Dichtequader, welche mit neun Stützkegeln gefertigt werden ein stark poröses Gefüge auf. Die Porosität nimmt mit steigender Anzahl Stützkegel ab, bis bei 25 Stützkegeln ein, bis auf wenige Fehlstellen, dichtes Gefüge erreicht wird. Die Anzahl und Dichte der Stützkegel, wie sie bei der Probe mit 25 Stützkegeln genutzt wird, ist als für den Prozess geeignet zu bewerten und wird für alle weiteren Versuche übernommen. Eine geringere Anzahl Stützkegel ist nicht geeignet.

Scangeschwindigkeit

Bei den Quadern, welche mit verschiedenen Scangeschwindigkeit und gleicher Anzahl

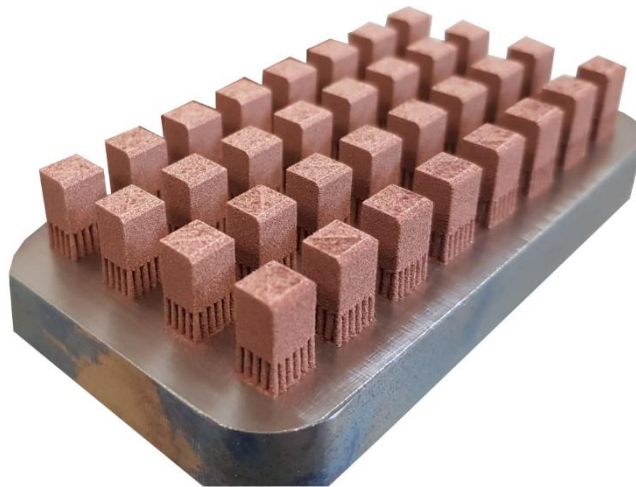


Abbildung 7-16 Vergleich Scangeschwindigkeit: 200 mm/s (1. von links), 150 mm/s (2. von links), 100 mm/s (3. von links), 100 mm/s (3. von links), 50 mm/s (4. von links)

Stützkegel gedruckt werden, sind keine äußerlichen Fehlstellen sichtbar. Allerdings sind auch hier Pulveranhaftungen zu erkennen. Sie sind vor allem an den Stützkegeln sichtbar, da hier ein deutlich größeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen besteht.

Auch bei den Schliffbildern, welche in Abbildung 7-17 abgebildet sind, können bei den niedrigeren Scangeschwindigkeiten (50 mm/s, 100 mm/s und 150 mm/s) keine signifikanten

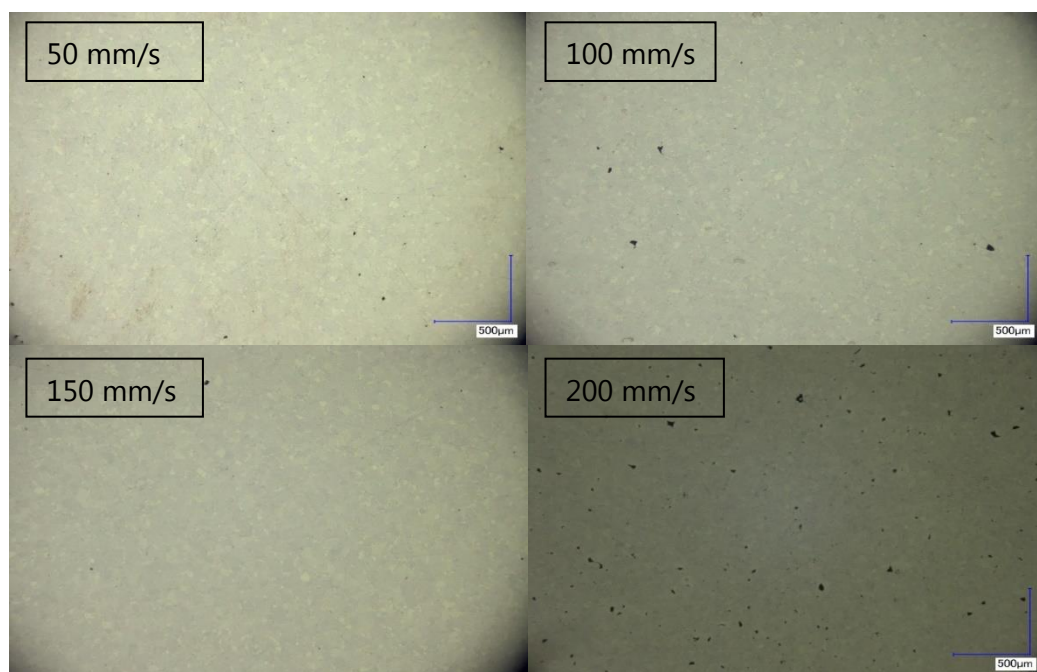


Abbildung 7-17 Schliffbilder Dichtequader (Oberseite) verschiedene Scangeschwindigkeiten, 100 fache Vergrößerung: 50 mm/s (links oben), 100 mm/s (rechts oben), 150 mm/s (links unten), 200 mm/s (rechts unten)

Unterschiede festgestellt werden. Lediglich die mit 200 mm/s gefertigten Dichtequader weisen eine größere Anzahl von Fehlstellen auf. Grund hierfür kann die niedrigere Volumenenergiedichte sein.

Da dieser Versuch zunächst einen Überblick über die Machbarkeit des SLM-Drucks generell geben soll und somit zu mehreren Parametern (Stützstrukturen und Scangeschwindigkeit) Proben gefertigt werden, ist die Stichprobenmenge für eine statistisch signifikante Aussage, bezüglich der optimalen Scangeschwindigkeit, nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Scangeschwindigkeitsparameter mit einer größeren Menge an Proben untersucht und weiter eingegrenzt.

7.4.3 Zusammenfassung

Der Versuch zeigt, dass mit wenigen Stützstrukturen hergestellte Proben ein deutlich poröses Gefüge aufweisen. Des Weiteren führt die fehlende Stützwirkung zu einem Fließen der Schmelze in das darunterliegende Pulver. Eine Reduzierung der Stützstrukturen zur Erhöhung der einbringbaren Energie und erzeugbaren Dichte ist daher nicht möglich.

Eine Korrelation zwischen Scangeschwindigkeit und Gefügeeigenschaft kann aufgrund der hohen Anzahl von Fehlstellen bei der mit 200 mm/s gefertigten Probe vermutet werden. Da dieser Versuch zunächst einen Überblick über die Machbarkeit des SLM-Drucks generell geben soll und somit zu mehreren Parametern (Stützstrukturen und Scangeschwindigkeit) Proben gefertigt werden, ist die Stichprobenmenge für eine statistisch signifikante Aussage, bezüglich der Scangeschwindigkeit, nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Scangeschwindigkeitsparameter mit einer größeren Menge an Proben untersucht und weiter eingegrenzt.

7.5 Eingrenzen der optimalen Scangeschwindigkeit

7.5.1 Versuchsaufbau

Um eine statistisch signifikantere Aussage treffen zu können und den Prozess auf seine Wiederholbarkeit zu prüfen, werden Dichtequader gefertigt. Insgesamt werden acht Reihen mit je acht Dichtequadern gefertigt. Jede Reihe wird mit einer von den anderen abweichenden Scangeschwindigkeit gefertigt. Die einzelnen Reihen und Scangeschwindigkeiten sind in

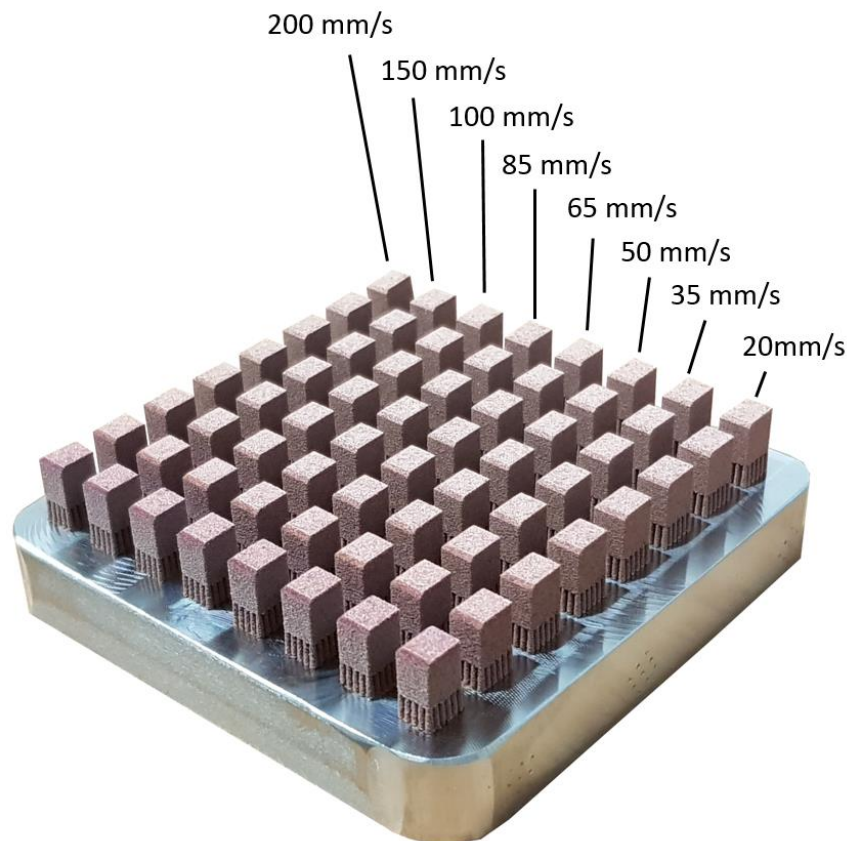


Abbildung 7-18 8 x 8 Dichtequader mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten

Abbildung 7-18 dargestellt. Zur Bestimmung der Wiederholbarkeit werden wie in Versuch 1 Würfel mit 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s und 200 mm/s Scangeschwindigkeit gefertigt. Die Auswertung der Schliffbilder zeigte in Versuch 1 eine höhere Anzahl von Fehlstellen bei einer Scangeschwindigkeit von 200 mm/s. Daher wird eine Eingrenzung der optimalen Scangeschwindigkeit im Bereich von 20 mm/s bis 100 mm/s durchgeführt. So werden zusätzlich mit den Scangeschwindigkeiten 20 mm/s, 35 mm/s, 65 mm/s und 85 mm/s Dichtequader erstellt. Es werden sowohl die Schliffbilder bewertet, als auch Dichtebestimmungen nach dem archimedischen Prinzip durchgeführt.

Anders als in Versuch 1 wird auf die Auswertung aller Flächen (Oberseite, Front, Links, Unterseite) verzichtet. Es werden nur zwei Flächen betrachtet, die Oberseite und die Front. Somit kann das Gefüge parallel zu den einzelnen Schichten und senkrecht dazu ausgewertet werden und die Anzahl der Proben pro Fläche steigt.

7.5.2 Auswertung

Bei der Auswertung der Schlibfbilder fällt auf, dass eine senkrechte Belichtung des Probenkörpers nicht die optimale Methode ist, um Fehlstellen im Gefüge von Kupferproben zu untersuchen. Als Grund wird angenommen, dass bei Kupferproben durch die gute Lichtreflexion des Kupfers die Fehlstellen schlechter zu erfassen sind. Eine Belichtung mit schrägem Lichteinfall sorgt dafür, dass Schatten entstehen, welche deutlich besser mit dem Lichtmikroskop zu erkennen sind. Ein Vergleich der beiden Belichtungen ist in Abbildung 7-19 dargestellt. Ein Bereich einer Probe wird hier durch beide Belichtungsarten untersucht. Deutlich

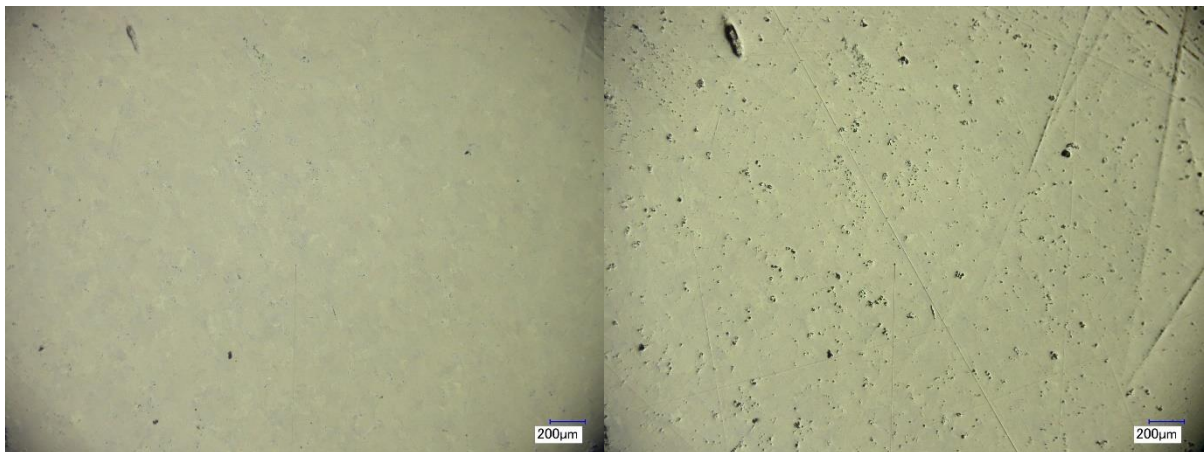


Abbildung 7-19 Vergleich verschiedener Belichtungen bei 100-facher Vergrößerung. Senkrechter Lichteinfall (links), schräger Lichteinfall (rechts)

zu sehen ist die große Anzahl von Fehlstellen, welche durch eine senkrechte Belichtung nicht sichtbar sind, durch den schrägen Lichteinfall allerdings sichtbar werden. Eine Belichtung mit schrägem Lichteinfall eignet sich daher für eine 100-fache Vergrößerung besser für die Bewertung des Gefüges für Kupferproben. Bei stärkeren Vergrößerungen lässt die Schärfe der Aufnahmen nach. Dies ist vermutlich einer geringen Lichtintensität geschuldet, da das Licht nicht mehr so stark auf der Probe fokussiert wird. Eine Auswertung mit schrägem Lichteinfall ist daher nur für niedrige Vergrößerungen, wie zum Beispiel eine 100-fache Vergrößerung, als geeignet einzustufen. Bei diesem Lichteinfall gibt sie mehr Auskunft über das Gefüge, als die Auswertung mit senkrechtem Lichteinfall und ist für weitere Auswertungen zu nutzen.

Die Schlibfbilder der einzelnen Scangeschwindigkeiten zeigen bei einer Betrachtung mit dem Lichtmikroskop keine deutlichen Gefügeunterschiede. Repräsentativ sind in Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21 Schliffe der Quaderoberseiten dargestellt. Bei allen

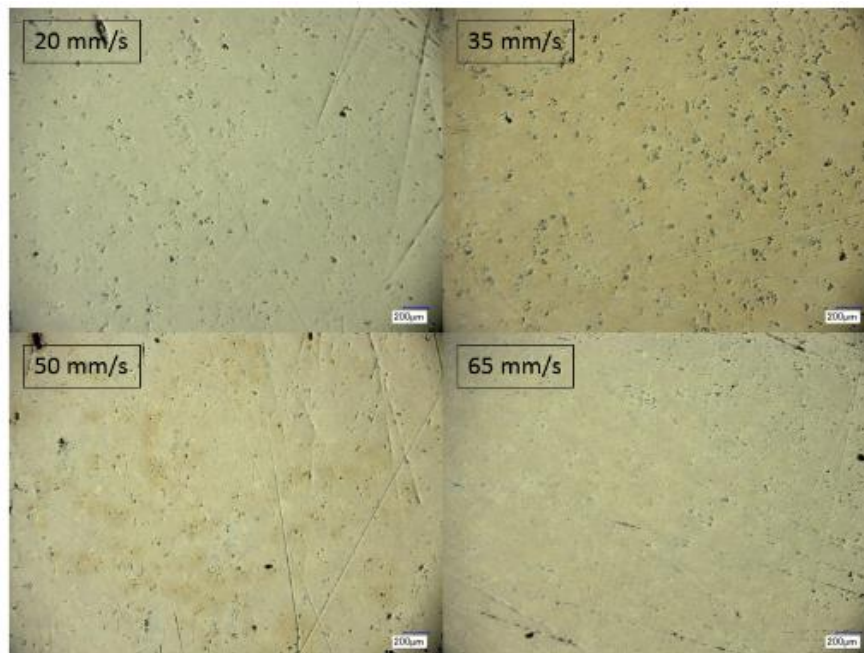


Abbildung 7-20 Schlibfbilder: 20 mm/s - 65 mm/s

Scangeschwindigkeiten ist bei schrägem Lichteinfall ein von Fehlstellen geprägtes Gefüge zu erkennen. Hierbei sind keine merklichen Unterschiede zwischen den einzelnen

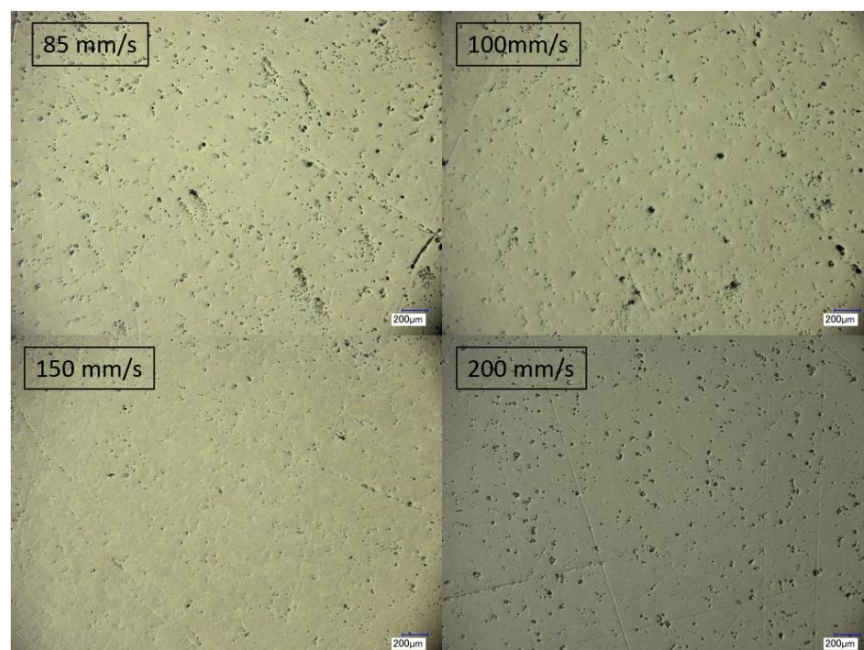


Abbildung 7-21 Schlibfbilder: 85 mm/s - 200 mm/s

Scangeschwindigkeiten festzustellen. So ist beispielsweise das Gefüge der mit 35 mm/s und den mit 200 mm/s erstellten Probekörpern sehr ähnlich.

Da die optische Beurteilung hier zu keinem schlüssigen Ergebnis kommt, wird die Massendichte der Quader unter Verwendung des archimedischen Prinzips bestimmt. Das verwendete Messmittel ist die in Kapitel 6.7 vorgestellte hydrostatische Waage. Die Waage wird dafür zunächst auf ihre Messgenauigkeit geprüft, indem ein Körper mit bekanntem Volumen als Referenzkörper dient. Das Volumen wird mit der hydrostatischen Waage bestimmt und dann mit dem realen Volumen verglichen. Es finden 20 Messungen statt, wobei die Abweichung im Durchschnitt 2,03 % beträgt. Die Standardabweichung der Messungen ist ein Maß für die Wiederholpräzision. [46] Die Standardabweichung liegt bei 0,07 %, womit der Messprozess eine hohe Wiederholpräzision aufweist.

Die Dichtebestimmung der Dichtequader erfolgt nach dem in Kapitel 6.7 beschriebenen Prinzip. Für jede Scangeschwindigkeit wird das Volumen von zwei Quadern bestimmt, da die restlichen Quader durch das Warmeinbetten nicht mehr zur Verfügung stehen. Die durchschnittliche Standardabweichung aller Messungen liegt hier bei 0,40 %.

Die ermittelten Dichten sind in Abbildung 7-22 zu erkennen. Bei der Fertigung der

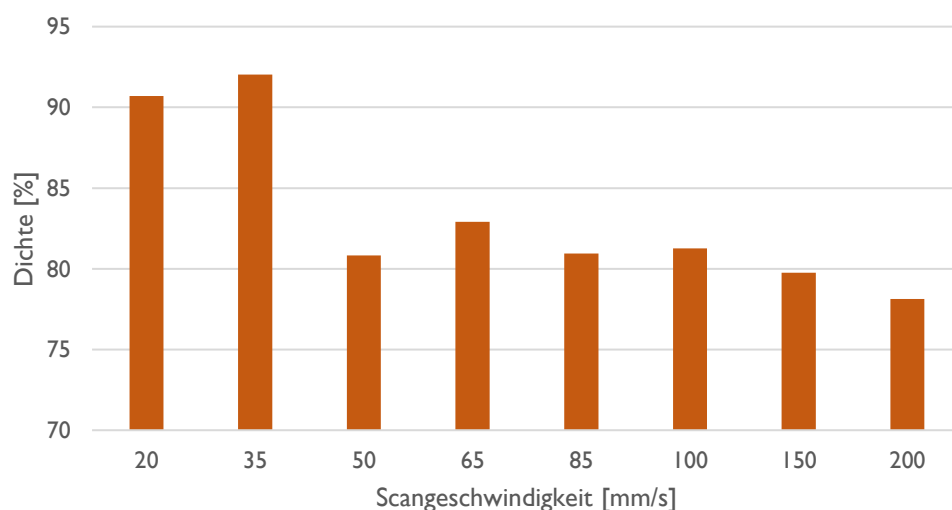


Abbildung 7-22 Dichtebestimmung hydrostatische Waage in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Dichtequader mit sehr niedrigen Scangeschwindigkeiten von 20 mm/s und 35 mm/s werden hier Dichten von 90,7 % und 92,0 % erzielt. Somit ist die Dichte bei den mit 35 mm/s hergestellten Proben am höchsten. Bei steigenden Scangeschwindigkeiten nimmt die Dichte ab. Eine Ausnahme bildet hier die mit 50 mm/s gefertigte Probe. Die Dichte der Probe liegt mit 80,8 % unterhalb der Dichten der Proben welche mit 65 mm/s, 85 mm/s und 100 mm/s gefertigt wurden.

7.5.3 Zusammenfassung

Durch die Untersuchung der Proben mithilfe des Lichtmikroskops kann für die mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten hergestellten Proben kein deutlich verschiedenes Gefüge festgestellt werden. Auffällig ist das ähnliche Gefüge der mit 35 mm/s gefertigten und der mit 200 mm/s gefertigten Proben, da diese einen Dichteunterschied von ca. 14 % aufweisen. Die Fähigkeit der Lichtmikroskopanalyse diese Kupferproben zu bewerten ist daher in Frage zu stellen.

Die Massendichtebestimmung mithilfe der hydrostatischen Waage scheint zu belegen, dass eine Fertigung der Proben mit sehr niedrigen Scangeschwindigkeiten, bedingt durch eine Erhöhung der Volumenenergiedichte, eine erhöhte Dichte der Proben erzeugt. Diese Korrelation ist aber nur für die Proben mit 20 mm/s und 35 mm/s erkennbar. Da die Probenzahl sehr gering und somit nicht statistisch signifikant ist, kann hier allerdings nur von einer Orientierungshilfe für das weitere Vorgehen gesprochen werden.

7.6 Bestimmung Zugfestigkeit und Dichte

7.6.1 Versuchsaufbau

Um den im vorherigen Kapitel an wenigen Proben gesehenen Zusammenhang zwischen Scangeschwindigkeit und Dichte statistisch signifikant nachweisen zu können, werden erneut Dichtewürfel gefertigt. Hierbei werden jeweils acht Quader mit den Scangeschwindigkeiten 35 mm/s, 85 mm/s und 150 mm/s erstellt. Die Scangeschwindigkeit 35 mm/s wird gewählt, da sie zuvor die höchste Dichte erzielte. 150 mm/s wird gewählt um eine deutlich höhere vergleichbare Geschwindigkeit zu haben und 85 mm/s dient als mittlere Geschwindigkeit. Außerdem werden Zugproben gefertigt, um die Ergebnisse aus den Dichtemessungen mit den Zugfestigkeiten der Proben vergleichen zu können. Hierbei werden jeweils fünf Zugproben der

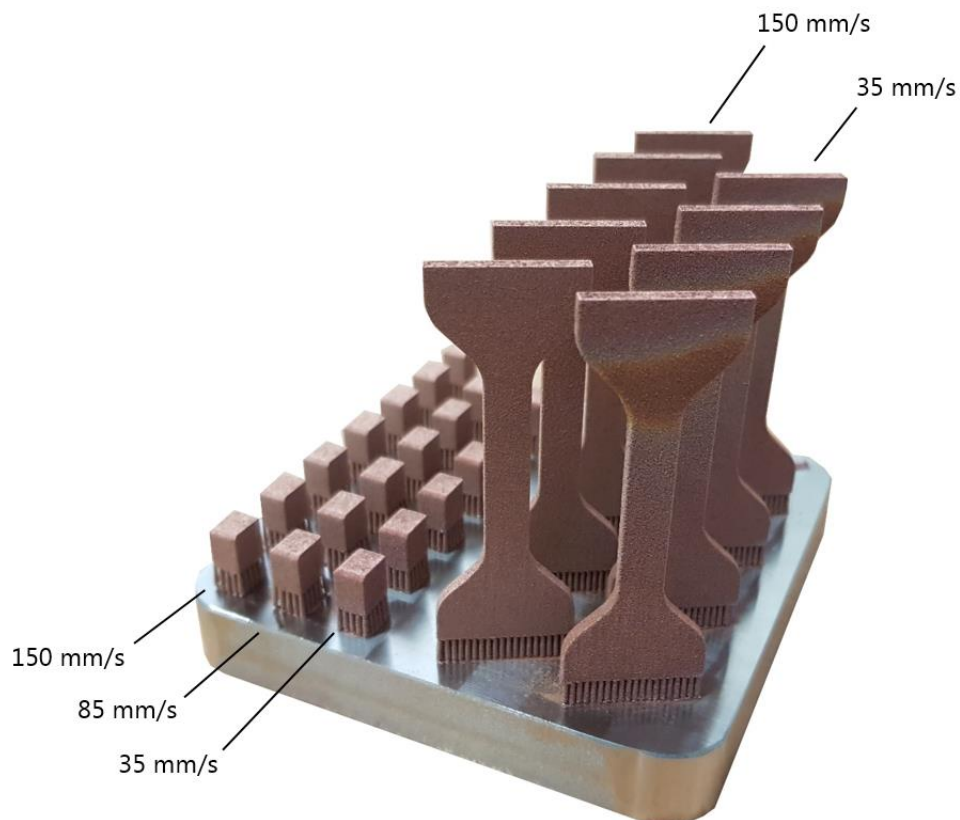


Abbildung 7-23 Versuchsaufbau Zugproben und Dichtequader

Scangeschwindigkeiten 35 mm/s und 150 mm/s verglichen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7-23 dargestellt. Eine der Zugproben wird beim Ausbauen der Bauplatte aus dem Bauraum von der Bauplatte entfernt und fehlt daher in der Abbildung, bei den mit 35 mm/s gefertigten Zugproben.

Dichtebestimmung

Die Dichte der Quader wird wie zuvor mit Hilfe der hydrostatischen Waage bestimmt und dann mit der Dichte von Kupfer verglichen. Da die Standardabweichung der bisherigen Dichtemessungen mit 0,40 % sehr gering ist, ist eine Reduzierung der Dichtemessungen auf drei Messungen pro Quader, als ausreichend einzustufen. Es wird pro Scangeschwindigkeit bei allen acht Quadern die Dichte bestimmt.

Zugversuch

Der Zugversuch wird, wie in Kapitel 6.6 beschrieben, durchgeführt. Die benutzten Geometrien werden von Kremer für den Versuchsaufbau ausgelegt, wobei sich an DIN EN ISO 6892-1

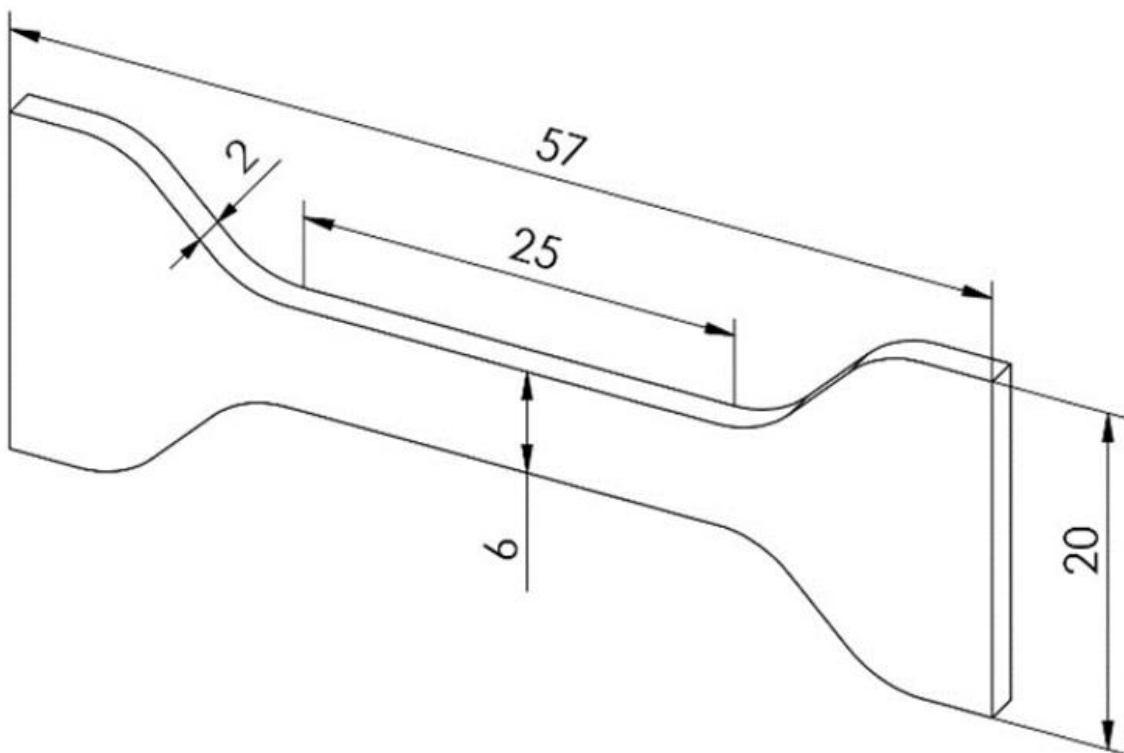


Abbildung 7-24 3D-Skizze Zugprobe [17]

orientiert wird. [17]

Es werden für die Scangeschwindigkeiten 35 mm/s und 150 mm/s jeweils fünf Zugproben geprüft.

7.6.2 Auswertung

Dichtebestimmung

Für alle drei Scangeschwindigkeiten werden jeweils die Massendichten von acht Quadern bestimmt. Dabei wird jeder Quader dreimal vermessen. Die durchschnittliche Standardabweichung zwischen den einzelnen Messungen jedes Würfels liegt bei 0,15 %. Die Wiederholpräzision der Messungen ist somit als hoch einzustufen.

In Abbildung 7-25 sind die durchschnittlich ermittelten Dichten bei den verschiedenen Scangeschwindigkeiten aufgezeigt.

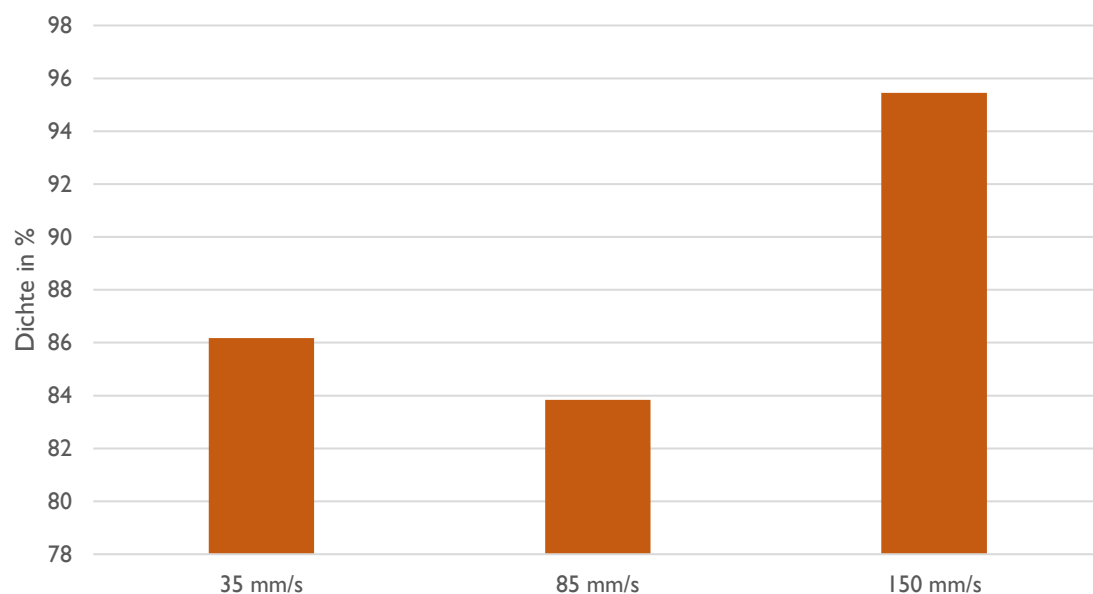


Abbildung 7-25 Massendichte bei verschiedenen Scangeschwindigkeiten

Mit 95,5 % wird die höchste Dichte mit einer Scangeschwindigkeit von 150 mm/s erzeugt. Die Standardabweichung liegt hier bei 2,1 %. Die mit 35 mm/s gefertigten Quader erreichen eine Dichte von 86,2 % und die mit 85 mm/s eine Dichte von 83,8 %. Die Standardabweichungen liegen bei 1,5 % und 1,2 %. Die Dichte von 95,5 % liegt deutlich über den durch andere Studien, mit ähnlichen Energiedichten, erzeugten Dichten.

Während die Abweichungen der Proben gleicher Scangeschwindigkeit, welche aus einem Fertigungsprozess kommen, somit relativ gering ausfallen, sind die Abweichungen zum vorherigen Druck deutlich größer. Abbildung 7-26 zeigt, für die untersuchten Scangeschwindigkeiten, die Dichten aus Druck 2 und Druck 3 im Vergleich. Die Dichten weichen stark voneinander ab, obwohl die verglichenen Proben mit den gleichen

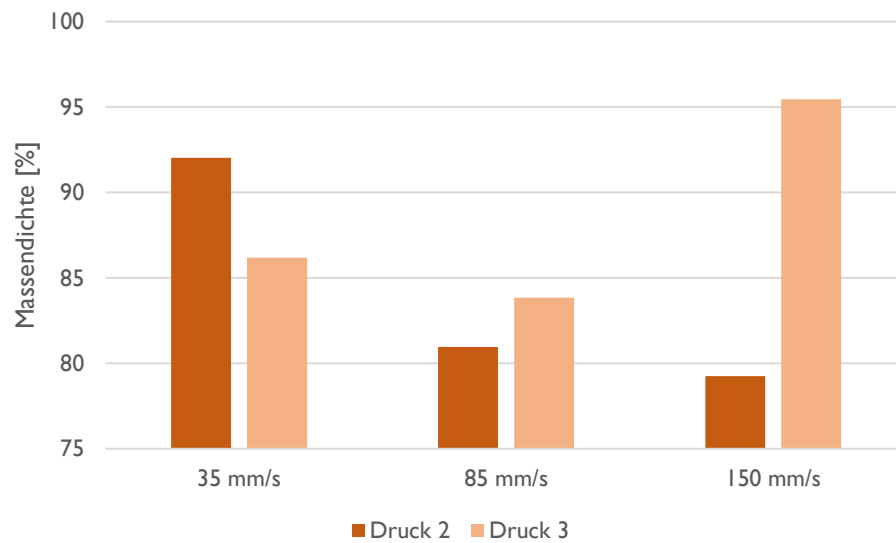


Abbildung 7-26 Vergleich Druck 2 und Druck 3

Prozessparametern gefertigt wurden. So liegt die Massendichte der in Druck 3 mit 150 mm/s gefertigten Proben mehr als 16 % über der Dichte, die mit gleichen Parametern in Druck 2 gefertigt wurden. Dies zeigt, dass die Reproduzierbarkeit des Prozesses nicht gewährleistet ist. Die Gründe hierfür können verschieden sein. Ein Faktor, der Auswirkungen haben kann, ist das Pulver. Für beide Drucke wird zwar Pulver aus der gleichen Pulverbestellung genutzt, allerdings werden die Proben in einem zeitlichen Abstand von mehreren Tagen gefertigt. Obwohl der Pulverbehälter luftdicht verschlossen ist, wird er zur Pulverentnahme für kurze Zeit geöffnet, was zu einem Austausch der Luft im Behälter führt. Eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Pulver ist daher nicht ausgeschlossen.

Da die Dichten deutlich unterhalb von 100 % liegen, sind nur niedrige Werte für die mechanisch-technologischen Eigenschaften der, mit denselben Parametern gefertigten, Zugproben zu erwarten.

Zugversuch

Die mit einer Scangeschwindigkeit von 35 mm/s gefertigten Zugproben weisen Verfärbungen in dem Bereich auf, an dem sich die Breite von 6 mm auf 20 mm erhöht. Die Verfärbung ist in Abbildung 7-27 durch einen roten Pfeil gekennzeichnet.

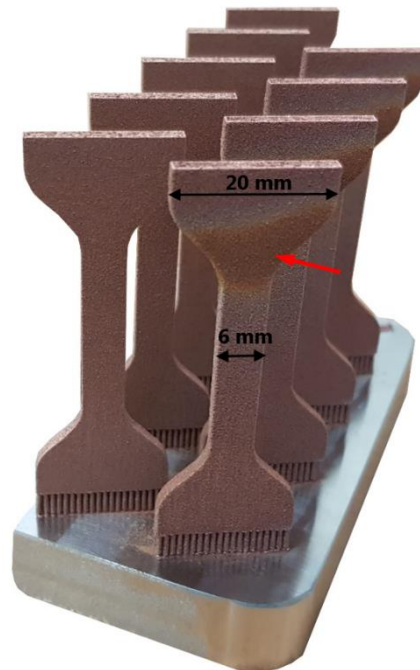


Abbildung 7-27 Verfärbung der Zugproben

Als Grund für die Verfärbung ist eine zu hohe Volumenenergiedichte bei zu geringer Wärmeabfuhr anzunehmen. Der hohe Energieeintrag auf einer Fläche, die mit 40 mm^2 mehr als dreimal größer ist als die Fläche, welche sie mit der Bauplatte verbindet (12 mm^2), führt dazu, dass die Energie, in Form von Wärme, nicht schnell genug abgeführt werden kann. Ob und wie weit dies Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften hat, ist im Zugversuch zu beobachten. Sollten die Proben an den verfärbten Stellen brechen, so ist eine Verschlechterung der Eigenschaften aufgrund der hohen Energiedichte anzunehmen. Bei den mit 150 mm/s gefertigten Proben sind keine Verfärbungen zu erkennen.

Die beim Zugversuch entstehenden Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in Abbildung 7-28 zu erkennen. Es sind fünf Kurven für Proben, welche mit 150 mm/s gefertigt wurden, und vier Kurven für Proben, welche mit 35 mm/s gefertigt wurden, vorhanden. Um den Verlauf der Kurven bewerten zu können ist mit Abbildung 7-29 ein Vergleich gegeben. Es ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines spröden Werkstoffs und das Spannungs-Dehnungsdiagramm eines duktilen Metalls ohne ausgeprägte Streckgrenze zu sehen. Kupfer,

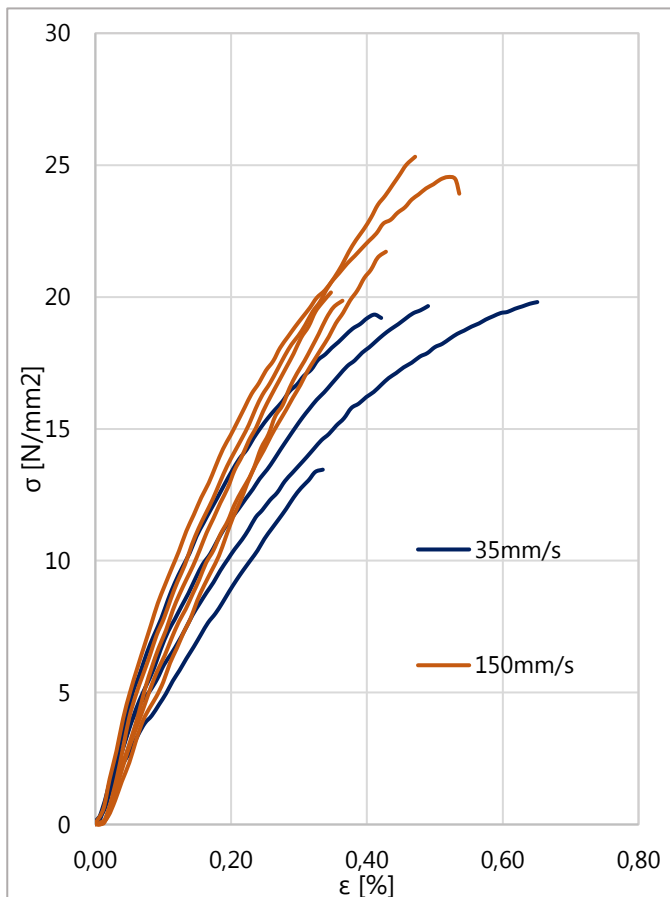


Abbildung 7-28 Spannungs-Dehnungs-Kurven für 35 mm/s und 150 mm/s

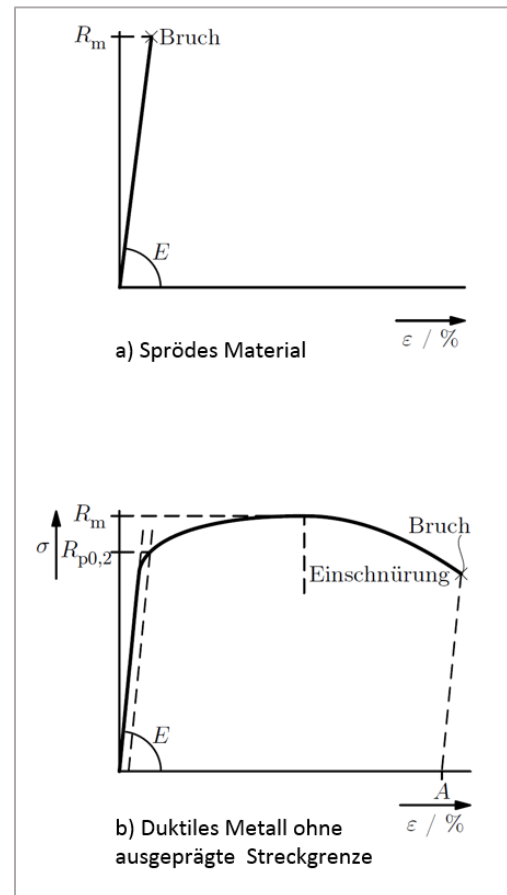


Abbildung 7-29 Vergleich Spannungs-Dehnungs-Diagramme [31]

welches als reines Metall keine ausgeprägte Streckgrenze besitzt, ist als das zweite einzuordnen. [47] Die erzeugten Spannungs-Dehnungs-Kurven sind allerdings für beide Scangeschwindigkeiten eher dem ersten zuzuordnen, da es bei den Proben keinen Bereich der plastischen Verformung gibt. Die erstellten Proben weisen also eher die mechanisch-technologischen Eigenschaften eines spröden Werkstoffs auf. Tabelle 7-2 sind die Zugfestigkeiten der einzelnen Zugproben aufgezeigt.

Tabelle 7-2 Zugfestigkeiten 35 mm/s und 150 mm/s

Zugprobe	35mm/s_1	35mm/s_2	35mm/s_3	35mm/s_4	35mm/s_5	Mittelwert	Stabw
Zugfestigkeit R_m	19,33	13,45	19,81	19,66	-	18,06	2,67
Zugprobe	150mm/s_1	150mm/s_2	150mm/s_3	150mm/s_4	150mm/s_5	Mittelwert	Stabw
Zugfestigkeit R_m	24,55	21,72	19,86	25,32	20,17	22,32	2,24

Mit 150 mm/s gefertigte Zugproben weisen mit 22,32 N/mm² eine höhere Zugfestigkeit auf als die mit 35 mm/s gefertigten Proben, welche eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 18,06 N/mm² haben. Dies stützt die Ergebnisse aus der Dichtepfung.

Die Zugfestigkeiten sind deutlich niedriger als die eigentliche Zugfestigkeit von Reinkupfer. So erreichen die mit 35 mm/s gefertigten Zugproben durchschnittlich ca. 9,0 % und die mit 150 mm/s gefertigten Zugproben ca. 11,2 % der Zugfestigkeit von Reinkupfer.

Die Verfärbungen an den Proben scheinen keinen direkten Einfluss auf die Zugfestigkeit zu haben, da keine der Proben im Bereich der Verfärbungen bricht. Durch die Einspannung der Proben ist eine Stabilisierung der Proben an den verfärbten Stellen allerdings nicht ausgeschlossen, wodurch eine spezifizierte Aussage nicht getroffen werden kann.

Untersuchung der Bruchstellen

Bei der Untersuchung der Bruchstellen wird festgestellt, dass die Bruchflächen für Reinkupfer untypische Färbungen aufweisen. Des Weiteren sind die Verfärbungen der zwei Flächen desselben Bruchs von der Farbgebung her unterschiedlich. Eine der mit 35 mm/s gefertigten Zugproben nach dem Zugversuch ist in Abbildung 7-30 zu sehen. Die beiden Seiten werden für eine bessere Übersicht als Seite A und Seite B bezeichnet.

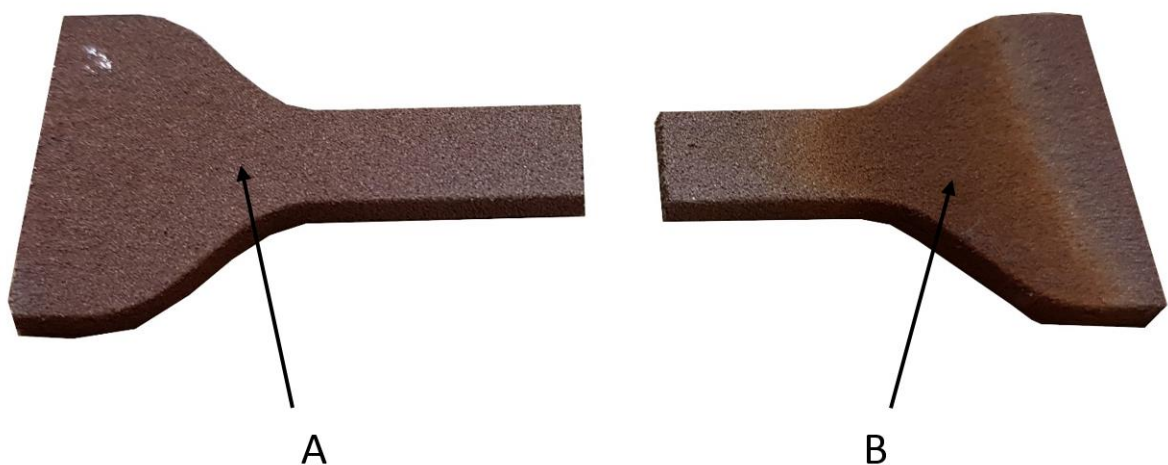


Abbildung 7-30 Zugprobe nach dem Zugversuch: Seite A und Seite B

Eine Untersuchung der Bruchflächen mittels Lichtmikroskopie, siehe Abbildung 7-31 und Abbildung 7-32, macht deutlich, dass es sich bei den Farben um Anlauffarben handelt. Anlauffarben entstehen durch Interferenzen des Lichts beim Durchgang durch dünne Schichten, in diesem Fall Oxidschichten. [48] Auffällig ist die unterschiedliche Farbgebung der beiden Bruchflächen, da diese in der Zugprobe als Schichten übereinanderlagen.

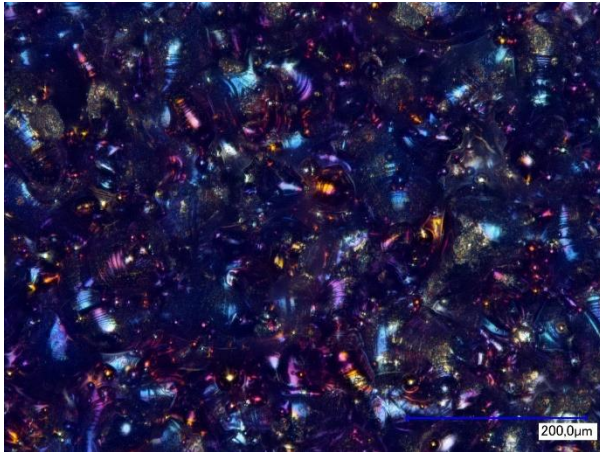


Abbildung 7-31 Lichtmikroskopaufnahme, 500-fache Vergrößerung, Glanzunterdrückt, Bruchfläche Seite A

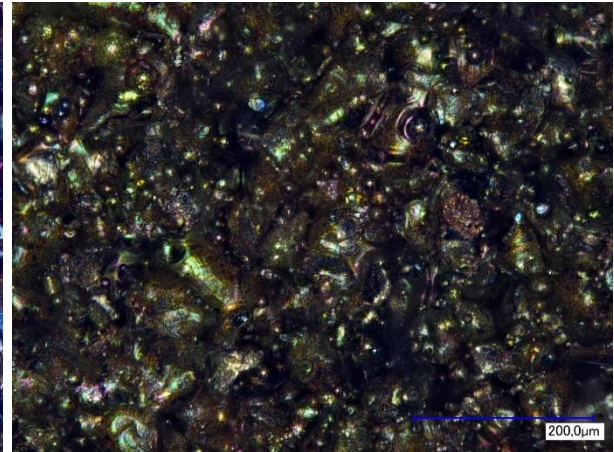


Abbildung 7-32 Lichtmikroskopaufnahme, 500-fache Vergrößerung, Glanzunterdrückt, Bruchfläche Seite B

Da beim SLM-Prozess die aufeinander aufbauenden Schichten eigentlich miteinander verschmelzen, können sich keine zwei benachbarten Schichten bilden, die eine verschiedene Farbgebung aufweisen. Dadurch, dass die Farben durch Oxidschichten gebildet werden, ist eine Diskrepanz zwischen den Sauerstoffgehalten der beiden Schichten zu vermuten. Da der Bruch genau zwischen den beiden Schichten stattfand ist der Zusammenhalt innerhalb der jeweiligen Schicht deutlich höher als der Zusammenhalt zwischen den Schichten.

Um nachzuweisen, dass die beiden im Bauteil aufeinanderliegenden Schichten sich tatsächlich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden wird eine EDX-Analyse der beiden Flächen durchgeführt. Es wird jeweils an zehn verschiedenen Stellen der Bruchfläche die chemische Zusammensetzung bestimmt. Die durchschnittlichen Massenanteile der einzelnen Elemente sind in Tabelle 7-3 aufgezeigt.

Tabelle 7-3 Chemische Zusammensetzung Bruchfläche A und Bruchfläche B

	Bruchfläche A	Stabw	Bruchfläche B	Stabw
Massenanteil Cu [%]	82,12	5,56	88,88	3,28
Massenanteil O [%]	14,86	4,46	9,23	2,98
Massenanteil C [%]	3,02	1,34	2,29	0,93

Neben Kupfer und Sauerstoff wurden geringe Anteile Kohlenstoff gefunden. Der Ursprung des Kohlenstoffs ist unbekannt und wurde bei der EDX-Analyse des Pulvers nicht festgestellt. Der Sauerstoffgehalt liegt für beide Bruchflächen über 9 %. Für Bruchfläche A liegt er sogar bei nahezu 15 %. Die hohen Sauerstoffgehalte bestätigen, dass es sich bei den Verfärbungen um Anlauffarben handelt. Die Massenanteile der beiden Bruchflächen unterscheiden sich für Kupfer um 6,76 % und für Sauerstoff um 5,63 %. Mit einem t-Test wird bestätigt, dass die

Kupfer- und Sauerstoffanteile der beiden Bruchflächen sich signifikant voneinander unterscheiden. Die chemische Zusammensetzung der beiden Flächen ist somit nachweislich verschieden. Die sich signifikant voneinander unterscheidenden Sauerstoffgehalte der beiden Flächen erklären die unterschiedlichen Anlauffarben. Wodurch die unterschiedlichen Sauerstoffgehalte entstehen ist allerdings unklar. Alle Messergebnisse und die Ergebnisse des t-Testes sind in Anhang A2 beigefügt.

Neben der EDX-Analyse wird ebenfalls eine Untersuchung der Bruchflächen mit dem REM durchgeführt. In Abbildung 6-33 ist die Bruchfläche einmal mit 380-facher und einmal mit 4900-facher Vergrößerung zu sehen. Es ist erkennbar, dass es sich bei der Bruchfläche nicht um eine aufgeschmolzene Schicht handelt. Vielmehr wurde eine Vielzahl kleiner aufgeschmolzener Körper erzeugt, welche nur bedingt miteinander verbunden sind. Schmelzbahnen sind nicht zu erkennen. Einzelne nicht aufgeschmolzene Körner haften an den aufgeschmolzenen Bereichen.

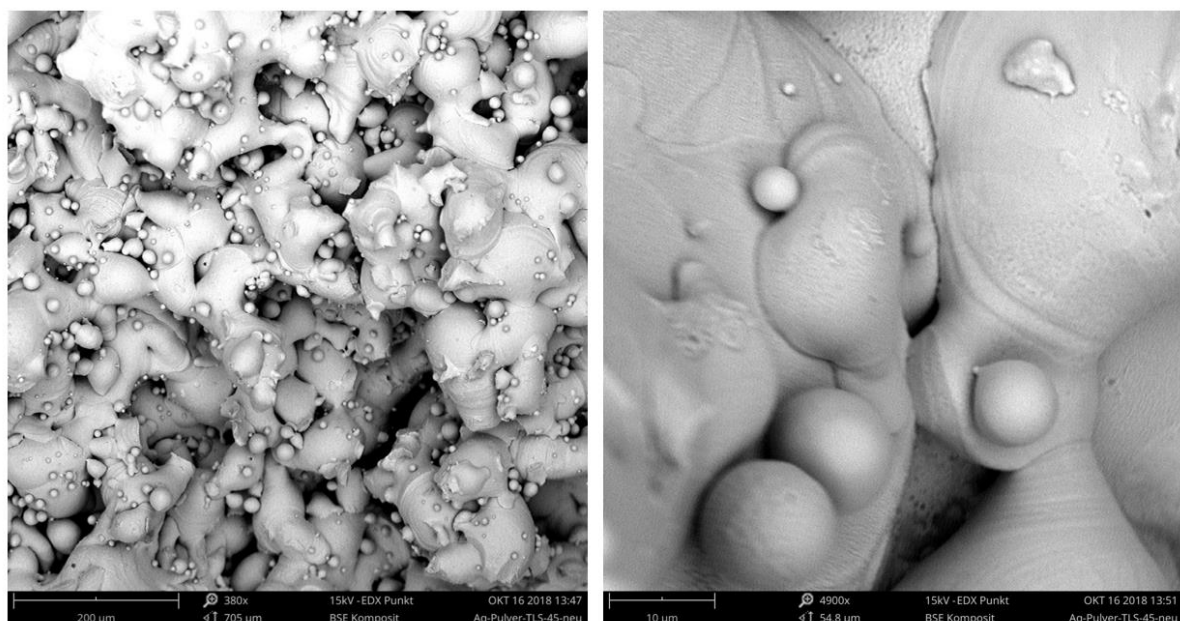


Abbildung 7-33 REM-Aufnahmen Bruchfläche mit 380-facher (links) und 4900-facher (rechts) Vergrößerung
Die Zugproben sind demnach als stark porös zu bewerten.

7.6.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung weichen für gleiche Prozessparameter stark von den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Dichtebestimmungen ab. Da die Wiederholpräzision für

das Messmittel sehr hoch ist, werden die Messergebnisse als zutreffend bewertet. Somit ist die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften eines Bauteils aus Kupfer, mit den genutzten Parametern, bei der Herstellung mit SLM nicht gewährleistet. Mit einem nicht Erreichen von Reproduzierbarkeit ist hier gemeint, dass bei Benutzung gleiche Prozessparameter verschiedene Ergebnisse erzielt werden.

Außerdem wird die höchste Dichte bei den mit der höchsten Scangeschwindigkeit gefertigten Proben nachgewiesen, was der Theorie widerspricht, dass eine hohe Volumenenergie zu einer hohen Bauteildichte führt. Die Ergebnisse der Dichtebestimmung werden von den Ergebnissen des Zugversuchs bestätigt. Auch hier weisen die Zugproben, welche mit hoher Scangeschwindigkeit gedruckt wurden, höhere Werte für die Zugfestigkeit auf.

Sowohl der Zugversuch, als auch die Untersuchung mit dem REM zeigen, dass es sich bei den Proben um sprödes Material handelt. Das Pulver wurde nicht zu Schmelzbahnen verschmolzen. Eine Ursache können Fehlstellen in den unteren Schichten sein, welche zu einem immer fehlerbehafteteren Gefüge führen. So wird durch das Auftreten von Fehlstellen die Wärmeableitung gestört. Die Fehlstellen könnten sich damit negativ auf die Schichtbildung der darüber liegenden Schichten auswirken, siehe Abbildung 7-34.

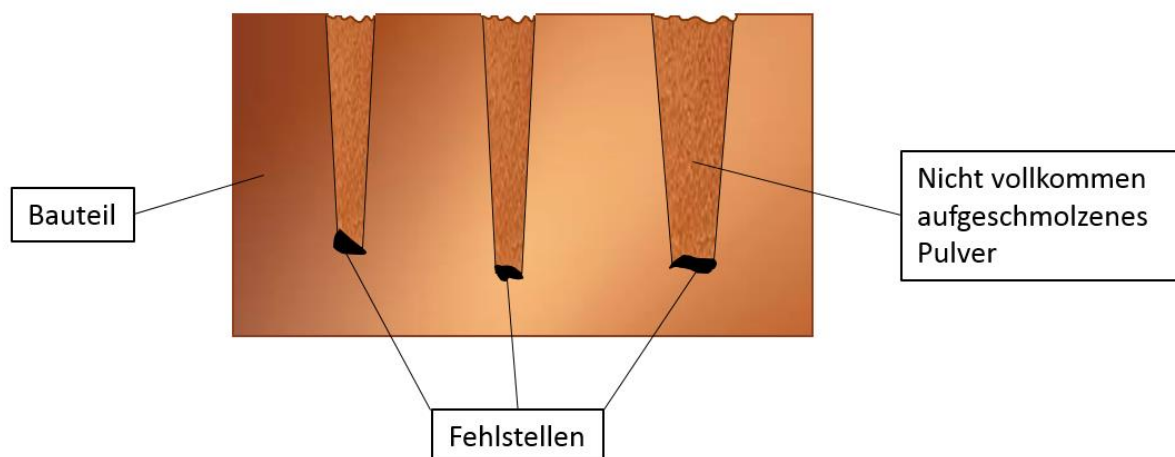


Abbildung 7-34 Fehlstellen im Gefüge

Zwar haben die Fehlstellen in den unteren Schichten keine großen Auswirkungen, allerdings wird das Bauteil mit zunehmender Anzahl Schichten immer poröser und fehlerbehafteter. Somit wären die Gefügeeigenschaften bei Bauteilen aus mehr Schichten schlechter. Das würde

erklären, warum dieses poröse Gefüge nur bei den Zugproben und nicht bei den Dichtequader auftritt.

Des Weiteren weisen die Bruchflächen der geprüften Zugproben Anlauffarben auf, welche auf den hohen Sauerstoffgehalt an den Bruchflächen zurückzuführen ist. Bei den zwei Bruchflächen desselben Bruchs sind verschiedene Anlauffarben zu finden. Grund hierfür ist die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der beiden Bruchflächen. Warum sich die chemische Zusammensetzung bei den Bruchflächen unterscheidet kann nicht genau bestimmt werden.

7.7 Zugproben mit erhöhter Scangeschwindigkeit

7.7.1 Versuchsaufbau

Da die Dichte und Zugfestigkeit für die Proben, die mit hoher Scangeschwindigkeit gefertigt wurden, am größten sind, werden Zugproben mit noch höheren Scangeschwindigkeiten erstellt. Ziel ist es herauszufinden, ob die für unsere Parameter optimale Scangeschwindigkeit oberhalb der bisher geprüften Scangeschwindigkeiten liegt.

Hierfür werden mit Scangeschwindigkeiten von 100 mm/s bis 500 mm/s jeweils vier Zugproben pro Scangeschwindigkeit gefertigt.

7.7.2 Auswertung

Bei keiner der Zugproben sind Verfärbungen zu sehen.

Die Ergebnisse des Zugversuchs sind in Abbildung 7-35 dargestellt. Die mit einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s gefertigten Proben weisen mit 37,4 N/mm² die höchste

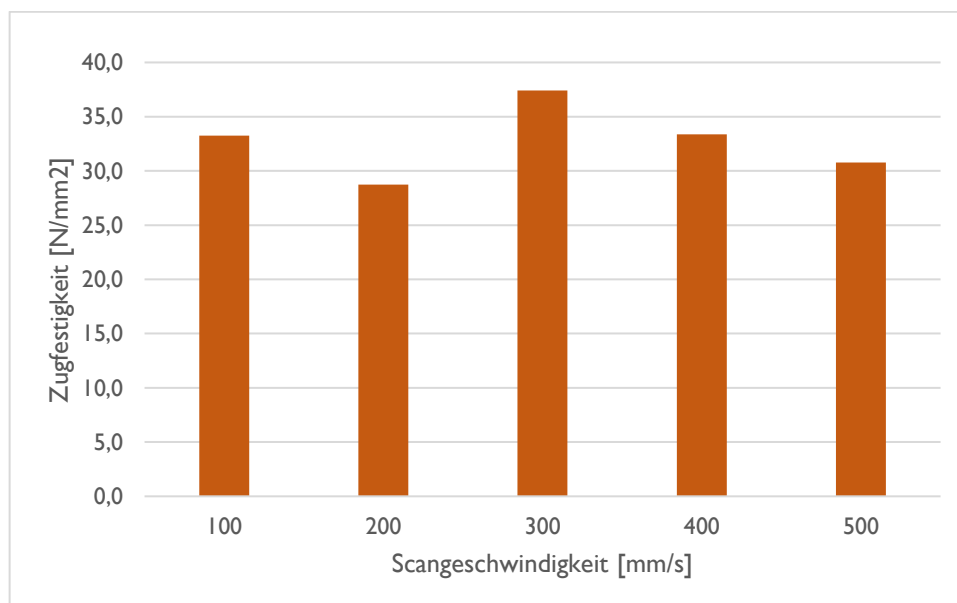


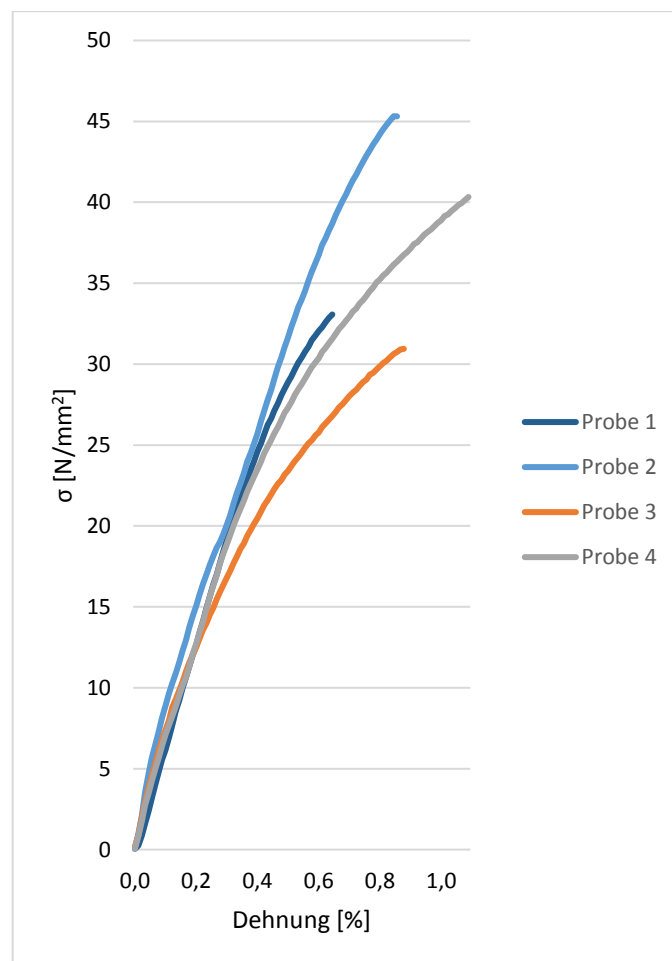
Abbildung 7-35 Zugfestigkeit bei verschiedenen Scangeschwindigkeiten

durchschnittliche Zugfestigkeit auf. Dies entspricht etwa 18,7 % der Zugfestigkeit von Kupfer. In Tabelle 7-4 sind die Zugfestigkeiten mit den jeweiligen Standardabweichungen aufgezeigt. Die durchschnittlich erreichte Zugfestigkeit liegt bei 32,7 N/mm², während die durchschnittliche Standardabweichung 4,3 N/mm² beträgt. Die durchschnittliche prozentuale Standardabweichung liegt somit bei ca. 13 % und ist damit als hoch zu bewerten.

Tabelle 7-4 Ergebnisse Zugversuch für verschiedene Scangeschwindigkeiten

Scangeschwindigkeit [mm/s]	100	200	300	400	500
Zugfestigkeit [N/mm ²]	33,2	28,7	37,4	33,4	30,8
Standardabweichung [N/mm ²]	4,1	3,2	5,7	1,1	7,5

Die Spannungsdehnungskurven in Abbildung 7-36 verdeutlichen die hohe Standardabweichung. So werden bei Probe 2 Zugfestigkeiten von 45,3 N/mm² erreicht, während Probe 3 eine Zugfestigkeit von 30,95 N/mm² aufweist.

**Abbildung 7-36** Spannungs-Dehnungs-Kurven für die mit 300 mm/s hergestellten Proben

Eine hohe Standardabweichung bedeutet hier, dass obwohl dieselben Parameter und das gleiche Pulver benutzt wird, die Ergebnisse einer Zugprobe nicht reproduzierbar sind. Grund hierfür ist das poröse und ungleichmäßige Gefüge. So ist das Gefüge von Fehlstellen geprägt, welche die Zugfestigkeit einer Zugprobe herabsetzen. Je nach Größe und Verteilung der Fehlstellen können bestimmte Bereiche mehr oder weniger als andere betroffen sein. An diesen Stellen ist die für einen Bruch notwendige Spannung niedriger.

Aufgrund der hohen Standardabweichung ist eine Aussage über den Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit schwierig. Zwar haben die bei 300 mm/s hergestellten Proben die höchste durchschnittliche Zugfestigkeit, allerdings sind die Unterschiede hier nicht signifikant. Eine Prüfung mithilfe eines t-Testes zeigt, dass selbst bei den Proben deren Zugfestigkeiten am weitesten voneinander entfernt ist (300 mm/s zu 200 mm/s), kein signifikanten Unterschied nachgewiesen werden kann.

8 Fazit und Ausblick

Nachfolgend werden die durch die durchgeführten Versuche gewonnenen Erkenntnisse zunächst noch einmal zusammengefasst. Daraufhin wird das Ergebnis in einem Fazit bewertet und abschließend wird auf weitere Versuchsmöglichkeiten eingegangen.

8.1 Zusammenfassung

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde die Machbarkeit des Selektiven Laserschmelzens von Kupfer an einer SLM-Anlage mit einer maximalen Laserleistung von 100 Watt geprüft.

Hierfür wurden verschiedene Studien zu dem Thema betrachtet und, mithilfe der in diesen Studien für den SLM-Prozess genutzten Parameter, eine notwendige Energiedichte zum Erreichen einer Massendichte von 88 % bestimmt. Ausgehend von dieser Energiedichte wurden die Parameter auf die vorhandene Laserleistung von 100 Watt angepasst. Hierfür wurden die Schichtdicke und die Scangeschwindigkeit in Anpassung an die Studien verringert. Da die Scangeschwindigkeit die größten Auswirkungen auf die erzeugbare Volumenenergiedichte hat, wurde versucht über eine Variation der Scangeschwindigkeit eine möglichst hohe Dichte zu erzeugen.

Bei der Prüfung des Pulvers wurde festgestellt, dass ein hoher Sauerstoffgehalt vorhanden ist. Dies ist vermutlich auf die Lagerung und große Oberfläche des Pulvers zurückzuführen. So wurde das Pulver in einem deutlich zu großen Behälter geliefert, welcher einen großen mit Luft gefüllten Raum aufweist. Bei jeder Entnahme gelangt neue Luft in den Behälter. Die große Oberfläche des Pulvers bietet eine große Angriffsfläche für Sauerstoff und unterstützt somit eine Oxidation. Ansonsten weist das Pulver sowohl in der Korngrößenverteilung als auch in seiner Morphologie die erwünschten Eigenschaften auf.

Bei der Untersuchung der notwendigen Stützstrukturen wird deutlich, dass eine Verringerung der Stützstrukturen, zur Erhöhung der im Material verbleibenden Energie, nicht möglich ist. So kommt es bei wenigen Stützenstrukturen aufgrund der fehlenden Stützwirkung und Wärmeableitung zu Aufbaufehlern und einem sehr porösen und von Fehlstellen geprägten Gefüge.

Im Rahmen experimenteller Versuche konnte nicht mit Bestimmtheit nachgewiesen werden, dass eine Korrelation zwischen Scangeschwindigkeit und Bauteildichte besteht. Grund hierfür ist die geringe Reproduzierbarkeit der Probeneigenschaften bei den Versuchen. So wurden für zwei Sätze Proben, welche mit einigen Tagen Abstand und den gleichen Parametern gefertigt wurden, signifikant voneinander abweichende Dichten erzeugt. Des Weiteren weisen die, in einem Druck mit denselben Parametern, hergestellten Zugproben so hohe Abweichungen in ihrer Zugfestigkeit auf, dass beim Vergleich mit Zugproben, welche mit anderen Parameter gefertigt werden, nicht signifikant nachgewiesen werden kann, dass es Unterschiede bei den Zugfestigkeiten gibt.

Bei den Zugproben wird an den Bruchflächen außerdem ein stark poröses Gefüge nachgewiesen. Das Material ist nicht zu Schichten mit einem homogenen Gefüge verschmolzen. Stattdessen wurde das Pulver beim SLM-Prozess zu einer Vielzahl kleinerer Kupferpartikel verschmolzen, welche miteinander nur einen sehr geringen Verbund aufweisen. Neben der Porosität werden hohe Sauerstoffgehalte in den Bruchflächen der Proben nachgewiesen. Diese werden in Form von Anlauffarben als Oxidschichten sichtbar. Auffällig sind hier die signifikant verschiedenen Sauerstoffgehalte von zwei zuvor übereinanderliegenden Schichten. Wodurch die verschiedenen Sauerstoffgehalte zustande kommen, kann im Zuge dieser Arbeit nicht bestimmt werden. Es wird ein Zusammenhang zwischen der Temperatur der Schmelze beim Schichtaufbau und den Sauerstoffgehalten vermutet.

Als Grund für die niedrige Reproduzierbarkeit wird das poröse, nicht vollkommen verschmolzene Gefüge angenommen.

Die höchste im Verlauf dieser Arbeit gemessene Dichte beträgt 95,5 %, während die zugehörigen Zugproben nur eine Zugfestigkeit aufwiesen, welche 11,2 % der Zugfestigkeit von Kupfer entspricht. Hierbei ist die Messabweichung der hydrostatischen Waage von zwei Prozent zu beachten. Die Diskrepanz zwischen Dichte und Zugfestigkeit kann durch die deutlich höhere Anzahl von Schichten bei den Zugproben erklärt werden, da hier die Chance für aus Fehlstellen resultierende Aufbaufehler deutlich höher ist.

Während dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde festgestellt, dass einige der genutzten Messmethoden für die gefertigten Kupferproben nicht geeignet sind. So ist beim

Lichtmikroskop bei senkrechtem Strahleinfall eine unzureichende Sichtbarkeit der Fehlstellen zu vermerken. Des Weiteren decken sich die Aufnahmen von REM und Lichtmikroskop häufig nicht. So sind bei einer Betrachtung durch das REM mehr Fehlstellen und ein poröseres Gefüge zu erkennen.

8.2 Fazit

In dieser Arbeit ist es gelungen einen Zusammenhang zwischen Stützstrukturen und Gefügedichte nachzuweisen. Nicht gelungen ist es allerdings die Bauteildichte und Zugfestigkeiten mit der einbringbaren Energiedichte in Verbindung zu setzen. Grund hierfür ist die geringe Reproduzierbarkeit der Probeneigenschaften, sowohl bei den in einem Druck gefertigten, wie auch bei den in verschiedenen Drucken gefertigten Proben.

Es konnte nicht bestimmt werden, ob durch das Selektive Laserschmelzen von Kupfer an einer SLM-Anlage mit 100 Watt Laserleistung reproduzierbar dichte Bauteile gefertigt werden können. Zwar wurden Dichten von bis zu 95,5 % gemessen, allerdings ist eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durch das Verwenden des gleichen Parametersatzes nicht gewährleistet.

Um eine wirkliche Aussage treffen zu können, müsste zunächst die Reproduzierbarkeit des Prozesses verbessert werden.

8.3 Ausblick

Da die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften die größte Herausforderung darstellt, sind für weiterführende Versuche zunächst Anpassungen bei der Prozessvorbereitung und Versuchsdurchführung sowie dem Versuchsauswertungen vorzunehmen. Im Folgenden werden Empfehlungen für diese Anpassungen aufgeführt.

8.3.1 Messmethoden

Für Kupfer stellten sich einige der genutzten Messmethoden als kritisch heraus. Um wirklich quantifizierbare Aussagen über die Korrelation zwischen Massendichte der Bauteile und den Prozessparametern treffen zu können, sind zunächst die Messmittel als wirklich geeignet zu bewerten. Eine Anpassung der Messmethoden für, durch SLM-gefertigte, Kupferproben ist bei den folgenden Messmitteln von Bedeutung

- *Lichtmikroskop*: Die Bewertung des Kupfergefüges mit dem Lichtmikroskop stellte sich als unzureichend heraus. Um die Fähigkeit des Lichtmikroskops zur Kupfergefügebestimmung besser bewerten zu können, können angeätzte und nicht angeätzte Gefügeproben sowohl mit dem REM als auch dem Lichtmikroskop untersucht werden. Durch den gezielten Vergleich der Ergebnisse können Rückschlüsse über die Eignung des Lichtmikroskops gezogen werden.
- *Hydrostatische Waage*: Die Messabweichung von zwei Prozent bei der hydrostatischen Waage wurde für diese Arbeit als hinnehmbar angesehen. Um genauere Angaben über die Dichte der Proben machen zu können, ist die Messabweichung zu reduzieren.
- *EDX-Analyse*: Die EDX-Analyse kann bei der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung keine genaue Aussage darüber treffen, wie groß der Anteil der leichten Elemente, wie zum Beispiel Sauerstoff, ist. Da sich der Sauerstoffanteil als einer der wichtigsten Prozessparameter erwiesen hat, ist die EDX-Analyse als unzureichende Methode zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Pulver und Bauteilen zu bewerten. Eine alternative Methode ist anzuwenden.

8.3.2 Prozess

Während dieser Arbeit traten einige Fragen auf, die zurzeit nicht beantwortet werden können. Hierfür fehlen Informationen über verschiedene Aspekte des Prozesses und der Prozessvorbereitung. Besonders die Pulveraufbewahrung und die Vorgänge bei der Schichterzeugung sind hier von Bedeutung:

- *Pulveraufbewahrung*: Durch die Erkenntnisse dieser Arbeit vor allem bezüglich der hohen Sauerstoffanteile im Pulver und den Bauteilen, ist die Lagerungsmethode des Pulvers als unzureichend zu bewerten. Die Aufbewahrung des gesamten Pulvers in einem Behälter führt zu einer Kontamination des Pulvers mit Luft bei jeder Entnahme von Pulver. Eine Möglichkeit dies zu verhindern wäre das Pulver direkt nach Lieferung in Beutel abzupacken und diese unter Erzeugung eines Vakuums zu verschließen. Für das Beutelvolumen bietet sich das Volumen der Pulverkammer an. So wäre eine nachfolgende Oxidation durch Luft deutlich eingeschränkt. Des Weiteren ist vor jedem Druck eine Messung des Sauerstoffgehaltes zu empfehlen um die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes über die Zeit zu quantifizieren.
- *Vorgänge bei der Schichterzeugung*: Des Weiteren könnte eine optische Überwachung des Bauraums Aufschluss über die Auswirkungen von früh im Prozess entstehenden Aufbaufehlern und Fehlstellen geben. Darüber hinaus wäre wärmebildgebende Sensorik, zur Bestimmung und Auswertung der Wärmeverteilung und Ableitung, sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [1] H. A. Richard, B. Schramm und T. Zipsner, Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [2] D. Becker , Selektives Laserschmelzen von Kupfer und Kupferlegierungen, Aachen: Aprimus Verlag, 2014.
- [3] J. Gobrecht, Werkstofftechnik - Metalle, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2009.
- [4] J. Ruge und H. Wohlfahrt, Technologie der Werkstoffe, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [5] F. Klocke, Fertigungsverfahren 5 - Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [6] C. Burkhardt, Metallpulverspritzguss, München: Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2013.
- [7] B. d. D. Gießerei-Industrie, „Konstruieren und Gießen - Informationen für den Konstrukteur und Gussanwender,“ 2009. [Online]. Available: <https://www.kug.bdguss.de/giessverfahren-inhalte/lost-foam-verfahren/>. [Zugriff am 24 08 2018].
- [8] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, „Lost Foam-Verfahren: Grenzenlose Gestaltungsfreiheit aus einem Guss,“ 20 10 2013. [Online]. Available: https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Archiv/2013/Lost_Foam_Verfahren.html. [Zugriff am 24 08 2018].
- [9] GussStahl Lienen, „Lost foam - an advantageous casting process,“ [Online]. Available: <https://www.gsl-lienen.de/en/lost-foam/lost-foam-an-advantageous-casting-process/lost-foam-an-advantageous-casting-process.html>. [Zugriff am 28 08 2018].
- [10] A. Havermann, „Verlorene Styropor-Modelle für die Gussteilfertigung,“ 25 10 2008. [Online]. Available: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/verlorene-styropor-modelle-fuer-die-gussteilfertigung-a-151588/>. [Zugriff am 28 08 2018].
- [11] A. Gebhardt, Additive Fertigungsverfahren, München: Carl Hanser Verlag, 2016.

- [12] N. Hopkins, R. Hague und P. Dickens, Rapid Manufacturing, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [13] A. H. Fritz und G. Schulze, Fertigungstechnik, Berlin: Springer Verlag, 2010.
- [14] R. Poprawe, Lasertechnik für die Fertigung, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [15] Y. Tang, H. Loh und Y. Wong, „Direct laser sintering of a copperbased alloy for creating three-dimensional metal parts,“ *Journal of Material Processing Technology*, Bd. 140, pp. 314-317, 2003.
- [16] R. Lachmeyer und R. B. Lippert, Additive Manufacturing Quantifiziert, Berlin: Springer Verlag, 2017.
- [17] R. Kremer, *Einflussuntersuchung der Prozessparameter hinsichtlich der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften beim Selektiven Laserschmelzen mit 1.4404 Pulver*, 2018.
- [18] I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, New York: Springer Science+Business Media, 2015.
- [19] M. Kumke, Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018.
- [20] J. Kranz, Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen, Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [21] H. Briehl, Chemie der Werkstoffe, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [22] B. Ilschner und R. F. Singer, Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [23] W. Weißbach, M. Dahms und C. Jaroschek, Werkstoffe und ihre Anwendungen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [24] H.-J. Bargel und G. Schulze, Werkstoffkunde, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [25] Chemie.de, „Elektrische Leitfähigkeit,“ [Online]. Available: http://www.chemie.de/lexikon/Elektrische_Leitf%C3%A4higkeit.html. [Zugriff am 18.09.2018].
- [26] E. Hornbogen und H. Warlimont, Metalle - Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [27] G. Schulze, Die Metallurgie der Schweißens, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010.

- [28] M. Frede, „Neue Prozesssicherheit durch Vorpulslaser,“ 23.02.2012. [Online]. Available: <https://www.maschinenmarkt.ch/neue-prozesssicherheit-durch-vorpulslaser-a-353131/>. [Zugriff am 20.10.2018].
- [29] ConceptLaser, „Maschinen,“ [Online]. Available: <https://www.concept-laser.de/produkte/maschinen.html>. [Zugriff am 31.10.2018].
- [30] ConceptLaser, „Mlab cusing / Mlab cusing R“.
- [31] E. Macherauch und H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [32] J. Bauch und R. Rosenkranz, *Physikalische Werkstoffdiagnostik*, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2017.
- [33] PhenomWorld, „Phenom Pro X,“ 2015. [Online]. Available: https://www.phenom-world.com/downloads/specification_sheets/Product-SpecSheet_PROX_LR.pdf. [Zugriff am 01.11.2018].
- [34] M. Procop, „Röntgenmikrobereichsanalyse im Rasterelektronenmikroskop,“ Berlin, 2014.
- [35] Maschinenbau-Wissen.de, „Der Zugversuch,“ [Online]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/24-zugversuch>. [Zugriff am 24.10.2018].
- [36] Houben-Weyl, *Methods of Organic Chemistry*, Bd. 3, Nr. 4, pp. 180 - 182, 1955.
- [37] ConceptLaser, „Werkstoffe,“ [Online]. Available: <https://www.concept-laser.de/produkte/werkstoffe.html>. [Zugriff am 16.10.2018].
- [38] P. Beiss, *Pulvermetallurgische Fertigungstechnik*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [39] Schlenk, „Kupfer- und Kupferlegierungspulver,“ [Online]. Available: https://www.schlenk.com/fileadmin/editorsCMS/uploads/PDF/BU_MM_4_Kupfer_de.pdf. [Zugriff am 16.10.2018].
- [40] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 3405 Blatt 2,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [41] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso und M. Lobardi, *Selective laser melting of chemical pure copper*, 2017.
- [42] P. Lykov, E. Safonov und A. Akhmedjanov, *Selective Laser Melting of Copper*, Schweiz: Trans Tech Publications, 2016.

- [43] L. N. Carter, C. Martin, P. J. Withers und M. M. Attallah, *The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy*, Elsevier B.V., 2014.
- [44] T.-T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, K. Imai und H. Kyogoku, *Selective Laser Melting of Pure Copper*, Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017.
- [45] Hochschule Bremen, „Einführung in die Metallographie,“ [Online]. Available: http://www.hs-bremen.de/internet/hsb/struktur/mitarbeiter/schubert/lehveranstaltungen/fert/unterlagen_labor/metallographie_fert.pdf. [Zugriff am 24 10 2018].
- [46] E. Dietrich und A. Schulze, *Eignungsnachweis von Prüfprozessen*, München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [47] K. Dies, *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [48] Deutsches Kupferinstitut, „Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen,“ 2010. [Online]. Available: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Verarbeitung/chemische-Faerbungen.pdf. [Zugriff am 29 10 2018].
- [49] Deutsches Kupferinstitut, „Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen,“ 2000.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Der Pulverspritzgussprozess.....	4
Abbildung 2-2 Lost Foam - Fertiges Bauteil (links) und Positivmodell (rechts) [9]	5
Abbildung 3-1 Prozessablauf Additive Fertigung.....	6
Abbildung 3-2 SLM-Prozesskette [17].....	8
Abbildung 3-3 Einfluss der Anzahl der Dreiecke auf die Modellierung der Oberfläche einer Kugel [11].....	9
Abbildung 3-4 Schematische Darstellung einer SLM-Anlage	10
Abbildung 3-5 Prozessparameter beim Selektiven Laserschmelzen	12
Abbildung 3-6 Prozessparameter.....	13
Abbildung 4-1 Vergleich einiger Leitwerkstoffe für elektrischen Strom. Relative Werte für Reinelemente, Cu = 100 gesetzt (In Anlehnung an [23])	15
Abbildung 4-2 Einfluss von Zusätzen auf die elektrische Leitfähigkeit [49].....	16
Abbildung 5-1 Vergleich einiger Leitwerkstoffe für Wärme und elektrischen Strom. Relative Werte für Reinelemente, Cu = 100 gesetzt (In Anlehnung an [23]).....	18
Abbildung 5-2 Wärmeleitfähigkeit von bereits verarbeiteten und noch nicht verarbeiteten Elementen und Legierungen bei 300 K (In Anlehnung an [2])	18
Abbildung 5-3 Absorptionsgrade verschiedener Metalle bei 1063 nm und senkrechtem Strahleinfall (In Anlehnung an [2]).....	20
Abbildung 5-4 Absorptionsgrad von Silber, Aluminium und Kupfer (in orange) [28]	21
Abbildung 5-5 Absorptionsgrad von Kupfer bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten bei einer Wellenlänge von 1064 nm (In Anlehnung an [2]).....	22
Abbildung 5-6 Zyklus bei der Absorption der Laserstrahlung beim SLM – Prozess (In Anlehnung an [2]).....	23
Abbildung 5-7 Abhängigkeit des Überdeckungsgrades des Laserstrahls mit der Schmelze von der Scangeschwindigkeit.....	24
Abbildung 6-1 „Mlab cusing R“ und Handhabungsstation [29].....	25
Abbildung 6-2 Schematische Darstellung hydrostatische Waage	28
Abbildung 7-1 Verdünnungsverfahren.....	30
Abbildung 7-2 Wasserverdüstes (links) und Gasverdüstes Pulver (rechts) [38].....	31
Abbildung 7-3 Zusammenhang zwischen Korngröße und möglicher Schichtdicke.....	32
Abbildung 7-4 Kupferpulver - 1450fache Vergrößerung	33
Abbildung 7-5 Korngrößenverteilung Kupferpulver	34
Abbildung 7-6 Lichtmikroskopieaufnahme mit ausgemessenen Pulverkörnern	34
Abbildung 7-7 REM-Aufnahme mit EDX-Analysepunkten	35
Abbildung 7-8 EDX-Spektrum Messpunkt 7.....	36
Abbildung 7-9 Prozessablauf Parameterbestimmung.....	37
Abbildung 7-10 Dichte in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte	40
Abbildung 7-11 Energiedichte in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit für Laserleistung = 100 W, Schichtdicke = 25 µm und Spurabstand = 84 µm.....	42
Abbildung 7-12 3D - Skizze des Probekörpers [17]	43

Abbildung 7-13 Dichtequader verschiedener Scangeschwindigkeiten und Stützstrukturen	44
Abbildung 7-14 Dichtequader mit 20 (links), 12 (mitte) und 9 (rechts) Stützkegeln.....	45
Abbildung 7-15 Schlibfbilder Dichtequader (Oberseite) mit verschiedenen vielen Stützstrukturen 100 fache Vergrößerung: 9 (links oben), 12 (rechts oben), 20 (links unten), 25 (rechts unten).....	46
Abbildung 7-16 Vergleich Scangeschwindigkeit: 200 mm/s (1. von links), 150 mm/s (2. von links), 100 mm/s (3. von links), 100 mm/s (3. von links), 50 mm/s (4. von links)	47
Abbildung 7-17 Schlibfbilder Dichtequader (Oberseite) verschiedene Scangeschwindigkeiten, 100 fache Vergrößerung: 50 mm/s (links oben), 100 mm/s (rechts oben), 150 mm/s (links unten), 200 mm/s (rechts unten) .	47
Abbildung 7-18 8 x 8 Dichtequader mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten	49
Abbildung 7-19 Vergleich verschiedener Belichtungen bei 100-facher Vergrößerung. Senkrechter Lichteinfall (links), schräger Lichteinfall (rechts).....	50
Abbildung 7-20 Schlibfbilder: 20 mm/s - 65 mm/s	51
Abbildung 7-21 Schlibfbilder: 85 mm/s - 200 mm/s.....	51
Abbildung 7-22 Dichtebestimmung hydrostatische Waage in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit	52
Abbildung 7-23 Versuchsaufbau Zugproben und Dichtequader	54
Abbildung 7-24 3D-Skizze Zugprobe [17].....	55
Abbildung 7-25 Massendichte bei verschiedenen Scangeschwindigkeiten	56
Abbildung 7-26 Vergleich Druck 2 und Druck 3.....	57
Abbildung 7-27 Verfärbung der Zugproben	58
Abbildung 7-28 Spannungs-Dehnungs-Kurven für 35 mm/s und 150 mm/s	59
Abbildung 7-29 Vergleich Spannungs-Dehnungs-Diagramme [31]	59
Abbildung 7-30 Zugprobe nach dem Zugversuch: Seite A und Seite B	60
Abbildung 7-31 Lichtmikroskopaufnahme, 500-fache Vergrößerung, Glanzunterdrückt, Bruchfläche Seite A.....	61
Abbildung 7-32 Lichtmikroskopaufnahme, 500-fache Vergrößerung, Glanzunterdrückt, Bruchfläche Seite B	61
Abbildung 7-33 REM-Aufnahmen Bruchfläche mit 380-facher (links) und 4900-facher (rechts) Vergrößerung	62
Abbildung 7-34 Fehlstellen im Gefüge	63
Abbildung 7-35 Zugfestigkeit bei verschiedenen Zugfestigkeiten	65
Abbildung 7-36 Spannungs-Dehnungs-Kurven für die mit 300 mm/s hergestellten Proben.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-1 RO GAL Kupferpulver GK – kugelig [39].....	32
Tabelle 7-2 Zugfestigkeiten 35 mm/s und 150 mm/s.....	59
Tabelle 7-3 Chemische Zusammensetzung Bruchfläche A und Bruchfläche B.....	61
Tabelle 7-4 Ergebnisse Zugversuch für verschiedene Scangeschwindigkeiten.....	66

Erklärung über selbständig erbrachte Leistungen

Hiermit versichere ich, dass die von mir vorgelegte Prüfungsleistung selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt wurde.

Alle verwendeten Quellen sind in der Arbeit so aufgeführt, dass Art und Umfang der Verwendung nachvollziehbar sind.

Dortmund, den 02.11.2018

Patrik Adolph

Anhang

A1: Materialanalyse des Pulvers

Messung	Massenanteil [%]		Messung	Massenanteil [%]	
	Kupfer	Sauerstoff		Kupfer	Sauerstoff
1	88,82	11,18	22	94,27	5,73
2	86,55	13,45	23	94,31	5,69
3	86,82	13,18	24	94,54	5,46
4	86,88	13,12	25	95,02	4,98
5	87,07	12,93	26	95,12	4,88
6	87,67	12,33	27	95,28	4,72
7	88,43	11,57	28	95,46	4,54
8	89,29	10,71	29	95,47	4,53
9	89,38	10,62	30	95,66	4,34
10	89,75	10,25	31	95,80	4,20
11	91,14	8,86	32	95,98	4,02
12	91,52	8,48	33	96,11	3,89
13	92,20	7,80	34	96,41	3,59
14	92,30	7,70	35	96,87	3,13
15	92,75	7,25	36	96,95	3,05
16	93,25	6,75	37	96,99	3,01
17	93,28	6,72	38	97,18	2,82
18	93,57	6,43	39	97,70	2,30
19	93,58	6,42	40	97,79	2,21
20	93,66	6,34	41	97,84	2,16
21	93,67	6,33	42	98,24	1,76
			43	98,28	1,72
			Mittelwert	93,57	6,43
			Stabw	2,61	

A2: Materialanalyse der Bruchflächen

Messung	Bruchfläche A			Bruchfläche B		
	Massenanteil [%]					
	Cu	O	C	Cu	O	C
1	88,8	10,52	0,67	96,29	3,2	0,51
2	75,92	21,07	3,01	87,78	12,87	3,35
3	77,72	18,43	3,85	88,86	8,32	2,82
4	83,63	12,8	3,58	87,43	9,2	3,37
5	78,6	17,18	4,22	86,68	10,36	2,95
6	81,07	15,15	3,78	85,86	11,37	2,77
7	80,6	15,92	3,49	85,14	13,16	1,7
8	75,84	19,62	4,55	91,65	6,85	1,5
9	91,69	7,26	1,05	90,59	7,69	1,72
10	87,33	10,68	1,99	88,51	9,32	2,17
Mittelwert	82,12	14,86	3,02	88,88	9,23	2,29
Stabw	5,56	4,46	1,34	3,28	2,98	0,93

	Cu	O	C
t-Tests	0,005	0,004	0,173

A3: Datenträger

Die beiliegende DVD enthält die vorliegende Arbeit.