

# Fachhochschule Dortmund

University of Applied Sciences and Arts

Fachbereich Maschinenbau  
Arbeitsgruppe Chemie, Oberflächentechnik und Korrosion

Bachelorarbeit zum Thema

## **Einflussuntersuchung der Prozessparameter hinsichtlich der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften beim Selektiven Laserschmelzen mit 1.4404 Pulver**

Investigation of the Influence of Process Parameters on Material  
and Surface Properties during Selective Laser Melting of 1.4404  
Powder

Vorgelegt von  
Matrikelnummer

Robert Kremer  
7089853

Prüferin  
Zweitprüferin

Prof. Dr. Tamara Appel  
Vanessa Brügge, M.Eng.

Vorgelegt am

17.07.2018

## Abstract

Due to the increasing importance of selective laser melting the faculty of Maschinenbau of the FH Dortmund conducts research on the improvement and further development in the field of selective metal laser melting.

For a deeper and comprehensive process understanding as well as an efficient parameterization the correlation between process parameters and component characteristics has been examined in this study. The experimental investigations have shown no significant difference between the powder prepared material (316L). By analysing the existing set of parameters the main drivers for the component characteristics has been identified. Furthermore the relation between energy input and structural density has been confirmed.

### Zusammenfassung

Bedingt durch die zunehmende Bedeutung des Selektiven Laserschmelzens wird innerhalb des Fachbereichs Maschinenbau der FH Dortmund an der Weiterentwicklung und Lehre des Selektiven Metall-Laserschmelzens gearbeitet.

Zum Erreichen eines tieferen Prozessverständnisses sowie einer effizienteren Parametrisierung werden in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Bauteileigenschaften untersucht. Dabei wurde im Rahmen experimenteller Versuche kein signifikanter Unterschied zwischen neuem und aufbereitetem Ausgangsmaterial (1.4404 Pulver) detektiert. Durch die Analyse der vorhandenen Parametersätze wurden die Haupteinflussfaktoren für die Bauteileigenschaften identifiziert. Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Schmelzspurbreite sowie die Korrelation zwischen Energieeintrag und Gefügedichte bestätigt.

## Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelzeichen.....	VII
1 Anlass und Ziel.....	8
2 Additive Fertigung.....	9
2.1 Einsatzgebiete der additiven Fertigung .....	13
2.2 Selektives Laserschmelzen.....	14
2.2.1 Von der Konstruktion zum fertigen Bauteil .....	15
2.2.2 Gefügeentwicklung beim Selektiven Metall-Laserschmelzen.....	16
2.2.3 Thermisch induzierte Eigenspannungen.....	18
2.2.4 Einfluss der schichtweisen Generierung.....	21
2.2.5 Supportstrukturen .....	23
2.2.6 Vor- und Nachteile des selektiven Laserschmelzens.....	25
3 Einflussgrößen beim Selektiven Laserschmelzen.....	27
3.1 Bauteil.....	28
3.1.1 Gestaltungsrestriktionen .....	28
3.1.2 Ausgangsmaterial .....	32
3.2 Orientierung im Bauraum.....	33
3.3 Bauteilparameter.....	34
3.3.1 Energieeintrag.....	35
3.3.2 Scanstrategie .....	38
3.3.3 Belichtungsstrategie .....	39
4 Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....	42
4.1 Aufgabenstellung.....	42
4.2 Versuche und Versuchsplan.....	42
4.2.1 Parametersatzaufbau.....	43
4.2.2 Versuchsplan.....	44
4.3 Materialien und Methoden .....	46
4.3.1 SLM-Maschine „Mlab cusing R“ .....	46
4.3.2 Werkstoff.....	47
4.3.3 Messeinrichtungen.....	48

4.3.4 Probenpräparation .....	52
4.3.5 Umwertung von Härtewerten .....	54
4.3.6 Untersuchung der Parametersätze.....	56
5 Experimentelle Untersuchung.....	61
5.1 Untersuchung des Ausgangsmaterials .....	61
5.1.1 Versuchsauslegung und Durchführung .....	61
5.1.2 Versuchsauswertung.....	62
5.1.3 Zusammenfassung .....	66
5.3 Untersuchung der vorhandenen Parameter .....	70
5.3.1 CL20_performance.....	70
5.3.2 CL20_cusing_V1 .....	75
5.3.3 CL20_cusing_V2 .....	81
5.3.4 CL20_cusing_V2-1.....	85
5.3.5 Gegenüberstellung und Fazit.....	89
5.4 Spurbreiten.....	98
5.4.1 Versuchsauslegung und Durchführung .....	98
5.4.2 Versuchsauswertung.....	101
5.4.3 Zusammenfassung .....	106
5.5 Versuch zur Gefügedichte .....	107
5.5.1 Versuchsauslegung und Durchführung.....	107
5.5.2 Versuchsauswertung.....	112
5.5.3 Zusammenfassung .....	123
6. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	125
6.1 Zusammenfassung .....	125
6.2 Fazit.....	126
6.3 Ausblick .....	127
Literaturverzeichnis .....	129
Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Diagramme.....	132
Erklärung über selbständig erbrachte Leistungen .....	136
Anhang .....	137
A1: Werkstoffdatenblatt CL 20ES .....	137
A2: Technische Zeichnung zur Zugprobe .....	139
A3: Technische Zeichnung zum Dichtequader.....	140

---

A4: Experimentale Untersuchung des Ausgangsmaterials.....	141
A5: Datenträger.....	143

## Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
Abb	Abbildung
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)
HB	Härte nach Brinell
HV	Härte nach Vickers
LM	Lichtmikroskop
ISO	Internationale Organisation für Normung
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Deutsch: Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
LCVD	Chemical Vapour Deposition (Deutsch: chemische Gasphasenabscheidung)
LMD	Laser Metal Deposition (Deutsch: Laserauftragsschweißen)
REM	Rasterelektronenmikroskop
SLM	Selective Laser Melting  (Deutsch: Selektives Laserschmelzen)
Stabw	Standardabweichung
STL	Standard Transformation Language Format
UV	Ultraviolettstrahlung

## Formelzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\alpha$	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
$v_s$	m/s	Scangeschwindigkeit
$\sigma$	MPa	Spannung
$\Delta_l$	m	Längenänderung
$\Delta_T$	°C	Temperaturdifferenz
$A_1$		Abstandsfaktor
$D_s$	m	Schichtdicke
$E_s$	J/m	Streckenenergie
$E_v$	J/m <sup>3</sup>	Volumenenergiedichte
$D_T$		Theoretischer Dichtewert
$P_{LS}$	W	Laserstrahlleistung
$R_a$	$\mu\text{m}$	Mittenrauwert
$R$	MPa	Rp0,2% Grenze
$R_z$	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$S_A$	mm	Schmelzspurabstand
$S_B$	mm	Schmelzspurbreite
$X, Y, Z, x, y, z$		Richtungsvektor, Achsenbezeichnung
$a$	mm	Überhanglänge
$m_i$	g	Ideale Masse
$m_g$	g	Gewogene Masse

## 1 Anlass und Ziel

Mit der Patentierung der Stereolithografie<sup>1</sup>, dem ersten additiven Fertigungsverfahren, im Jahr 1986, begann die Entwicklung einer Vielzahl von Anwendungsbereichen. Durch den Vorteil der werkzeuglosen und geometrisch kaum eingeschränkten Formgebung, setzten sich additive Verfahren schnell in vielen Bereichen durch. Beginnend im Modell- und Prototypenbau etablierte sich die vergleichsweise junge Technologie von Hobbyanwendungen bis zur Medizintechnik in allen Bereichen, dank der in den letzten Jahren gestiegenen Qualität und Zuverlässigkeit der Anlagen, bei sinkenden Anschaffungskosten. Eine Entwicklung, die sich auch in vielen Forschungseinrichtungen bemerkbar macht. (1), (2 S. 2)

In der Arbeitsgruppe Chemie, Oberflächentechnik und Korrosion des Fachbereichs Maschinenbau wird an dem Einstieg in die Erforschung und Entwicklung der additiven Fertigung gearbeitet. Dafür wurde ein Gerät angeschafft, das nach dem Prinzip des selektiven Laserschmelzens (englisch Selective Laser Melting, Abk. SLM) arbeitet. Der Fokus der Forschung und Entwicklung liegt dabei auf den mechanischen und geometrischen Eigenschaften der gefertigten Bauteile und deren Oberflächen, speziell bei der Metallverarbeitung, liegen.

Um die Einflüsse verschiedener Prozessparameter hinsichtlich der Werkstoffeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheiten bei der additiven Fertigung durch selektives Laserschmelzen untersuchen zu können, soll im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit standardisierte Probekörper unter verschiedenen Prozessparameter in ausreichender Menge generiert und hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit, der geometrischen Abweichung, der mechanisch-technologischen Eigenschaften und des Gefügebau untersucht werden. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sollen zusammengefasst und gegenübergestellt werden, um den Einfluss und die Einflussstärke der einzelnen Parameter bestimmen zu können.

---

<sup>1</sup> Additives Fertigungsverfahren aus der flüssigen Phase mittels UV-Härtung



## 2 Additive Fertigung

Hinter dem Begriff der additiven Fertigung verbirgt sich eine Vielzahl von Verfahren. Es werden unterschiedlichste Werkstoffe und Materialbindungen eingesetzt, wie zum Beispiel Kleben, Schmelzen oder UV-Härtung. Die Fertigung erfolgt dabei immer materialzuführend, woher sich auch die Bezeichnung „additiv“ ableiten lässt. Die Bauteile entstehen vorzugsweise durch schichtweises Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen. Somit wird eine werkzeuglose Herstellung komplexer Bauteilen ermöglicht. Anders als in der spanenden Fertigung können Hinterschneidungen und Hohlräume hergestellt werden. (1 S. 3 - 7)

Die Abbildung 1 veranschaulicht das generelle Prinzip der additiven Fertigung. Ein Volumenmodell wird in einer 3D-CAD-Konstruktionssoftware erstellt und im weiteren Verlauf, beim sogenannten „Slicing“, in definierte Schichten aufgeteilt, welche nacheinander zusammengefügt werden bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist. (3)

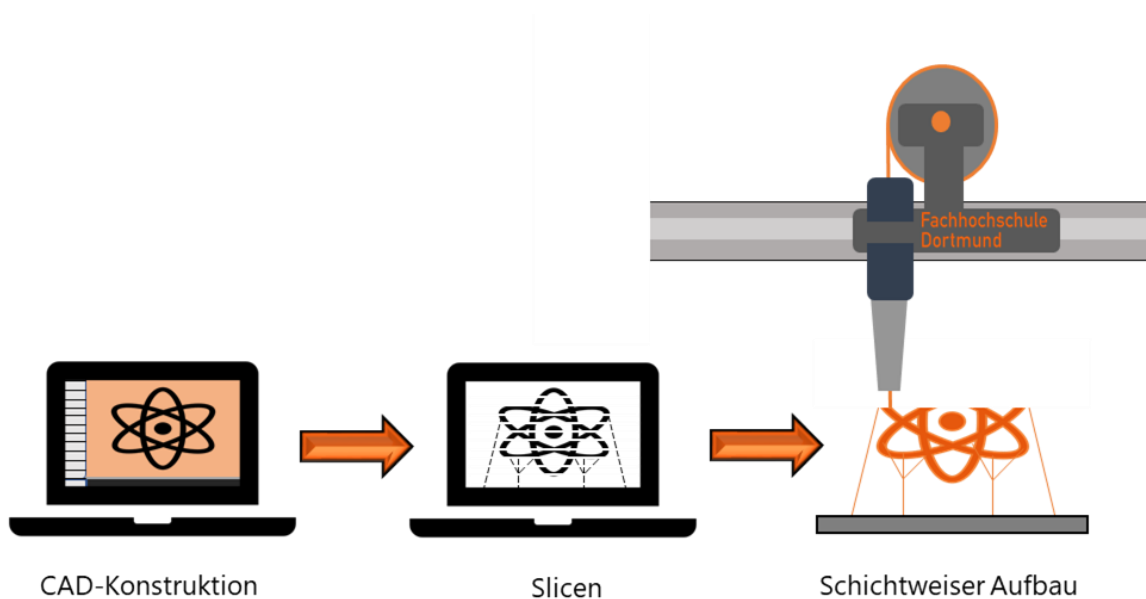


Abb. 1: Schematische Darstellung der additiven Fertigung

Um den sehr weitläufigen Begriff der additiven Fertigung greifbarer zu gestalten, werden im Folgenden die Anwendungsgebiete der additiven Fertigung aufgezeigt und die einzelnen Verfahren nach ihrem Ausgangsmaterial und ihrer Bindungsart unterteilt.

## 2.1 Einordnung der additiven Verfahren nach dem Ausgangsmaterial

Auch wenn alle additiven Fertigungsverfahren auf demselben Funktionsprinzip beruhen, unterscheiden sie sich jedoch erheblich in ihrer technischen Umsetzung. Das wird deutlich, wenn die Verfahren nach dem Aggregatzustand ihres Ausgangsmaterial und der Art des bindungsschaffenden Prozesses unterteilt werden. Dazu gibt Abb. 2 eine Übersicht. (1 S. 47-80)

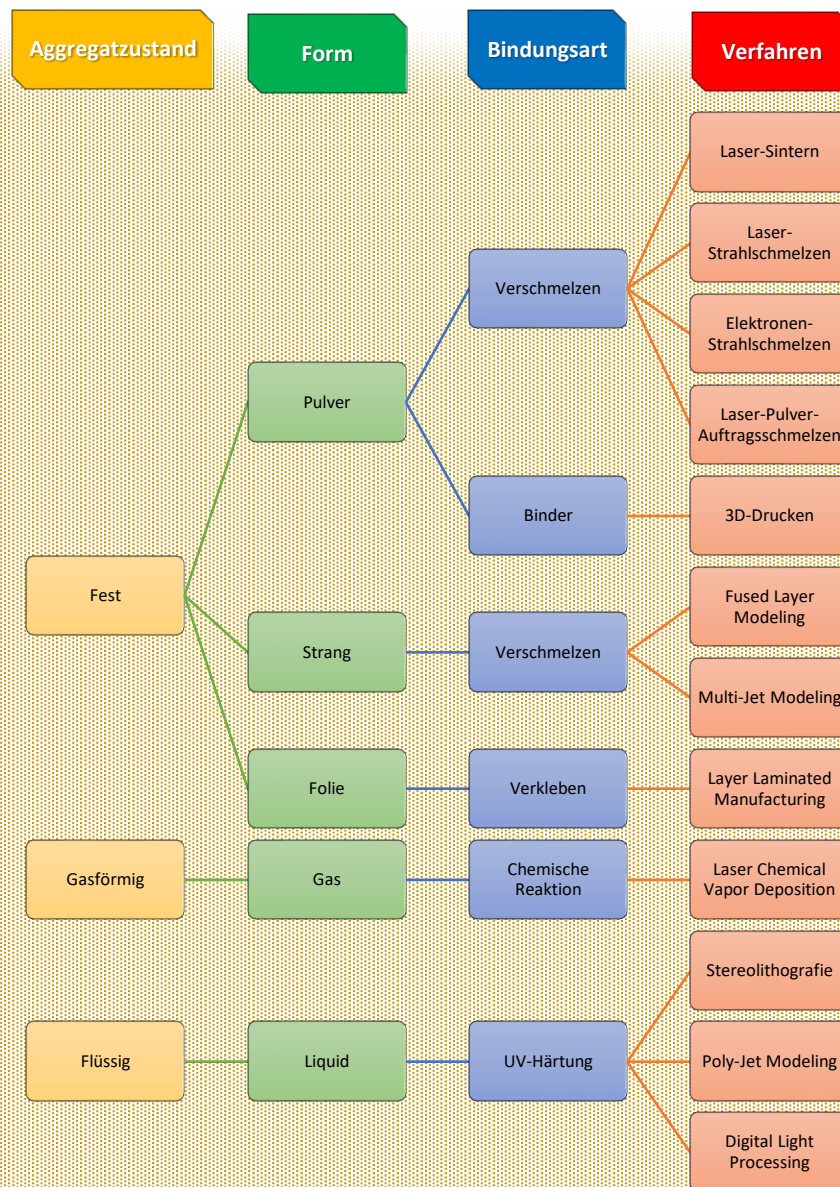


Abb. 2: Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach ihrem Ausgangsmaterial und Bindungsmechanismus (2 S. 8), (1 S. 77)

Bei der additiven Fertigung aus der Gasphase werden reaktionsfähige Gase, mit Zuhilfenahme einer externen Energiequelle, lokal zur Reaktion angeregt. Dabei entstehen Feststoffe, die das Bauteil bilden. Das „Laser Chemical Vapor Deposition“ Verfahren, oder abgekürzt LCVD-Verfahren arbeitet nach dieser chemischen Gasphasenabscheidung. In dem Portfolio der aus gasförmigen Phasen erzeugenden Verfahren, sind auch Prozesse vorrätig, die auf physikalischem Weg Feststoffe abscheiden. Generell streben die gasabscheidenden Verfahren an feinste Strukturen zu generieren. (1 S. 76-80)

Bei der additiven Fertigung aus der flüssigen Phase, liegt das Ausgangsmaterial als Flüssigkeit vor. Dafür werden Monomere<sup>2</sup> wie Acrylat oder Epoxidharz eingesetzt, die während der Fertigung durch UV-Licht lokal vernetzt werden. Durch diese gezielte Strahlungseinwirkung werden einzelne Schichten und ganze Bauteile generiert. Diese Verfahren bieten eine sehr hohe Bauteilgenauigkeit, jedoch müssen die Ausgangsmaterialien prozessbedingt eine Photosensibilität aufweisen. (1 S. 48-59)

Die additive Fertigung aus der festen Phase verarbeitet Ausgangsmaterial in Form von Pulvern, Strängen oder auch Folien. (1 S. 60-76)

Bei den pulverzuführenden Verfahren wird das Bauteil in einem Pulverbett generiert und durch eine Energiequelle je nach Verfahren lokal gesintert oder lokal vollständig aufgeschmolzen. In den dabei entstehenden Schmelzbädern verbinden sich die einzelnen Partikel zu Schichten und Bauteilen. Daneben bestehen Verfahren, bei denen das Pulver nicht verschmolzen, sondern durch ein Bindemittel gefügt werden. (1 S. 60-76)

Die strangverarbeitenden Verfahren nutzen in der Regel Kunststoffe als Ausgangsmaterial. Dabei wird der Maschine ein Kunststoffdraht zugeführt, welcher durch einen Extruder plastifiziert und zu Schichten aufgetragen wird, wodurch letztendlich das Bauteil generiert wird. (1 S. 60-76)

Bei der Bauteilgenerierung aus Folien, werden eben solche zu einzelnen Schichten zurechtgeschnitten und aufeinander gefügt. (1 S. 60-76)

---

<sup>2</sup> Niedermolekulare und reaktionsfreudige Moleküle, die sich zu molekularen Ketten zusammenschließen können. (39)

Im weiteren Verlauf der wissenschaftlichen Arbeit wird grob auf die Marktanteile der metallverarbeitenden Verfahren eingegangen und später ausschließlich das SLM-Verfahren behandelt.

Wie die Abb. 3 zeigt, hat das SLM-Verfahren den größten Anteil im metallverarbeitenden Bereich der AM, gefolgt von der Laser Metal Deposition (LMD<sup>3</sup>) und dem Beam Melting (EBM), das dem SLM-Verfahren sehr ähnlich ist. Das EBM-Verfahren nutzt jedoch einen Elektronenstrahl, anstelle eines Lasers zur Energiezufuhr. Den restlichen Markt teilen sich Sonstige und Hybrideverfahren. (4 S. 40)

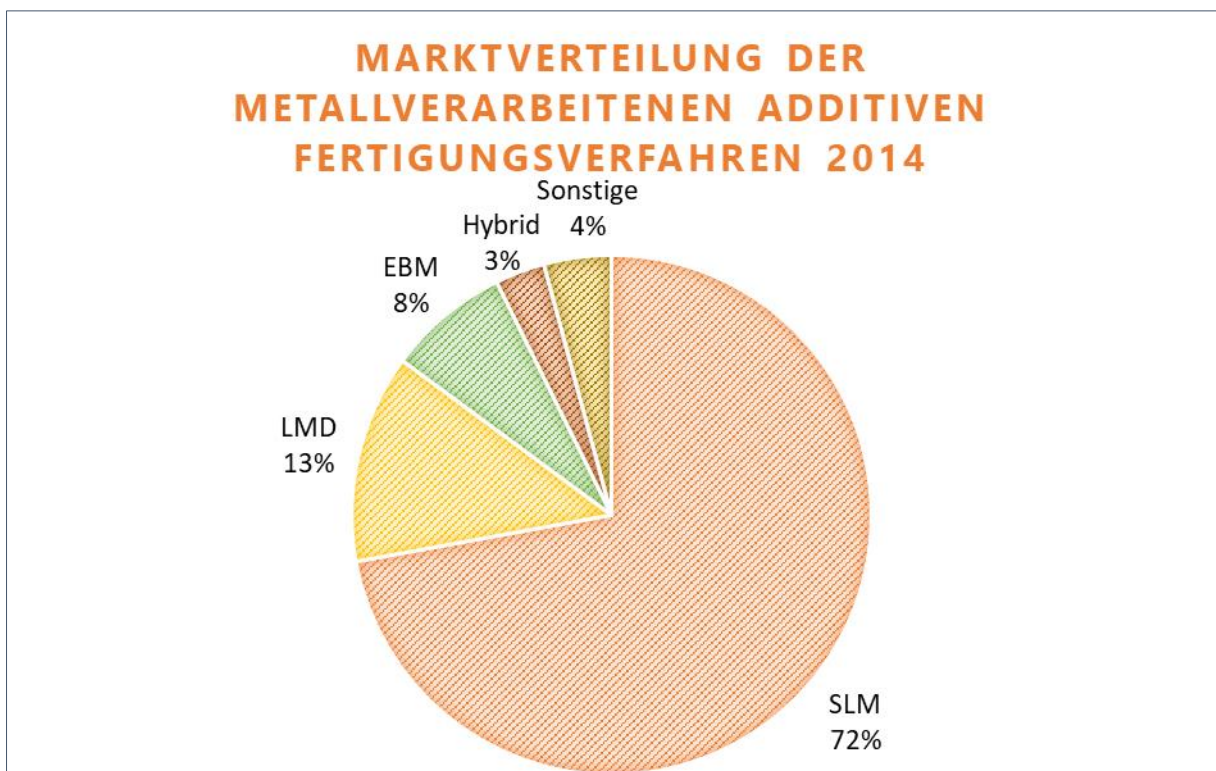


Abb. 3: Marktverteilung der metallverarbeitenden additiven Fertigungsverfahren im Jahre 2014 (4 S. 40)

Es zeigt sich deutlich, dass die pulveraufschmelzenden Verfahren (SLM und EBM) mit 80 % den größten Anteil in der additiven Metallverarbeitung haben.

<sup>3</sup> Auch bekannt als „Laser Cladding“ oder „Direct Energy Deposition“. Im deutschen als Laserauftragsschweißen bekannt. (4 S. 40)

## 2.1 Einsatzgebiete der additiven Fertigung

Die Einsatzgebiete der additiven Fertigung lassen sich, wie in Abb. 4 zu erkennen, grob in die vier Sparten „Rapid Prototyping“, „Rapid Tooling“, „Direct Manufacturing“ und „Rapid Repair“ einteilen. (2 S. 7)

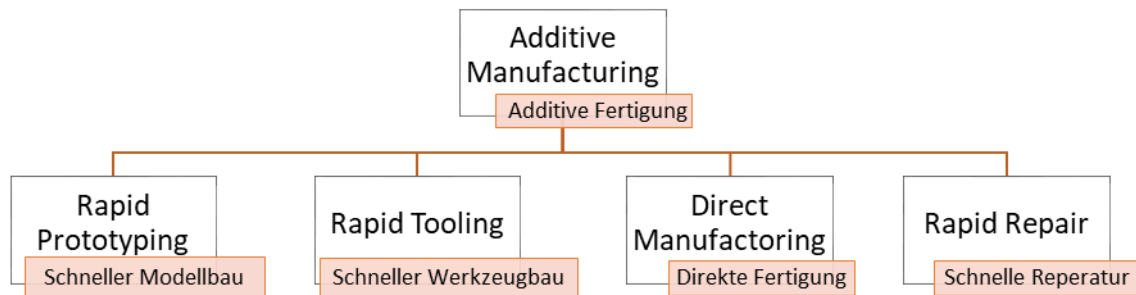


Abb. 4: Einsatzgebiete der additiven Fertigung (2 S. 7)

Dabei lässt sich das Rapid Prototyping wie folgt definieren: „*Additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität, bei denen jedoch spezifische Merkmale ausreichend gut ausgeprägt sind*“ (2 S. 6) und kann mit „schneller Modellbau“ übersetzt werden. Das Verfahren wird vermehrt in frühen Entwicklungsstadien eingesetzt, um z.B. Konzeptmodelle zu erstellen.

Das Rapid Tooling (deutsch: schneller Werkzeugbau) bezeichnet die „*Anwendung der additiven Methoden und Verfahren auf den Bau von Endprodukten, die als Werkzeuge, Formen oder Formeinsätzen verwendet werden*“ (2 S. 6) und findet Anwendung im Werkzeugbau. Die Anwendungen reichen vom Ersetzen verlorener Modelle bis zur Herstellung ganzer Einsätze und Formen für Vor- und Kleinserien.

Während das Direct Manufacturing sich als „Direkte Fertigung“ in das Deutsche übersetzen lässt und als „*Additive Herstellung von Endprodukten*“ (2 S. 6) definiert ist. Dabei ist es das Ziel, Fertigteile für die Serienfertigung herzustellen, wobei die Schwierigkeit in der Reduzierung der Nachbearbeitung liegt.

Das Rapid Repair (deutsch: schnelle Reparatur) findet vorwiegend im technischen Service Anwendung um Ersatzteile zu fertigen (2 S. 6). Dadurch können z.B. Lagerkosten für Ersatzteile eingespart werden.

## 2.2 Selektives Laserschmelzen

Bei dem selektiven Laserschmelzen wird das Bauteil materialzuführend aus einem pulverförmigen Ausgangsmaterial durch einen Laser im Pulverbett generiert. Dabei wird das Pulver in einem Schmelzbad vollständig aufgeschmolzen und verbindet sich vollständig, worin auch der Unterschied zum Selektiven Lasersintern besteht. Dieses Aufschmelzen erfolgt schichtweise, wodurch das Bauteile generiert wird. Dabei reicht das Schmelzbad tief genug, um die einzelnen Schichten vollständig miteinander zu verbinden. (1), (5 S. 721), (6 S. 5-8)

### Aufbau einer SLM-Anlage

Eine SLM-Anlage (Abb. 5) ist stark vereinfacht wie folgt aufgebaut. Es gibt einen Bauraum (Mitte) und die Pulverkammer (Links). Beide sind, wie die orangen Pfeile andeuten, höhenverstellbar. Ein Schieber, der sogenannte Beschichter, dient dem Transport vom Pulver zwischen den beiden Kammern sowie dem Glätten der Pulverschichten. Zusätzlich existiert ein Überlauf um überschüssiges Pulver aufzunehmen. Über den Kammern ist das Lasermodul inklusive Scanner verbaut, welches den Laserstrahl generiert und steuert. Je nach verwendetem Pulvermaterial wird die SLM-Anlage konstant mit einem entsprechenden Schutzgas durchströmt, um ungewünschte chemische Reaktionen des Pulvers zu verhindern. (1), (5 S. 721), (6 S. 5-8)

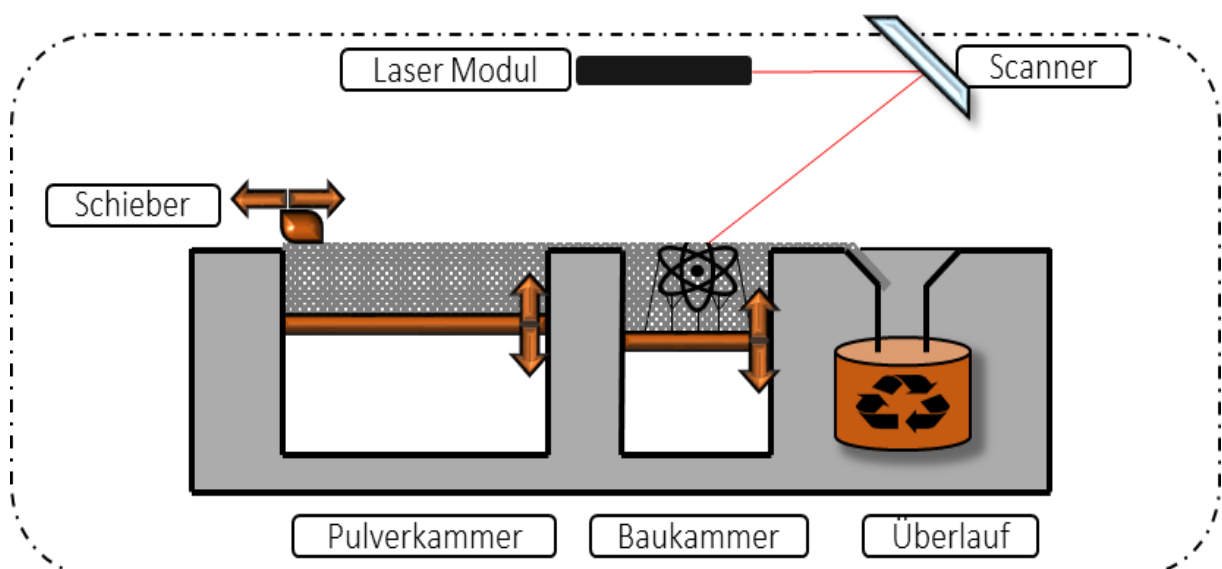


Abb. 5: Aufbau einer Anlage zum Selektiven Laserschmelzen

## 2.2.1 Von der Konstruktion zum fertigen Bauteil

Das Vorgehen beim Selektiven Laserschmelzen ist in Abb. 6 in sechs Schritten vereinfacht dargestellt.

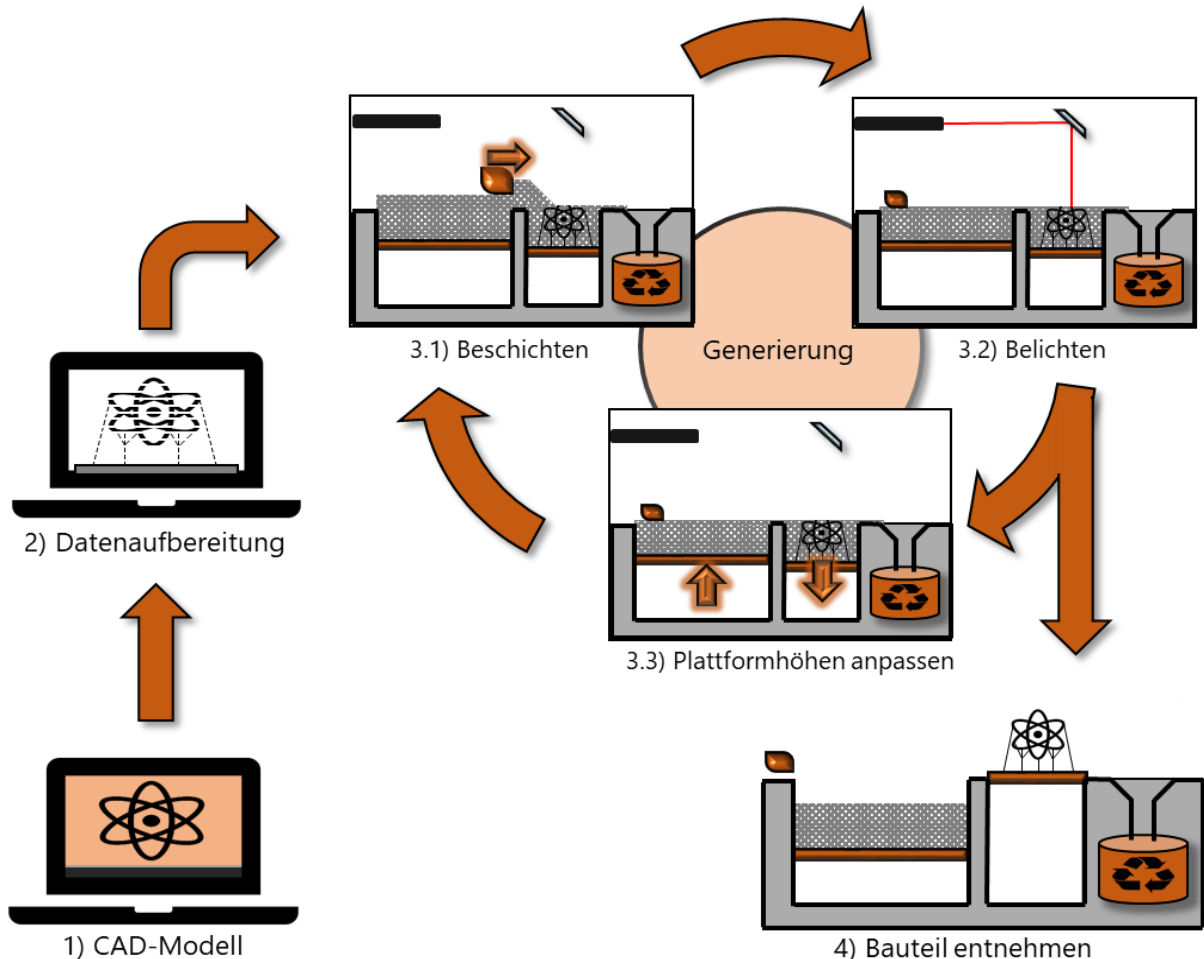
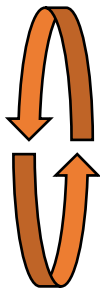


Abb. 6: Verfahrensablauf beim Selektiven Laserschmelzen

- 1) Das zu fertigende Bauteil wird mittels einer CAD-Software als Volumenmodell erstellt und für den weiteren Fertigungsprozess im STL-Format ausgegeben. Das „Standard Transformation Language Format“ oder kurz STL-Format ist das verbreitetste Format im Bereich der additiven Fertigung und beschreibt Oberflächen durch Approximation mittels unterschiedlich großer Dreiecke. Das STL-Format kann weiterverarbeitet werden, ohne dass dabei Rückführungen in das ursprünglich verwendete CAD-Programm nötig sind. Dadurch ist es unerheblich durch welches Programm die Datei erzeugt wurde und kann von speziellen Datenaufbereitungsprogrammen weiterverarbeitet werden. (3), (1), (5 S. 721), (6 S. 5-8)

- 2) Im Rahmen der Datenaufbereitung erfolgt zu einem die Bauteilausrichtung und das Einbringen eventuell benötigter Support-Strukturen, was die Fertigungszeit und Bauteilqualität signifikant beeinflusst. Zum anderen wird das virtuelle Bauteil, beim sogenannten „Slicen“, entlang der Z-Achse in einzelne Schichten getrennt, was durch die Dreiecksstruktur des STL-Formates ermöglicht wird. Diese Schichten werden im Generierungsprozess nacheinander aufgebaut und ergeben dadurch das Bauteil. (3), (1), (5 S. 721), (6 S. 5-8)
- 3) Die Generierung einer Schicht erfolgt in drei Schritten. Diese werden zyklisch wiederholt bis alle Schichten aufgebaut sind und das Bauteil entnommen werden kann. Dabei laufen die einzelnen Schritte wie folgt ab:



- 3.1) Der Beschichter trägt Pulver aus der Pulverkammer auf der Bauplatte auf. (1), (5 S. 721)
- 3.2) Beim Belichten werden die beim Slicen festgelegten Bauteilschichten durch Aufschmelzen des Pulvers hergestellt. (1), (5 S. 721)
- 3.3) Die Bauplatte wird um eine Schichtdicke abgesenkt und die Pulverkammer entsprechend heraufgefahren um neues Pulver bereit zu stellen. (1), (5 S. 721)
- 4) Sobald das Bauteil vollständig generiert ist, wird das lose Pulver in der Baukammer entfernt und das fertige Bauteil kann von der Bauplatte abgetrennt werden. Das Bauteil wird anschließend noch nachbearbeitet, um beispielsweise Supportreste zu entfernen. (1), (5 S. 721)

### 2.2.2 Gefügeentwicklung beim Selektiven Metall-Laserschmelzen

Das Gefüge wird signifikant durch den jeweiligen Herstellungsprozess beeinflusst, weshalb Schliffbilder häufig Rückschlüsse auf das Fertigungsverfahren geben. Die durch zyklisches aneinanderfügen von Schmelzbahnen entstandenen Gefüge, des SLM-Prozesses weisen charakteristische Eigenschaften auf, welche in Abb. 7 zu sehen sind. Die feinen, das Gefüge durchziehenden, Linien sind die Randschichten der einzelnen Schmelzraupen. Deren Verlauf ermöglicht Rückschlüsse auf die Gefügeentstehung. (7 S. 12-14), (8), (9 S. 26) Die Abb. 7a zeigt die polierte und geätzte Seitenansicht (Y/Z-Ebene) bei 300facher Vergrößerung, während Abb. 7b die Draufsicht (X/Y-Ebene) zeigt. Auf beiden Bildern ist jeweils eine Schmelzraupe zum



besseren Verständnis blau eingefärbt. Das vermeintliche Ende der Schmelzraupe in Abb. 7b ist auf Winkelfehler bei der Probenpräparation zurückzuführen. Abb. 7c zeigt den Querschnitt einer Schmelzraupe bei 1000facher Vergrößerung, während Abb. 7d die 100fache Vergrößerung der Draufsicht darstellt. Dabei ist durch den Winkelfehler bei der Präparation der Einfluss der Wechselbelichtung in Form der sich überkreuzenden Schmelzraupen, zu sehen.

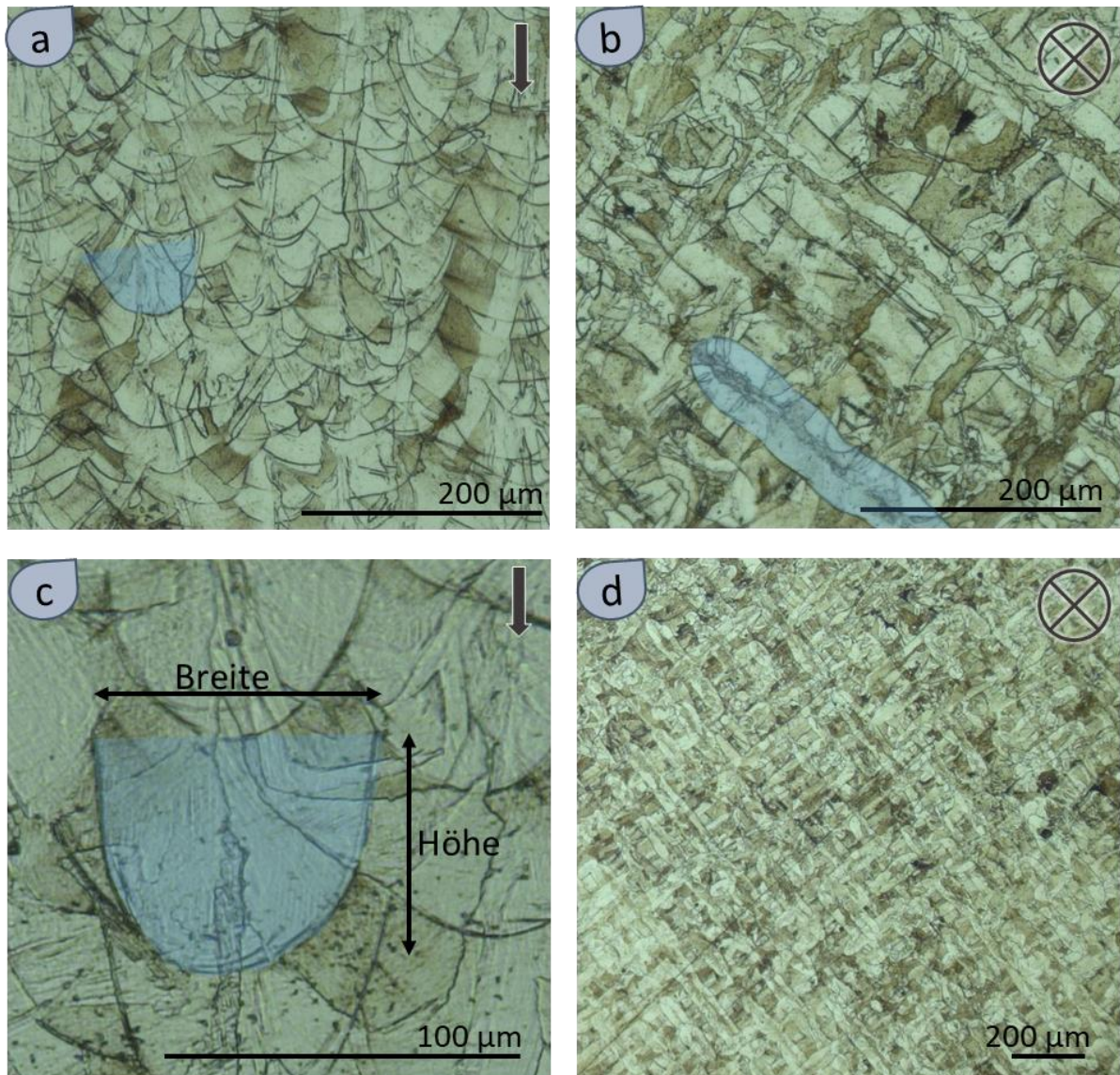


Abb. 7: Schliffbilder beim selektiven Laserschmelzen; a) Seitenansicht bei 300facher Vergrößerung; b) Ansicht von Oben bei 300facher Vergrößerung; c) Seitenansicht bei 1000facher Vergrößerung; d) Ansicht von Oben bei 100facher Vergrößerung

### Entstehung des Gefüges

Durch die Einwirkung des Laserstrahls auf das Pulver wird Energie in Form von elektromagnetischen Wellen übertragen. Dabei findet eine Wechselwirkung mit den Atomen des Ausgangswerkstoffs statt, was sich durch einen Temperaturanstieg äußert. Der effektive

Energieeintrag und damit die entstehende Temperatur und Schmelzbadgröße hängt im Wesentlichen vom Reflektionsgrad des Ausgangsmaterials und dem verwendeten Laser ab. (7 S. 12-14), (10 S. 17-25)

Die Strahlung wird zunächst durch die Oberfläche der Pulverkörner und dem darunter befindlichen festen Material absorbiert. Bei ausreichender Energieabsorption überschreitet die Temperatur den Schmelzpunkt und es bildet sich ein Schmelzbad aus aufgeschmolzenen Pulver und aufgeschmolzenen Teilen der darunterliegenden Schicht. Das erneute Aufschmelzen der unterliegenden Schichten ist dabei für ein dichtes Gefüge essentiell. (7 S. 12-14), (10 S. 17-25)

Durch die unebene Umgebung des Pulverbettes und der einseitigen Flankierung bereits gefertigter Schmelzspuren nimmt das Schmelzbad einen ellipsenförmigen Querschnitt an, während die Schmelzbahn durch die Bewegung des Laserstrahls eine längliche Form ausbildet. (7 S. 12-14), (10 S. 17-25)

Das verhältnismäßig geringe Volumen des Schmelzbades und die Temperaturverteilung innerhalb der Schmelze haben eine schnelle Erstarrung der Schmelze in Aufbaurichtung zur Folge, wobei der unterliegende Festkörper als Wärmesenke fungiert, da er eine deutlich bessere Wärmeleitfähigkeit als das umliegende Pulver aufweist. Als Folge der schnellen, gerichteten Erstarrung wachsen die Körner vermehrt in Aufbaurichtung und bilden ein feinkörniges Gefüge aus. (7 S. 12-14), (10 S. 17-25)

### 2.2.3 Thermisch induzierte Eigenspannungen

Die ohne äußerliche Krafteinwirkung innerhalb eines Bauteils wirkenden Spannungen, werden als Eigenspannungen bezeichnet. Ein Bauteil befindet sich auch trotz wirkender Eigenspannung im mechanischen Gleichgewicht, da die aus den Eigenspannungen resultierende Kraft gleich Null ist. (11 S. 18)

Eigenspannungen in plastisch verformbaren Materialien oberhalb der Streckgrenze des Werkstoffes führen zu plastischen Verformungen, dem sogenannten Verzug. Übersteigt die Eigenspannung gar die Zugfestigkeit kommt es zu Rissen am Bauteil. Durch die auftretenden

Verformungen bauen sich die Eigenspannungen ab, jedoch wird das Bauteil dadurch häufig unbrauchbar. (12 S. 77)

### Thermisch induzierte Eigenspannungen

Temperaturunterschiede innerhalb eines Bauteils führen zu Eigenspannungen. (11 S. 77)

Wird ein Bauteil erwärmt, ist es bestrebt sein Volumen entsprechend der Temperaturexpansion anzupassen. Wird ein Bauteil beispielsweise beim Schweißen lokal begrenzt erhitzt, strebt der erwärmte Bereich eine Volumenänderung an, wird dabei jedoch durch den thermisch nicht betroffenen Teil behindert, welcher keiner Temperaturexpansion unterliegt. Durch diese gegensätzlichen Bestrebungen entstehen Eigenspannungen, welche als thermisch induziert oder auch als Wärmespannungen bezeichnet werden. (11 S. 18-21), (12 S. 77)

### Thermisch induzierte Eigenspannungen beim Selektiven Laserschmelzen

Abhängig von der jeweiligen Temperatur unterliegen die Schichten einer thermischen Kontraktion, auch temperaturbedingte Längenänderung genannt. Die Größe der Längenänderung  $\Delta l$  ergibt sich dabei aus der Multiplikation der Anfangslänge  $l_0$ , dem Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und dem Temperaturunterschied  $\Delta T$ , wie die Formel 3.1 verdeutlicht. (11 S. 18-21)

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Wird eine Schicht generiert, hat sie eine höhere Temperatur, als die darunterliegende und somit auch eine höhere Längenausdehnung. Nach dem Belichten kühlen die Schichten auf ein gemeinsames Temperaturniveau ab. (11 S. 18-21)

In der Abb. 8 wird die Problematik der unterbundenen Längenkontraktion verdeutlicht. Die Ansicht a) zeigt das Verhalten bei einer freien Kontraktion. Es entsteht der Längenunterschied  $\Delta l$ , wodurch Eigenspannungen verhindert werden. Da in Ansicht b) aufgrund des festen Schichtverbunds eine Längenkontraktion unterbunden wird, kommt es zu Eigenspannungen. Die Höhe der Eigenspannungen hängt von der Differenz zur angestrebten Längenkontraktion ab. Im mittleren Teil (grün eingefärbt) ist die Differenz und damit auch die Spannung gleich null, während sie zu den Außenkanten hin ansteigt. Dadurch sind gerade lange Bauteile durch thermisch induzierte Eigenspannungen besonders gefährdet.

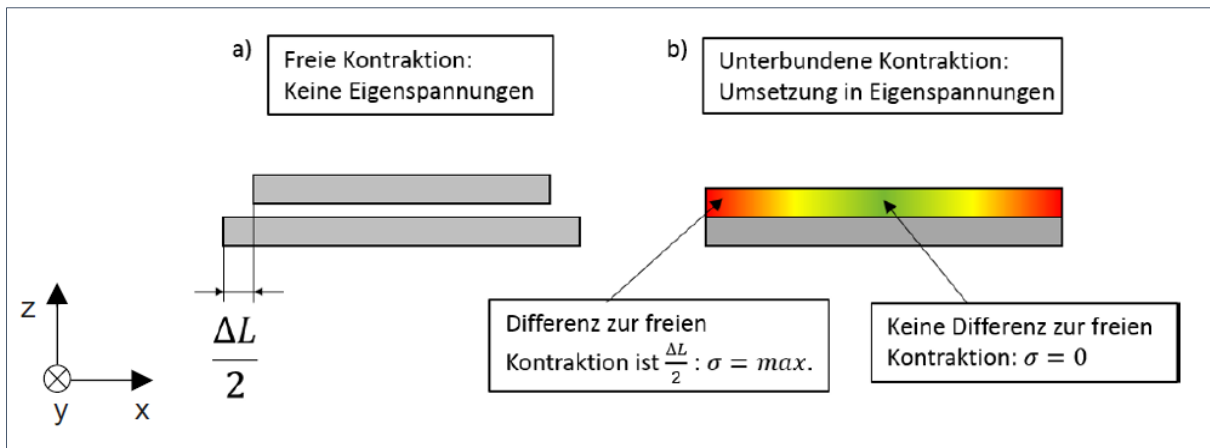


Abb. 8: Entstehung thermisch induzierter Eigenspannungen durch unterbundene Kontraktion (11)

Abhängig von der Bauteilgeometrie, dem verwendeten Ausgangsmaterial, sowie den angewandten Prozessparametern können die Eigenspannungen eine Ablösung von der Bauplattform, wie in Abb. 9 geschehen, zur Folge haben.

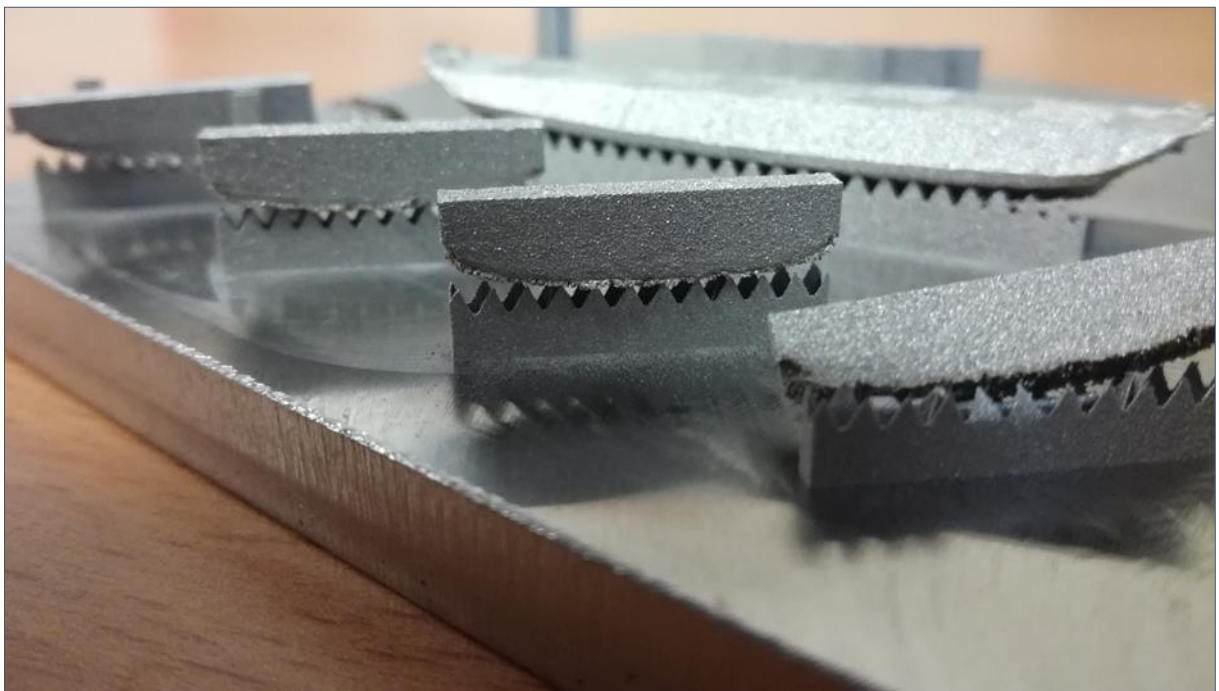


Abb. 9: Durch Eigenspannungen verursachte Krümmung führte zur Bauteilablösung

Um thermisch induzierten Spannungen entgegenzuwirken sollten nach Möglichkeit lange Bauteile mit geringer Wandung bei der Konstruktion vermieden werden, da dort die Spannungen durch die höhere temperaturabhängige Längenausdehnung besonders hoch sind. (11 S. 117-123)

Generell sind alle Stellen mit einer überdurchschnittlichen thermischen Belastung als kritisch zu sehen, da es dort zu hohen Temperaturunterschieden kommt. Sind solche Stellen konstruktiv nicht vermeidbar, empfiehlt es sich zum einen die Energieeinbringung in der Schmelzzone über die Laserstrahlleistung oder die Scangeschwindigkeit<sup>4</sup> anzupassen. (11 S. 14-15) Zum anderen kann die Belichtungsstrategie insofern angepasst werden, dass kritische Zonen nicht streifenweise, sondern in einem Schachbrettmuster aufgeschmolzen werden (Siehe Kapitel 3.3.3 Belichtungsstrategie). Dazu wird die zu generierende Schicht in einzelne quadratische Flächen unterteilt und mit unterschiedlicher Scanrichtung nacheinander aufgeschmolzen. Dabei wird die Reihenfolge so bestimmt, dass die einzelnen Flächen möglichst lange abkühlen können, bevor die angrenzenden aufgeschmolzen werden, wo durch die Temperaturunterschiede geringgehalten werden. Alternativ ist es auch denkbar die einzelnen Schichten mit einer um 90° gedrehten Scanrichtung aufzuschmelzen, damit sich die Eigenspannungen der einzelnen Schichten aufheben. (11 S. 15-16) Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Stützstrukturen (Siehe Kapitel 2.2.5 Supportstrukturen). (8)

Bei allen Ansätzen ist jedoch zu beachten, dass thermische Spannungen nur schwer vorhersagbar sind und es trotz Gegenmaßnahmen zu spannungsbedingten Beschädigungen am Bauteil kommen kann.

## 2.2.4 Einfluss der schichtweisen Generierung

Da die Bauteile in der additiven Fertigung schichtweise generiert werden, stellt die Dicke dieser Schichten einen wichtigen Parameter dar. Durch die Schichtdicke wird zum einen maßgeblich die Geometrieauflösung bestimmt, was in der Abb. 10 verdeutlicht wird. Die links abgebildete Originalkontur wird mittels zweier verschiedener Schichtdicken approximiert. Dabei zeigen die Bauteile mit geringerer Schichtdicke die bessere Geometrieauflösung. Zum anderen beeinflusst die Schichtdicke den Fertigungsaufwand signifikant, da bei einer Reduzierung der Schichtdicke, die Anzahl der zu generierenden Schichten ansteigt, so dass die besser approximierten Kontur eine deutlich höhere Fertigungszeit aufweist. (11 S. 13&14)

---

<sup>4</sup> Die Scangeschwindigkeit gibt die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls an

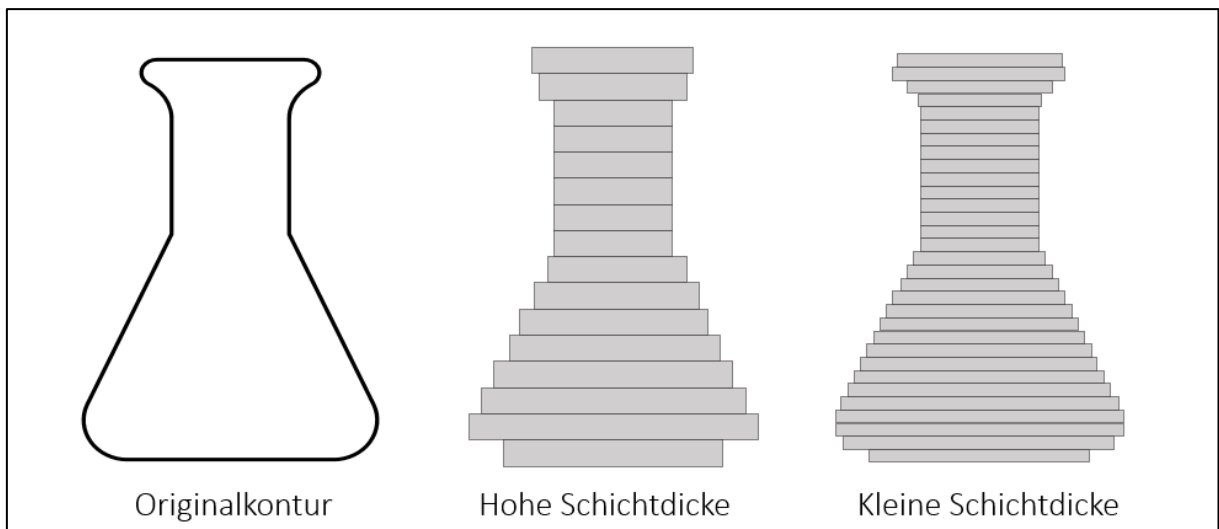


Abb. 10: Einfluss der Schichtdicke auf die Geometrieapproximation

Der Einfluss der Schichtdicke auf die Geometrieauflösung wird an angewinkelten Oberflächen oder orthogonal zur Aufbaurichtung orientierten Bohrungen besonders deutlich.

Die Abb. 11 zeigt jeweils eine Bohrung gegen und in Aufbaurichtung bei identischer Schichtdicke. Während die linke Bohrung nur grob approximiert werden kann, wird die rechte in Aufbaurichtung liegende Bohrung vollständig kreisförmig hergestellt. (8)

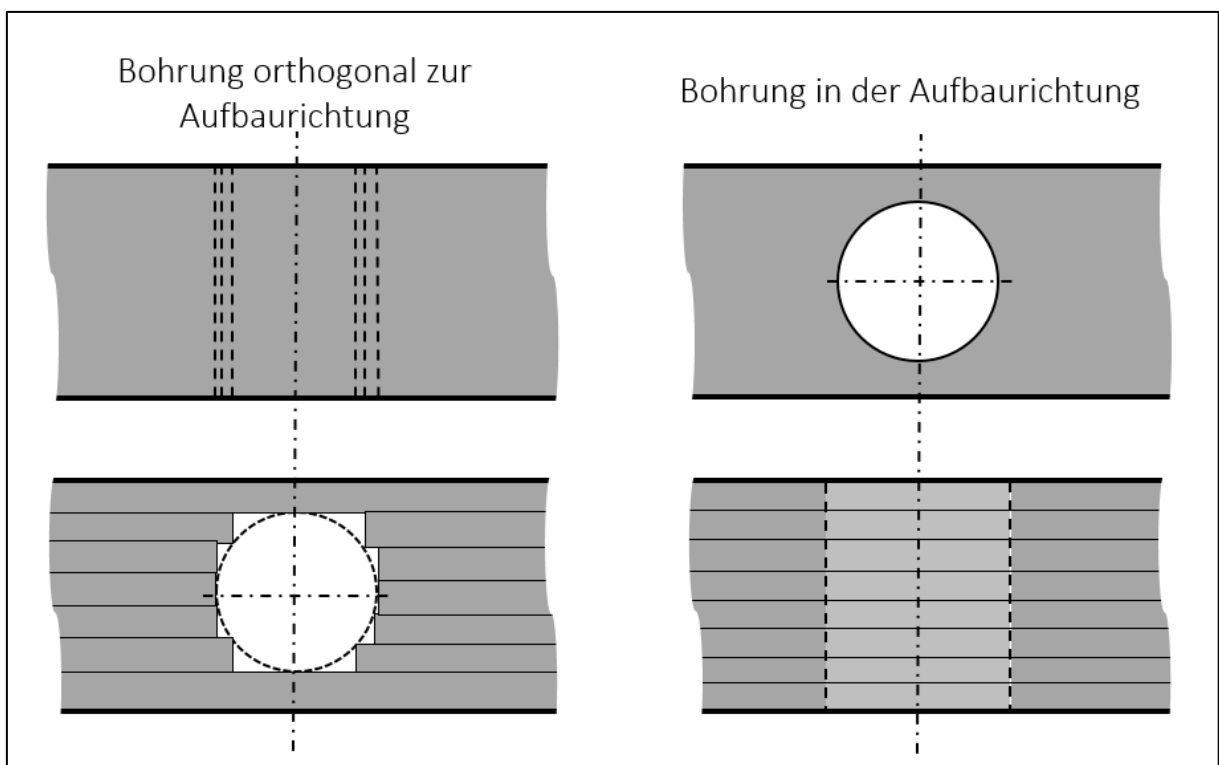


Abb. 11: Einfluss der Geometrieauflösung auf einer Bohrung orthogonal zur Aufbaurichtung (links). Zum Vergleich eine Bohrung mit Aufbaurichtung orientiert (rechts)

Die Abb. 12 zeigt die Geometrieapproximation an einer angewinkelten Oberfläche. Die schräge Fläche kann nur durch einzelne Schichten mit rechtwinkligen Kanten abgebildet werden, was zu dem sogenannten Treppenstufeneffekt führt. (11 S. 13&14)

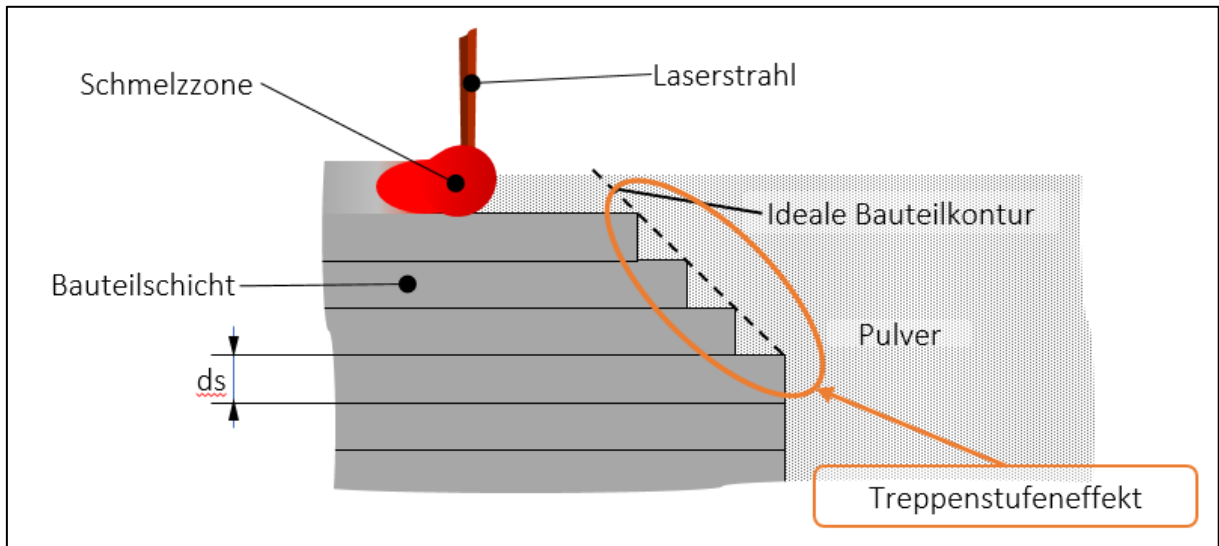


Abb. 12: Vereinfachte Darstellung des Treppenstufeneffekts;  $d_s$  = Schichtdicke

Es zeigt sich, dass eine hohe Geometrieauflösung und eine geringe Fertigungszeit nur bedingt vereinbar sind. Deshalb ist es sinnvoll kritische Geometrien wie Bohrungen oder Schrägen so zu platzieren, dass der Treppenstufeneffekt minimiert wird. Dadurch kann trotz höherer Schichtdicke, eine gute Geometrieauflösung erreicht werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, dass die Bauteilhöhe einem Vielfachen der Schichtdicke entspricht. (11 S. 233)

Die Schichtdicke metallischer Ausgangsmaterialien liegt in der Regel zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 60  $\mu\text{m}$ , abhängig von der verwendeten SLM-Anlage und der Korngrößenverteilung des Pulvers. (11 S. 13&14), (1 S. 22-24)

## 2.2.5 Supportstrukturen

Beim Selektiven Laserschmelzen liegt das Bauteil in einem stützenden Pulverbett, weshalb die primäre Funktion der Supportstrukturen (deutsch: Stützstrukturen) die Wärmeabfuhr an die Bauplatte ist. Bei komplexen und überhängenden Geometrien dienen die Supportstrukturen zusätzlich zur Fixierung des Bauteils und zur Kompensation von thermisch induzierten Spannungen. (1 S. 66), (13) Das Pulverbett ist aufgrund seiner geringeren Dichte nur bedingt

in der Lage Wärme abzuführen, wodurch es gerade bei überhängenden Strukturen zu erhöhten Temperaturen und den damit verbundenen Eigenspannungen kommt. Um dem entgegenzuwirken, dienen Stützstrukturen, auch Supportstrukturen genannt, zum einen als Wärmebrücke zur Bauplatte und zum anderen als Stütze um den Verzug entgegenzuwirken, wodurch die Gefahr von spannungsbedingten Prozessstörungen reduziert werden kann. (1 S. 66), (11 S. 148), (13)

Darüber hinaus können Stützstrukturen auch Vertropfungen entgegenwirken. Diese Gefahr besteht an überstehenden Strukturen, da dort direkt in das Pulverbett belichtet werden muss. Dabei kann noch flüssiges Material durch die Schwerkraft in das umliegende lose Pulver laufen. (11 S. 54-61, 88-98, 148)

Durch die beschriebenen Vorteile der Stützstrukturen ist ihr Einsatz häufig unumgänglich, jedoch ist der Support auch mit einigen Nachteilen verbunden. Durch die Trennstellen zwischen Supportstrukturen und Bauteil kommt es zu Verschlechterungen der Oberflächengüte, so wie zu einer Verschlechterung der Maßhaltigkeit. (11 S. 148) Zusätzlich erhöhen Supportstrukturen das zu generierende Volumen, wodurch Materialbedarf und Fertigungszeit steigen. Außerdem ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt notwendig um die Supportstrukturen vollständig vom Bauteil zu entfernen.

Im Idealfall wird der Fertigungsprozess schon in der Konstruktion berücksichtigt um die benötigte Anzahl an Supportstrukturen zu reduzieren oder sogar eine selbsttragende Konstruktion zu gewährleisten (Siehe dazu Kapitel 3.1.1 Gestaltungsrestriktionen). In jedem Fall muss eine einfache Entfernbarkeit der Supportstrukturen gewährleistet werden. (11 S. 148)

Ein Beispiel für den Einsatz von Supportstrukturen gibt Abb. 13. Das sich im virtuellen Bauraum befindliche Koffein Molekül ist durch den Support an der Bauplatte angebunden.



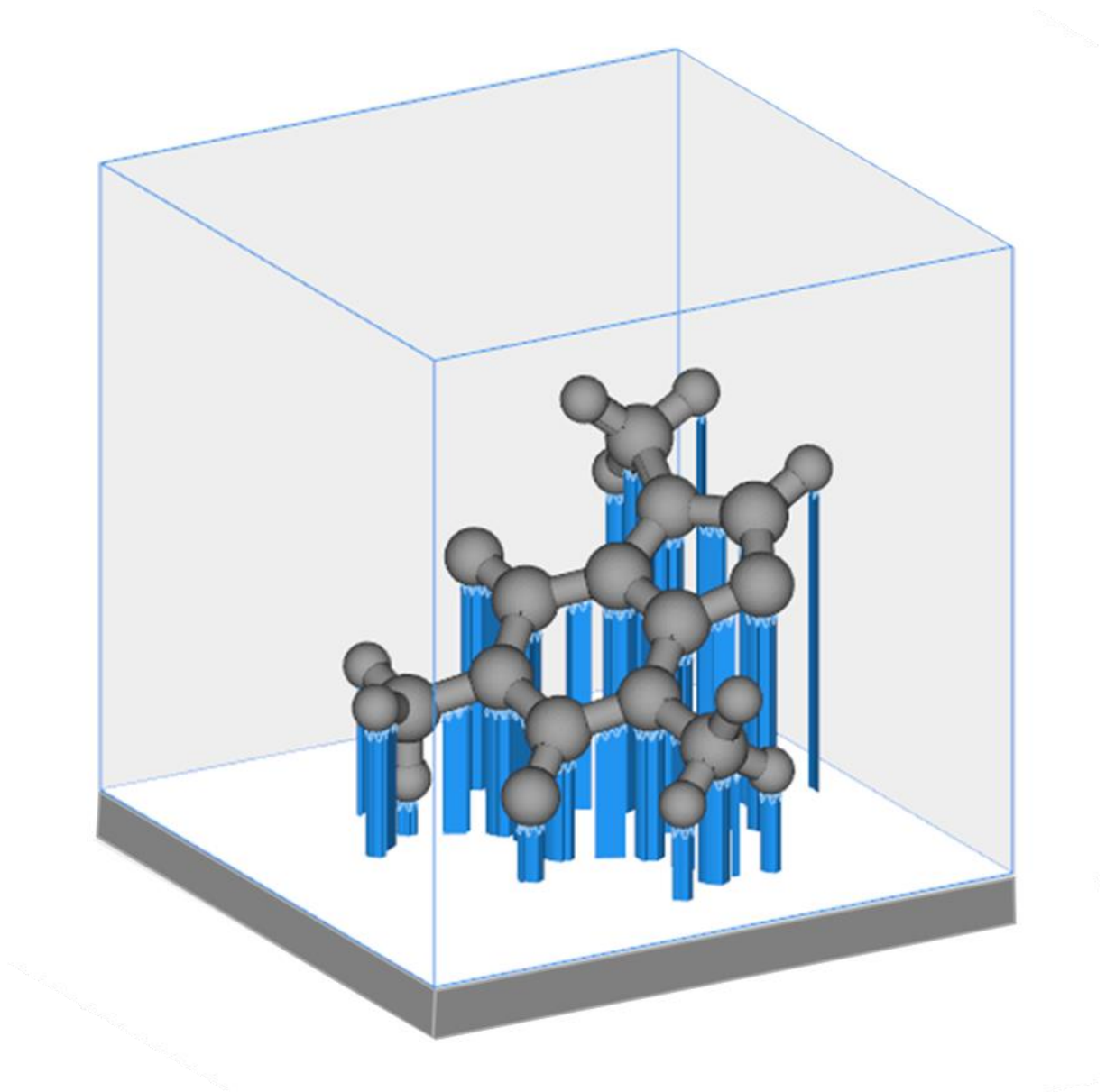


Abb. 13: Beispiel für den Einsatz von Supportstrukturen an einem Koffein Molekül

### 2.2.6 Vor- und Nachteile des selektiven Laserschmelzens

Die Technologie des Selektiven Laserschmelzens arbeitet endkonturnah und bietet eine große Werkstoffbrandbreite, da alle Materialien mit thermoplastischem Verhalten verarbeitet werden können. Die generierten Bauteile sind thermisch und mechanisch belastbar und benötigen, aufgrund des einstufigen Verfahrens, keine Nachvernetzung und können wie Schweißteile weiterverarbeitet werden. Es besteht eine hohe Gestaltungsfreiheit, da keine Einschränkungen durch Werkzeugzugänglichkeiten bestehen, wodurch Hinterschneidungen, Hohlräume oder Freiformgeometrien realisiert werden können. Dabei sind der Grad der Bauteilkomplexität und

der Fertigungsaufwand voneinander unabhängig. Darüber hinaus können Werkstoffeigenschaften lokal über die Prozessparameter konfiguriert werden. Das bei der Fertigung thermisch nicht beeinflusste Pulver kann gesiebt und wiederverwendet werden, wodurch ein hoher Ausnutzungsgrad der Ausgangsmaterialien gewährleistet ist. (1 S. 66), (11 S. 154-167), (8)

Neben den Vorteilen treten auch einige Nachteile auf: Prozessbedingt können Schrumpfungen, Eigenspannungen oder Verformungen, ähnlich wie beim Schweißen, durch den lokalen Temperaturunterschied auftreten. Zusätzlich sind die anisotropen Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen, die durch den schichtweisen Aufbau entstehen. Während des Fertigungsprozesses werden Stützstrukturen benötigt, um Wärme abzuleiten und so den spannungsbedingten Verformungen entgegenwirken. Diese Stützstrukturen erhöhen den Zeit- und Materialaufwand und müssen nach der Bauteilgenerierung in einem zusätzlichen Arbeitsschritt entfernt werden. Zusätzlich können umliegende Partikel durch das lokale Aufschmelzen thermisch aktiviert werden und dem Bauteil anhaften. Darüber hinaus muss bedacht werden, dass je nach verwendetem Werkstoff der Bauraum während der Generierung mit einem Schutzgas geflutet werden muss, um prozessstörende Reaktionen zu vermeiden. Generell sind durch SLM gefertigte Bauteile noch relativ teuer, im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsmethoden. (8), (1 S. 66-67), (11 S. 145-167)

Unter Betrachtung aller Vor- und Nachteile, insbesondere im Vergleich zu konventionellen Verfahren, zeigt sich, dass die flexible und ausgangsmaterialschonende Fertigung des Selektiven Laserschmelzens ein großes Potential bietet. Das vergleichbar junge Verfahren wird noch Entwicklungszeit benötigen, bis eine großindustrielle Umsetzung rentable ist.

### 3 Einflussgrößen beim Selektiven Laserschmelzen

Die Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften resultieren aus der Kombination einzelner Einflussgrößen. Insgesamt sind für das Selektive Laserschmelzen metallischer Werkstoffe 157 Einflussgrößen bekannt, welche sich aber erheblich in ihrem Einfluss unterscheiden, weshalb im Weiteren nur auf die signifikanten Einflussgrößen eingegangen wird. (14 S. 8), (10 S. 12)

Zur besseren Überschaubarkeit sind die signifikanten Einflussgrößen nach ihrem Ursprung in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm aufgeführt.

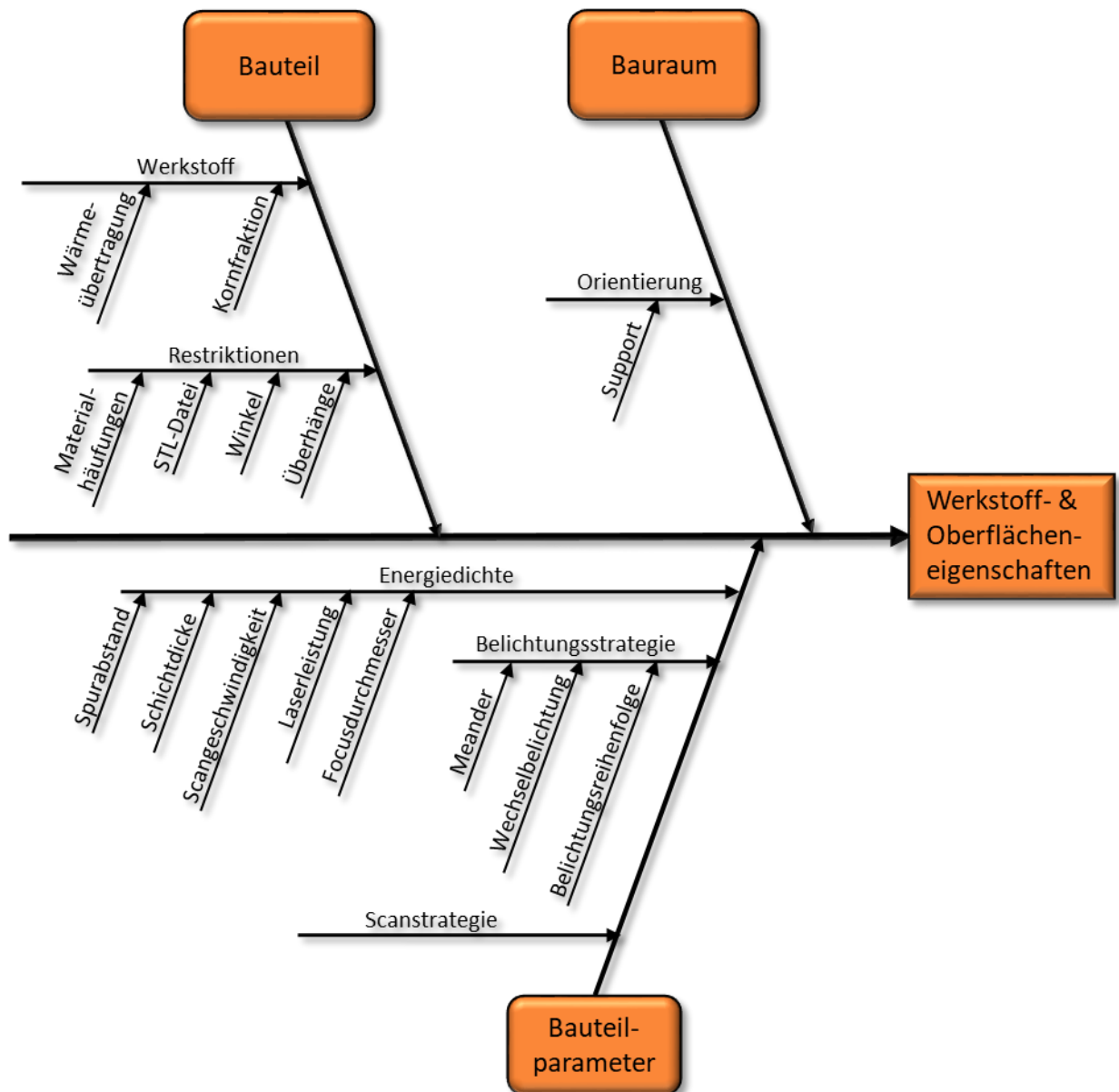


Abb. 14: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften beim SLM-Prozess

## 3.1 Bauteil

Wie alle Fertigungsverfahren weist auch das Selektive Laserschmelzen besondere Restriktionen auf, die bei der Bauteilkonstruktion berücksichtigt werden müssen. Daher ist es für eine fertigungsgerechte Konstruktion unerlässlich die Besonderheiten eines Fertigungsverfahrens zu kennen. Aufgrund der hohen Anzahl zu berücksichtigender Faktoren, wird in diesem Kapitel lediglich auf grundsätzliche Gestaltungsrichtlinien und die Werkstoffauswahl eingegangen.

### 3.1.1 Gestaltungsrestriktionen

Durch die schichtweise Bauteilgenerierung wird der Fertigungsaufwand weitgehendst von der Bauteilkomplexität entkoppelt, da keine Konstruktionsbeschränkungen durch Werkzeugzugänglichkeiten bestehen. Darüber hinaus wird die Konstruktionsfreiheit deutlich erhöht, da Hinterschneidungen, Freiformgeometrien oder Wabenstrukturen, anders als beim Zerspanen, ohne zusätzlichen Aufwand gefertigt werden können. Dabei muss lediglich Sorge getragen werden, dass überschüssiges Pulver entfernt werden kann. Jedoch erfolgen auch einige prozessbedingte Einschränkungen bei der Konstruktionsfreiheit. So können Materialanhäufungen, überhängende Strukturen oder geneigte Flächen Prozessstörungen hervorrufen, wie im Folgenden verdeutlicht wird. (8)

#### Materialanhäufungen

Als Materialanhäufungen werden Volumenansammlungen an einem Bauteil mit unterschiedlich stark ausgeprägter Sektionen bezeichnet. Diese Materialanhäufungen führen, zu unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten innerhalb eines Bauteils, wodurch es zur Gefahr von thermischem Verzug kommt. (8)

In Abb. 19 ist die Verformung durch eine Materialanhäufung zu erkennen. Aufgrund des höheren Volumens des mittleren Steges, ist die Abkühlgeschwindigkeit dort deutlich erhöht, verglichen mit den dünnwandigen äußeren Stegen. Die durch den Temperaturunterschied entstehenden Spannungen führen zum Verzug des gesamten Bauteils.

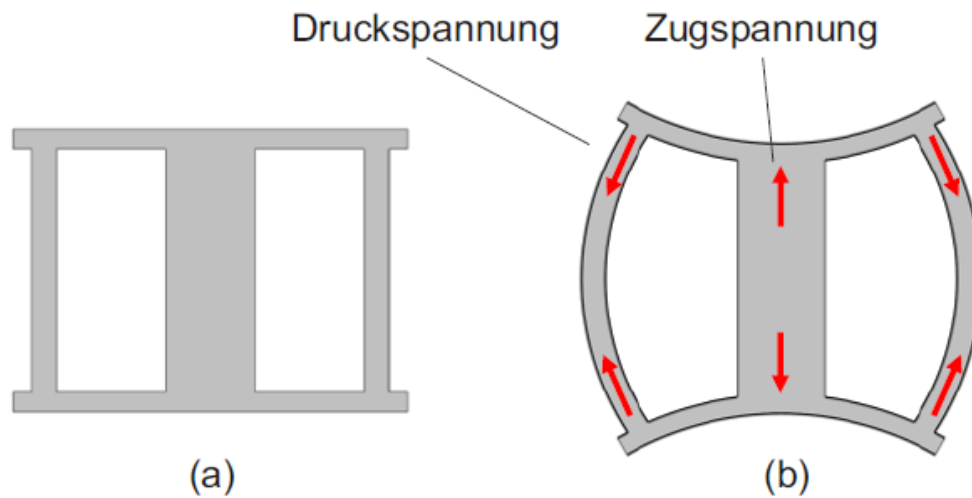


Abb. 15: Schematische Darstellung vom Bauteilverzug durch Materialanhäufung (11)

Dem Verzug durch Materialanhäufungen kann, ähnlich wie bei den Urformverfahren, durch eine geometrische Bauteilanpassung entgegengewirkt werden. Dabei werden wenige massive Strukturen, durch viele filigrane dünnwandige Konstruktionen ersetzt, wie Abb. 16 veranschaulicht. Die großen Flächen des linken Frästeils, werden durch dünne Streben beim laseradditiv gefertigten Bauteil ersetzt. (11), (15)



Abb. 16: Beispiel zur Anpassung eines Frästeils für das Selektive Metall-Laserschmelzen (16 S. 59)

### Überhängende und geneigte Flächen

Überhänge bezeichnen Flächen, die über die vorherige Schicht herausragen. Bei der Generierung solcher Überhänge kann es zu einer Belichtung in das Pulverbett kommen, wobei flüssiges Material bedingt durch mangelnde Wärmeabfuhr und Schwerkraft in das umliegende lose Pulver läuft und zu Vertropfungen führt. Durch diese Vertropfungen kommt es zu einem

unvollständigen Aufbau der Schicht. Bedingt dadurch wird auch die nachfolgende Schicht teilweise in loses Pulver generiert, wodurch es zu einer Fehlstellenfortpflanzung in Z-Richtung kommt. (11), (15)

Die Gefahr einer Prozessstörung steigt mit zunehmender Länge des Überhangs. (11), (15)

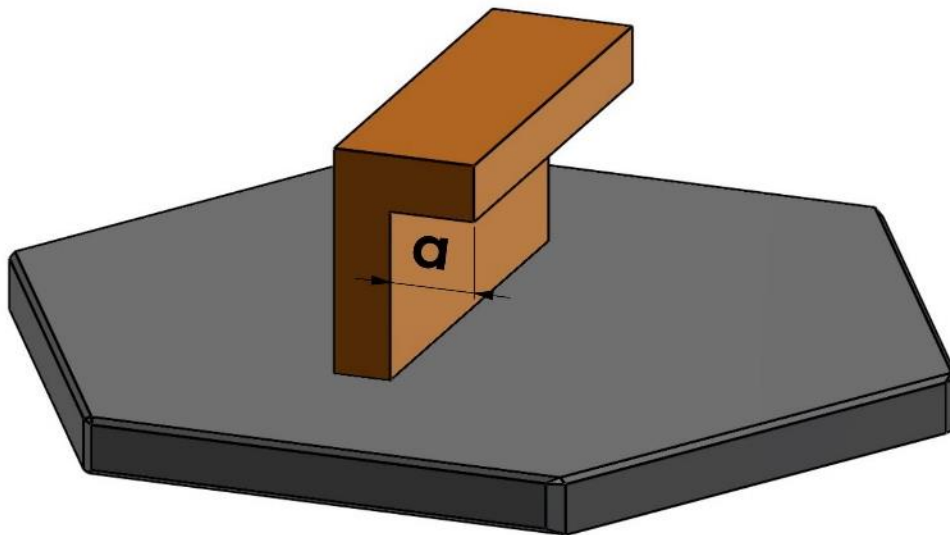


Abb. 17: Überhang mit der Länge  $a$

Bei zur Baufläche gekippten Flächen ist derselbe Effekt wie bei Überhängen zu erkennen, jedoch ist die Ausprägung abhängig vom Winkel der geneigten Fläche. Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang in Abb. 18. Der dort abgebildete Segmentbogen reicht von der Horizontalen in die Senkrechte. Dabei nimmt die Neigung der Segmente jeweils um  $10^\circ$ , bezogen zur Bauplatte, ab. Es ist zu erkennen, dass sich die einzelnen Segmente mit abnehmender Neigung einer überhängen Fläche annähern, wodurch auch die Gefahr von Prozessstörungen zunimmt. Darüber hinaus wirkt sich der Winkel der Segmente ebenfalls auf die Oberflächengüte aus. Dabei gilt im allgemeinen, dass die Oberflächengüte an der Unterseite durch Vertropfungen mit Abnahme des Winkels verringert wird, während es an der Oberseite von der senkrechten hin zur horizontalen Orientierung zu einer Qualitätssteigerung kommt, da unter anderem der Einfluss des Treppenstufeneffekts mit abflachendem Winkel abnimmt. (11 S. 54-58)

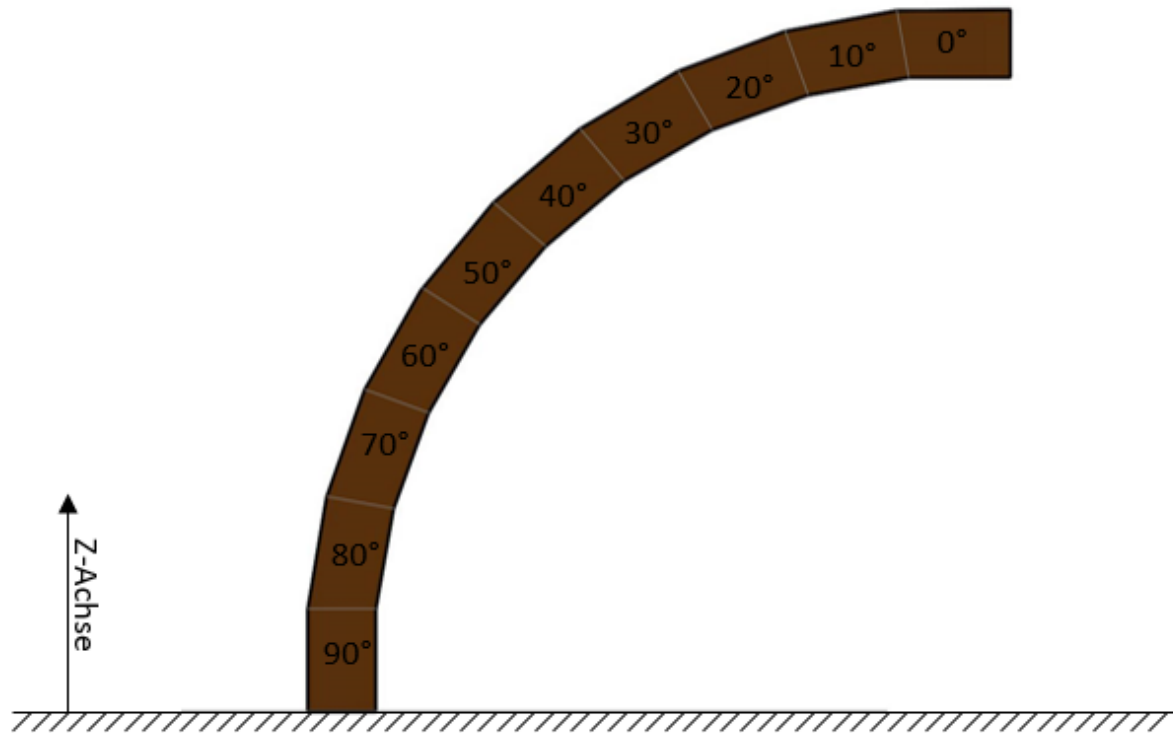


Abb. 18: Winkelinfluss bei SLM-Bauteilen

Für die Konstruktion und Prozessauslegung hat es sich bewährt eine maximale Überhangslänge von 0,2 mm und einen minimalen Winkel von  $45^\circ$  als unkritisch anzunehmen (17).

Strukturen unterhalb dieser Grenzwerte werden mit Supportstrukturen versehen, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten. Die Grenzwerte werden durch das verwendete Material und die Prozessparameter beeinflusst, weshalb die Werte lediglich zur Vorauslegung genutzt werden können. (11 S. 54-58), (8)

In Abb. 19 ist der Kopf einer Zugprobe zu erkennen, bei der es durch Nichteinhalten der Gestaltungsrestriktionen zu Prozessstörungen an gekippten Flächen und Überhängen gekommen ist.

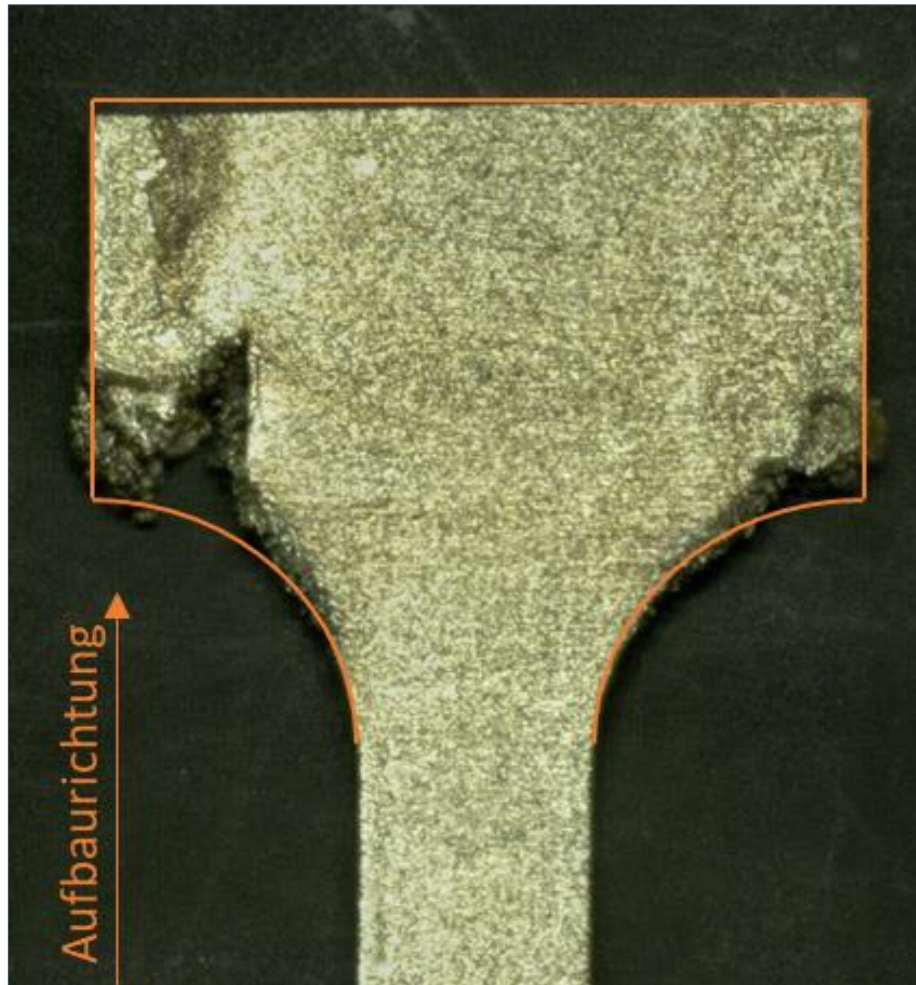


Abb. 19: Aufbaufehler durch überstehende ungestützte Flächen

Deutlich zeigt sich auf der linken Seite, dass sich der Aufbaufehler über viele Schichten in Aufbaurichtung fortsetzt. Mit zunehmender Bauteilhöhe nähert sich die Zugprobe wieder der orange eingezeichneten Idealkontur an, jedoch deuten die Verfärbung und die ungleiche Bauteilhöhe, dass sich die Störung bis zur Oberkante durchzieht. Der unsymmetrische Einfluss der Störung wird auf den Einfluss des Beschichters zurückgeführt, der in diesem Fall von links kam.

### 3.1.2 Ausgangsmaterial

Wie bei allen Fertigungsverfahren beeinflusst das Ausgangsmaterial den Fertigungsprozess durch seine charakteristischen Materialeigenschaften signifikant. Dazu zählen beim Selektiven Laserschmelzen besonders die intrinsischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, thermische Ausdehnung, Schmelzpunkt und die Laserstrahl Absorptionrate, da diese den Aufschmelz- und Erstarrungsprozess signifikant beeinflussen. (10 S. 12-13)



Bei der Materialauswahl wird im Allgemeinen auf Serienwerkstoffe zurückgegriffen, welche durch Gasverdüsen zu einkomponentigen, sphärischen Körnern geformt werden und bedingt durch ihre geometrische Form Fließfähigkeit und Schüttdichte des Pulvers begünstigen. (18 S. 9), (6 S. 6), (19), (10 S. 12-13)

Darüber hinaus wird der Prozess und in besonderem Maße die Bauteildichte entscheidend durch die Pulverkorngröße, auch Kornfraktion genannt, beeinflusst. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei abnehmender Korngröße die Bauteildichte steigt, sich das Fließverhalten jedoch verschlechtert, wodurch eine ungleichmäßige Schmelzspur entsteht. (18 S. 15-17), (10 S. 12-13)

### 3.2 Orientierung im Bauraum

Die Bauteilorientierung stellt einen signifikanten Einflussfaktor im Fertigungsprozess dar.

Zum einen besteht ein Einfluss auf die Bauteilauflösung, in dem das Bauteil so platziert wird, dass komplexe Geometrien nicht oder weniger dem Treppenstufeneffekt unterliegen. Zum anderen hat die Orientierung einen direkten Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften. Dieser Effekt beruht darauf, dass die Gefahr von Bindefehlern beim Verschmelzen der einzelnen Schichten höher ist als beim Verschmelzen von Schmelzbahnen innerhalb einer Schicht. Bedingt durch diese Schichtbindungsfehler sind Kenngrößen wie Bruchdehnung oder Zugfestigkeit in der Aufbaurichtung vermindert. (20 S. 79&80), (14 S. 12)

Zudem können durch Neigung des Bauteils große Flächen innerhalb einer Schicht reduziert werden, was die Gefahr von thermischem Verzug mindert. Zusätzlich bestimmt die Orientierung die Bauteilhöhe im SLM-Prozess und damit auch maßgeblich die Bauzeit. (10 S. 13)

Ebenfalls gilt es zu beachten, dass die benötigte Supportmenge durch eine geeignete Orientierung reduziert werden kann, wie in Abb. 20 verdeutlicht wird. (20 S. 79&80), (14 S. 12)

Es sind drei unterschiedlich orientierte Zugproben mit den jeweiligen Supportstrukturen abgebildet. Aufgrund der Winkel zwischen den einzelnen Flächen und der Bauplatte

unterscheidet sich die Menge an benötigten Supports und damit auch der Material- und Nachbearbeitungsaufwand erheblich.

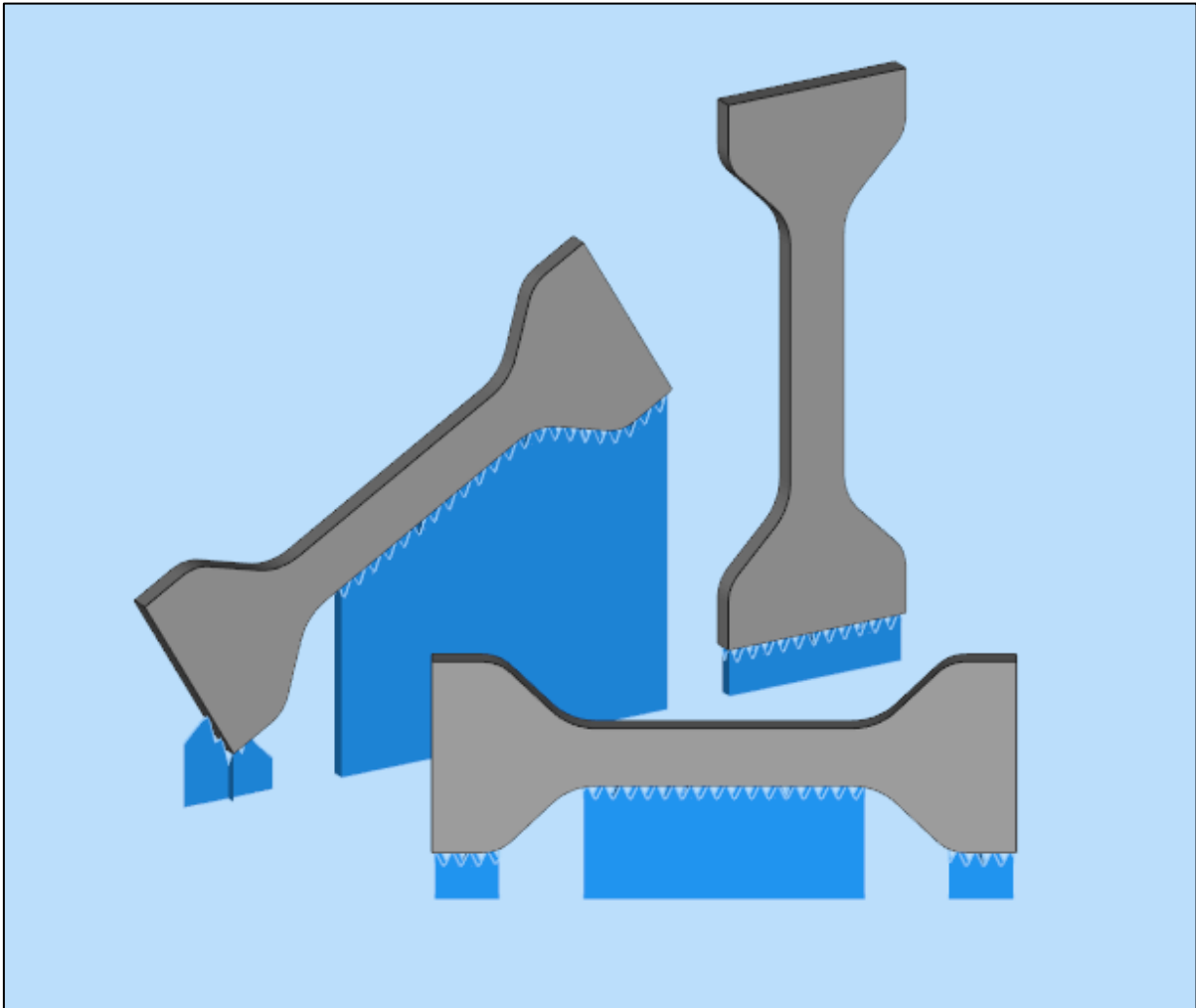


Abb. 20: Einfluss der Bauteilorientierung auf die benötigte Supportmenge

Beding durch die beschriebenen Auswirkungen der Orientierung kann bei der horizontalen Probe eine höhere Festigkeit und eine deutlich geringere Fertigungszeit erwartet werden, als bei der vertikalen Probe.

### 3.3 Bauteilparameter

Die Bauteilparameter fassen jene veränderlichen Parameter zusammen die den Belichtungsvorgang und die Schichtdicke bestimmen und stellen den stärksten Einfluss auf das zu fertigende Bauteil. (10 S. 13)

Dazu gehören die Parameter des Energieeintrages, welche die Intensität der Energieeinbringung betreffen, sowie die Scan- und Belichtungsstrategie, in denen die Verfahrenswege des Laserstrahls hinterlegt sind. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

### 3.3.1 Energieeintrag

Der Energieeintrag setzt sich aus weiteren Parametern zusammen und gibt Auskunft darüber, welche Energiemenge in einem definierten Bereich eingebracht wird. Dabei wird die eingebrachte Energie im Allgemeinen als Streckenenergie oder Volumenenergie angegeben, wobei beide Angaben starke Vereinfachungen und nur bei Angabe zusätzlicher Prozessparameter aussagekräftig sind. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

Generell wird für den Fertigungsprozess ein möglichst hoher Energieeintrag bei maximierter Scangeschwindigkeit angestrebt um die Fertigungszeit zu reduzieren. Jedoch führt eine zu hohe Energieeinbringung zu Verdampfungen, Spritzern und Schmelzbahninstabilitäten. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

Durch Verdampfungen entstandene Dämpfe können den Laserstrahl ablenken und abschirmen, was zu Ungenauigkeiten bei der Belichtung führt, während die wiedererstarten Spritzer auf den noch zu belichtenden Flächen zu schwankenden Bauteildichten und Fehlstellen führen können. Starke Temperaturerhöhung der Schmelze können zu einer verlängerten Abkühlzeit und dadurch zu Instabilität führen, in Folge dessen die Schmelze in mehrere Tropfen zerfällt. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

Bei einem zu geringen Energieeintrag kommt es zu mangelhaften Pulverbindungen und Porenbildung. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

Die Volumenenergiedichte  $E_V$  speziell gibt Auskunft über die durch den Laserstrahl in einer Schmelzbahn eingebrachte Energie. Dazu wird die Laserstrahlleistung  $P_{LS}$  auf die Schichtdicke  $D_S$ , dem Spurbabstand  $S_A$  und der Scangeschwindigkeit  $v_S$  bezogen. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

$$E_V = \frac{P_{LS}}{D_S \cdot v_S \cdot S_A} \quad (3.1)$$

Die Streckenenergie  $E_S$  bezieht sich ausschließlich auf die eingebrachte Energie einer Laserbahn. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

$$E_S = \frac{P_{LS}}{v_S} \quad (3.2)$$

Es gilt zu beachten, dass die Streckenenergie die Einflüsse der Schichtdicke, der Materialeigenschaft und des Laserfocuses nicht mit einbezieht. Daher kann die Streckenenergie nur unter der Voraussetzung, dass die restlichen Parameter identisch sind, zum Vergleich herangezogen werden. Die beim Energieeintrag ausschlaggebenden Parameter werden im Folgenden erläutert.

### Parameter des Energieeintrages

Die für den Energieeintrag entscheidende Parameter sind in Abb. 21 dargestellt. Diese sind die Laserstrahlleistung, die Scangeschwindigkeit, die Schichtdicke und der Spurabstand, welcher aus weiteren Parametern resultiert. (10 S. 13), (5 S. 722), (14 S. 8-10), (18 S. 15-18), (11 S. 13-16)

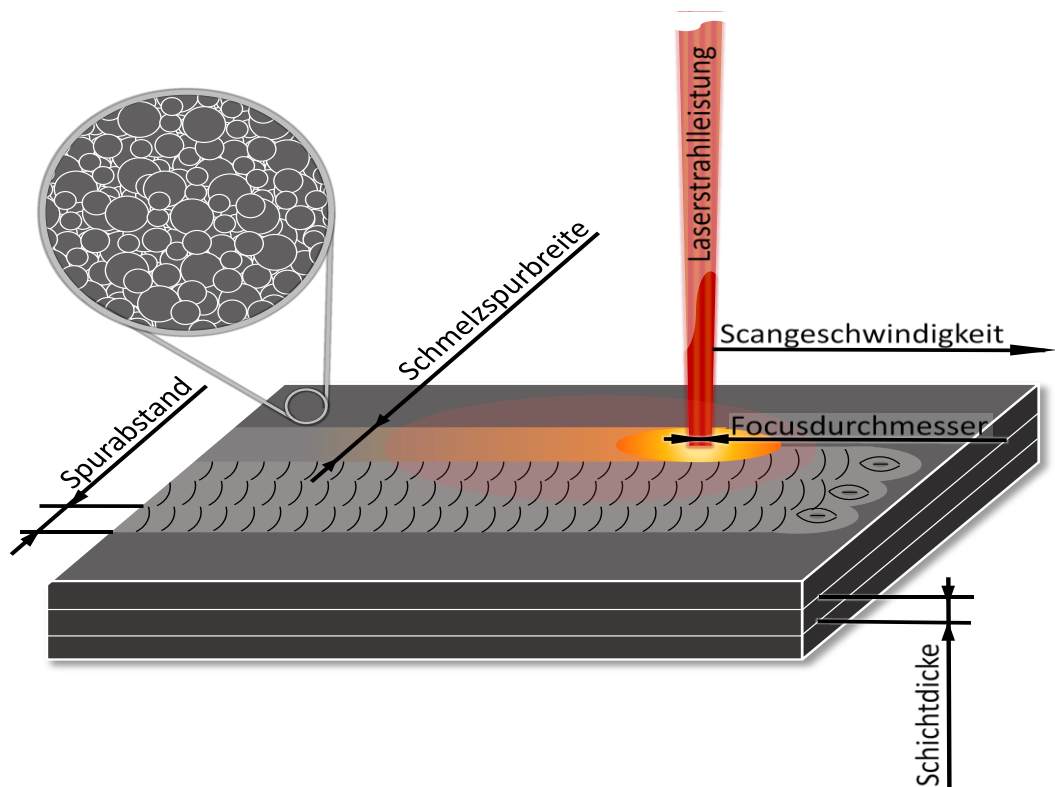


Abb. 21: Schematische Darstellung der dominierenden Parameter beim SLM-Prozess

### Laserstrahlleistung

Die Laserstrahlleistung gibt an, welche Energiemenge der Laserstrahl pro Zeit zur Verfügung stellt. (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10)

### Scangeschwindigkeit

Die Scangeschwindigkeit gibt Auskunft über die Geschwindigkeit, mit der sich der Laserstrahl über das Pulverbett bewegt und kann als Äquivalent zur Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen aufgefasst werden. (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10)

Im Allgemeinen wird eine hohe Scangeschwindigkeit angestrebt um die Aufbaurrate zu erhöhen. Dabei darf sich der Laserstrahl jedoch nicht schneller, als die stabile Schmelze bewegen, da sonst die geschmolzenen Partikel keine Zeit haben zusammenzulaufen. Begrenzt wird die Scangeschwindigkeit zusätzlich durch die thermische Leitfähigkeit des Pulvers. Wenn der Wärmefluss unterhalb der Scangeschwindigkeit liegt, kann es bedingt durch Instabilitäten zu unterbrochenen Schmelzspuren kommen. (10 S. 14)

### Spurbreite und Spurabstand

Die einzelnen Schichten entstehen durch, das aneinander reihen von sich überlappenden Schmelzspuren. Die Breite einer einzelnen Spur hängt dabei von der Laserstrahlleistung, der Scangeschwindigkeit, dem Laserfocus und dem verwendeten Material, sowie dessen Körnung ab. Der Spurbabstand  $S_A$  ergibt sich aus der Schmelzspurbreite  $S_B$  und dem Spurbversatzfaktor  $A_1$ . (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10)

$$S_A = A_1 \cdot S_B \quad (3.3)$$

Für die Überlappung der einzelnen Spuren wird in der Literatur ca. 30% empfohlen, womit der Spurbversatzfaktor in erster Näherung 0,7 beträgt und durch Versuche weiter angepasst wird. Ein zu hoher Spurbabstand führt zu einer unzureichenden Verbindung der einzelnen Schmelzspuren, während es bei einem zu geringen Spurbabstand zur sogenannten Pulververarmung kommt. Dabei wird bedingt durch die Oberflächenspannung der Schmelze, benachbartes Pulver angezogen und steht dadurch nicht mehr für die nächste Schmelzbahn zur Verfügung. (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10), (10 S. 14&15)

### Focusdurchmesser

Der Focusdurchmesser gibt den Durchmesser des auftreffenden Laserstrahls an und hat einen direkten Einfluss auf die Schmelzspurbreite, da durch einen größeren Focusdurchmesser in kürzerer Zeit mehr Pulverfläche belichtet werden kann. (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10)

### Schichtdicke

Die Schichtdicke beeinflusst maßgeblich die Fertigungsgeschwindigkeit und Geometrieauflösung. Bei steigender Schichtdicke sinkt die Geometrieauflösung, während die Fertigungsgeschwindigkeit steigt, weshalb ein Kompromiss gefunden werden muss. Die Zusammenhänge werden in (2.2.4 Einfluss der schichtweisen Generierung) erläutert. In der Praxis haben sich Schichtdicken zwischen 20 und 50  $\mu\text{m}$  bewährt. (18 S. 15-17), (10 S. 13), (11 S. 13&14) (6 S. 9&10), (10 S. 14)

## 3.3.2 Scanstrategie

Die Scanstrategie beschreibt das Vorgehen beim Belichten einer Schicht. Durch das Anwenden geeigneter Scanstrategien lassen sich die Oberflächenbeschaffenheit und Maßhaltigkeit eines Bauteils verbessern. Es hat sich im Allgemeinen bewährt beim Schichtgenerieren, wie Abb. 22 zeigt in folgenden drei Schritten vorzugehen. (11 S. 15)

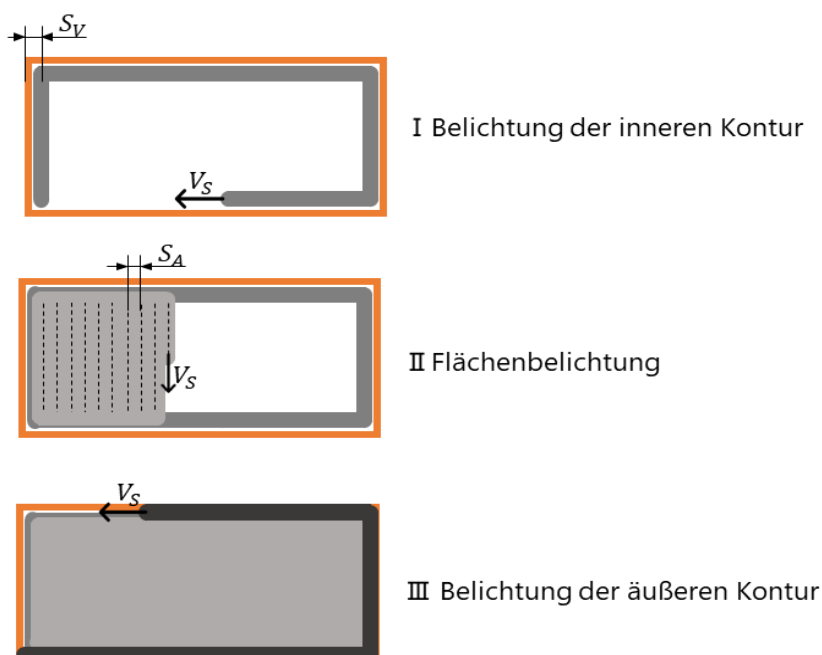


Abb. 22: Veranschaulichung der Scanstrategie

- I. Zu Beginn wird die innere Kontur abgefahren. Dabei wird der Laserfokus um den Spurversatz  $S_V$  von der idealen Bauteilgeometrie (Orange) nach Innen verschoben. Dadurch wird einer Konturvergrößerung des Bauteils, durch die geometrische Beschaffenheit des Laserstrahls, entgegengewirkt. (11 S. 15)
- II. Im zweiten Schritt erfolgt die Flächenbelichtung. (11 S. 15)
- III. Im letzten Schritt wird die endgültige Außenkontur fertiggestellt. Dazu wird der Laserstrahl exakt um eine halbe Schmelzspurbreite nach Innen versetzt. (11 S. 15)

Durch das beschriebene Vorgehen wird die Außenkontur einer Bauteilschicht aus einer Schmelzspur gefertigt, wodurch Maßhaltigkeit und Oberflächengüte steigen.

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass es ohne dieses Vorgehen zu scharfkantigen Stellen am Schichtrand kommt, wodurch die Beschichter Klinge Schaden nimmt und die folgenden Pulverschichten nicht mehr richtig aufgetragen werden. (17)

### 3.3.3 Belichtungsstrategie

Bei der Flächenbelichtung werden durch Aneinanderreihen einzelner Schmelzspuren die Bauteilschichten erzeugt. Die dabei angewandte Belichtungsstrategie beeinflusst das spätere Bauteil in mehreren Hinsichten. In Abb. 23 sind die drei gängigsten Strategien mit ihren durch Pfeile angedeuteten Verfahrenswegen abgebildet. (6 S. 8&9), (11 S. 15&16)

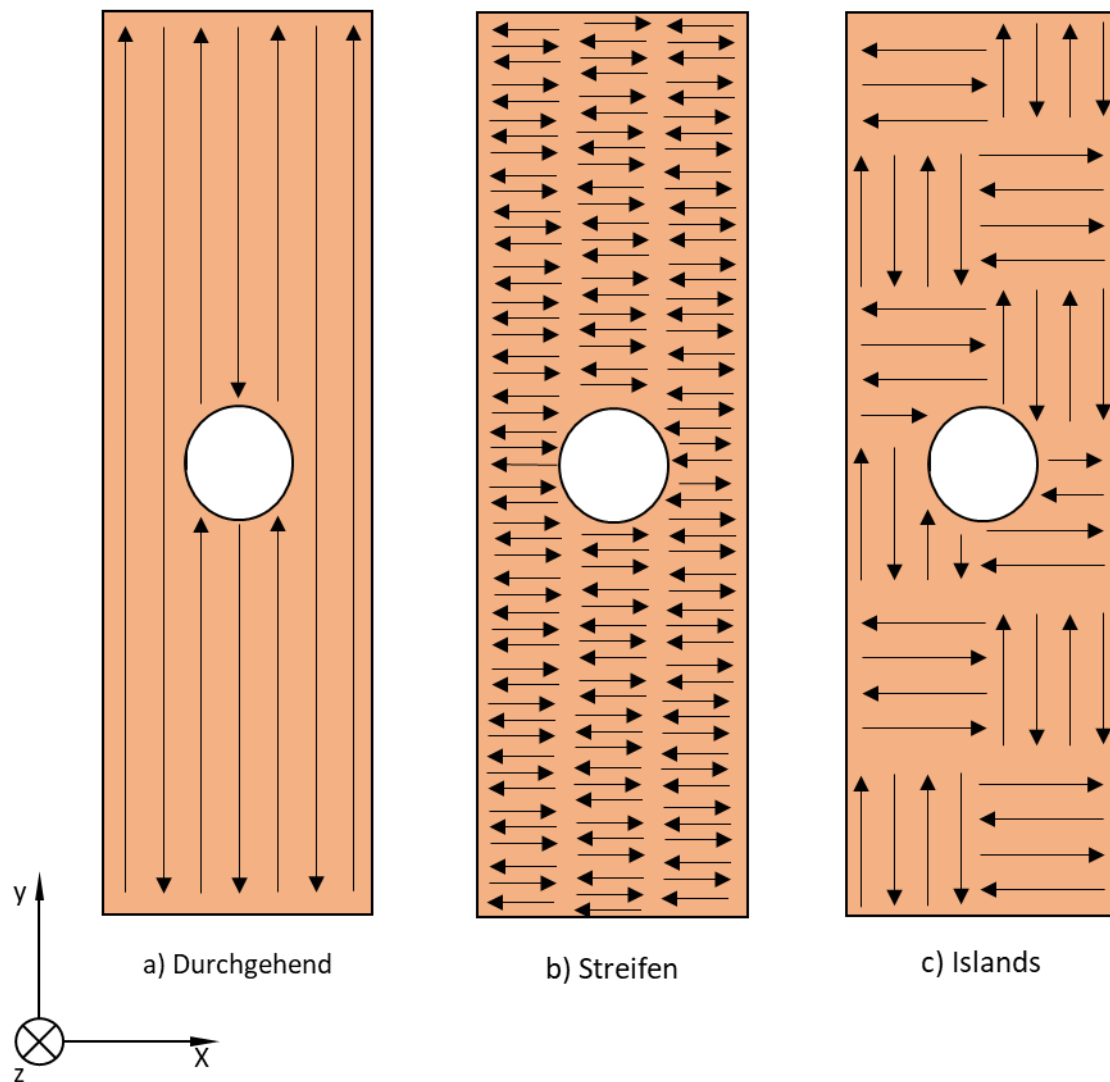


Abb. 23: Die gängigsten Belichtungsstrategien im Überblick

- Die durchgehende Belichtung führt aufgrund der vergleichsweise hohen und häufig unterschiedlichen Vektorlänge zu stärkeren Temperaturunterschieden, was die Bildung von thermisch induzierten Eigenspannungen erhöht. (6 S. 8&9), (11 S. 15&16)
- Bei der Streifenbelichtung wird die zu belichtende Fläche in einzelne Streifen unterteilt, welche durch verhältnismäßig kurze Schmelzbahnen erzeugt werden. Durch die kürzeren Vektorlängen kann die Gefahr von thermisch induzierten Eigenspannungen gemindert werden. (6 S. 8&9), (11 S. 15&16)
- Die Islands-Strategie unterteilt eine zu belichtende Fläche in einzelne kleine quadratische Felder, weshalb sie auch häufig als Schachbrettstrategie bezeichnet wird. Diese einzelnen Islands werden mittels durchgehender Strategie belichtet, wobei die Reihenfolge und Ausrichtung der Belichtungen entweder definiert oder stochastisch



erfolgt. Durch die Unterteilung der Schicht wird eine gleichmäßigere Energieeinbringung in das Bauteil gewährleistet, wodurch sich die Gefahr von thermisch induzierter Spannungen verringert. (6 S. 8&9), (11 S. 15&16), (17)

Üblicherweise wird die durchgängige Belichtungsstrategie für kleine Bauteile verwendet, da es dort zum einen abmessungsbedingt nicht zu langen Schmelzspuren kommt. Zum anderen benötigen die anderen Belichtungsstrategien eine gewisse Mindestbauteilgröße um einen Effekt zu generieren, weshalb diese auch nur bei größeren Bauteilen angewendet werden. (17)

Damit ein gefertigtes Bauteil möglichst isotrope Eigenschaften aufweist, werden Ausrichtung und Position des Belichtungsmusters nach jeder Schicht variiert. Durch diese Wechselbelichtung sollen die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und thermischen Spannungen entlang und quer der Schmelzspuren ausgeglichen werden. Zusätzlich werden die Anfangs- und Endpunkte der Schmelzbahnen, welche Entstehungsorte für Poren sein können, durch die Folgeschicht von einer durchgehenden Schmelzspur bedeckt und somit geschlossen. (6 S. 8&9), (11 S. 15&16)

## 4 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Die Lieferung und Inbetriebnahme der Anlage zum Selektiven Laserschmelzen (SLM-Anlage) erfolgte zu Beginn der wissenschaftlichen Arbeit. Im Lieferumfang befinden sich drei Parametersätze, zu denen bisher keine Informationen über die erreichbaren Materialkennwerte vorhanden sind. Ein mitgeliefertes Materialdatenblatt gibt grundsätzliche Auskünfte über die erreichbaren Materialkennwerte des verwendeten Werkstoffes im wärmebehandelten Zustand.

Im Rahmen der Inbetriebnahme erfolgte eine dreitägige Schulung (Basic Training Mlab Cusing) durch den Maschinenhersteller. Dabei wurden grundsätzliche Fähigkeiten zur Datenaufbereitung und dem Umgang mit der SLM-Maschine vermittelt.

Zusätzlich liegt eine in der Arbeitsgruppe erstellte wissenschaftliche Arbeit (21) zur Fertigung und Untersuchung von SLM gefertigten Probekörpern zur Untersuchung von Parametereinflüssen vor.

### 4.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird es angestrebt, die Auswirkungen verschiedener Prozessparameter auf die Oberflächenbeschaffenheit, die Form- und Lageabweichung, die mechanisch-technologischen Eigenschaften sowie die Gefügebeschaffenheit zu untersuchen. Dabei liegt der Fokus auf der Laserstrahlleitung, der Scangeschwindigkeit sowie dem Spurbstand und den daraus resultierenden Werten.

Dazu sollen vorhandene Parametersätze untersucht sowie Versuche konzipiert und durchgeführt werden um Rückschlüsse auf die Auswirkungen der einzelnen Parameter zu erhalten. Basierend auf den erlangten Erkenntnissen soll es erleichtert werden, Parametersätze speziell für den Verwendungszweck eines Bauteils zu auszulegen.

### 4.2 Versuche und Versuchsplan

Zur Umsetzung der gestellten Aufgabe werden zunächst die vorhandenen Parametersätze und deren allgemeiner Aufbau betrachtet um einen Überblick zu erhalten. Daraufhin wird ein entsprechender Versuchsplan erstellt und anschließend im experimentellen Teil der Arbeit

durchgeführt. Damit die Untersuchungen und ihre Ergebnisse wiederhol- und vergleichbar sind, wird die Untersuchung der Parametersätze festgelegt. Dabei erfolgt eine Orientierung an der bereits genannten wissenschaftlichen Arbeit (21).

### 4.2.1 Parametersatzaufbau

Für eine zielführende Untersuchung einzelner Parametereinflüsse muss zuerst der Aufbau eines Parametersatzes betrachtet werden, um dort die einzelnen Einflussgrößen lokalisieren zu können.

Die Abb. 24 zeigt den vereinfachten und schematischen Aufbau eines Parametersatzes. Dieser besteht im Allgemeinen aus vier Unterparametersätzen, welche jeweils die Fertigungsinformationen für einen Fertigungsbereich enthalten. Diese Bereiche sind Supportstrukturen, Innen- und Außenkontur bei der Scanstrategie sowie die Flächenbelichtung.

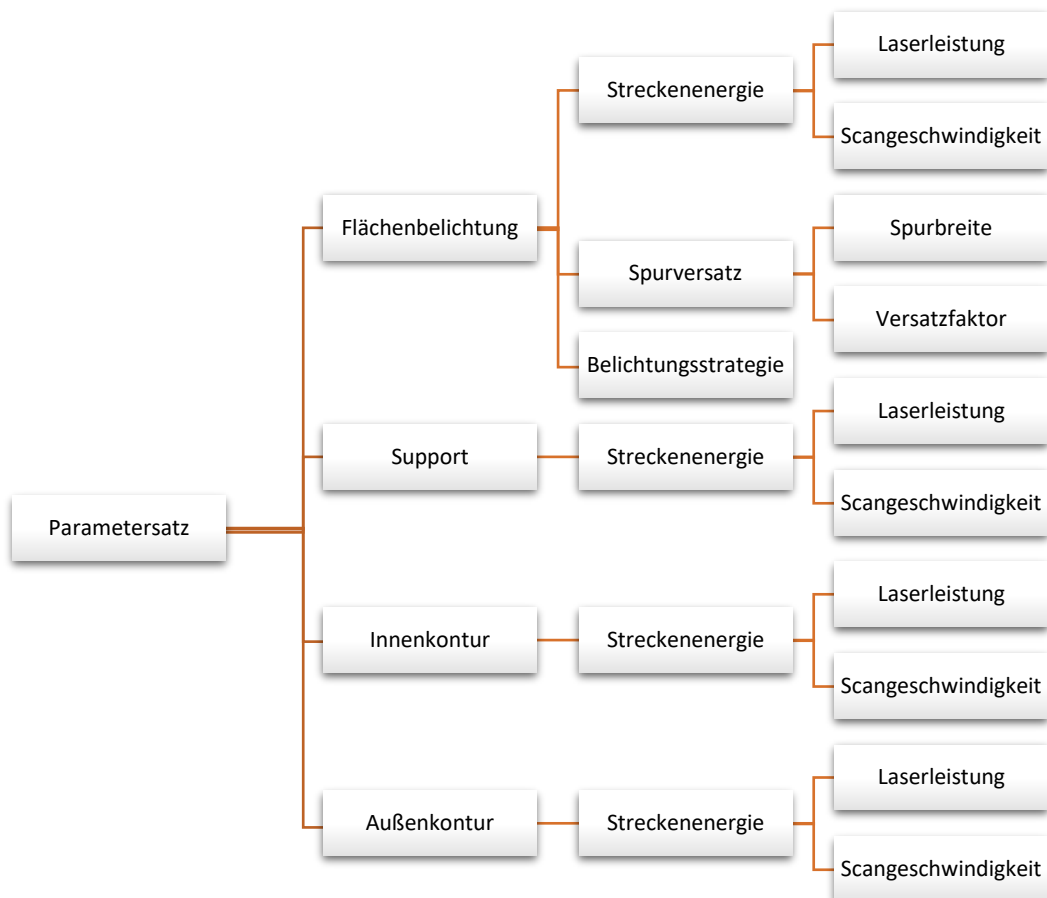


Abb. 24: Aufbau eines Parametersatzes

Da bei den Supportstrukturen und den Konturen der Scanstrategie lediglich einzelne Laserbahnen und keine Flächen belichtet werden, sind hier ausschließlich die aus Laserstrahlleistung und Scangeschwindigkeit bestehende Streckenenergie hinterlegt.

Der in der Abb. 25 gezeigte Unterparametersatz für die Flächenbelichtung enthält neben der Streckenenergie noch zusätzliche Informationen zur Belichtungsstrategie und dem Spurbestand, wodurch die Belichtung ganzer Flächen ermöglicht wird.

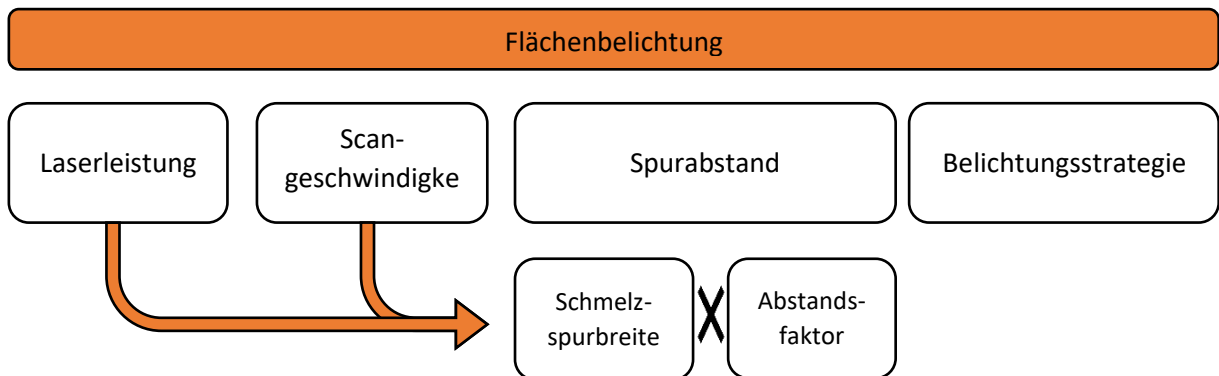


Abb. 25: Aufbau des Flächenbelichtungsparametersatzes

Wie durch Formel 3.3 beschrieben, resultiert der Spurbestand aus der tatsächlichen Schmelzspurbreite und einem Abstandsfaktor. Dementsprechend muss bei der Parametersatzauslegung eine Schmelzspurbreite angenommen werden. Diese hängt, wie beschrieben, maßgebend von der Laserstrahlleistung und der Scangeschwindigkeit ab.

Zur präziseren Parametrisierung wird daher ein Versuch zur Schmelzspurbreite durchgeführt. Wodurch es ermöglicht werden soll, die Schmelzspurbreite für beliebige Parameter vorherzusagen.

## 4.2.2 Versuchsplan

Zur Aufgabenumsetzung müssen die vorhandenen Parameter untersucht werden und ein Versuch zur Spurbreite durchgeführt werden. Weiterführend soll der Zusammenhang zwischen Energieeintrag und resultierender Dichte untersucht werden. Auf Basis dessen können weitere Parametersätze geschrieben und vollständig untersucht werden.

Darüber hinaus werden mechanisch-technologische Materialkennwerte aus gewalztem 1.4404 ermittelt um Referenzwerte zu erhalten. Zusätzlich erfolgt eine Untersuchung des Ausgangsmaterials.

Die durchzuführenden Versuche sind in Abb. 26 aufgeführt und in der abzuarbeitenden Reihenfolge geordnet. Dabei ist der letzte Versuch ausgegraut, da dieser voraussichtlich nicht im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden kann. Aufgrund des hohen zu erwartenden Erkenntnisgewinns durch den Versuch, erfolgt hier dennoch die Aufführung.

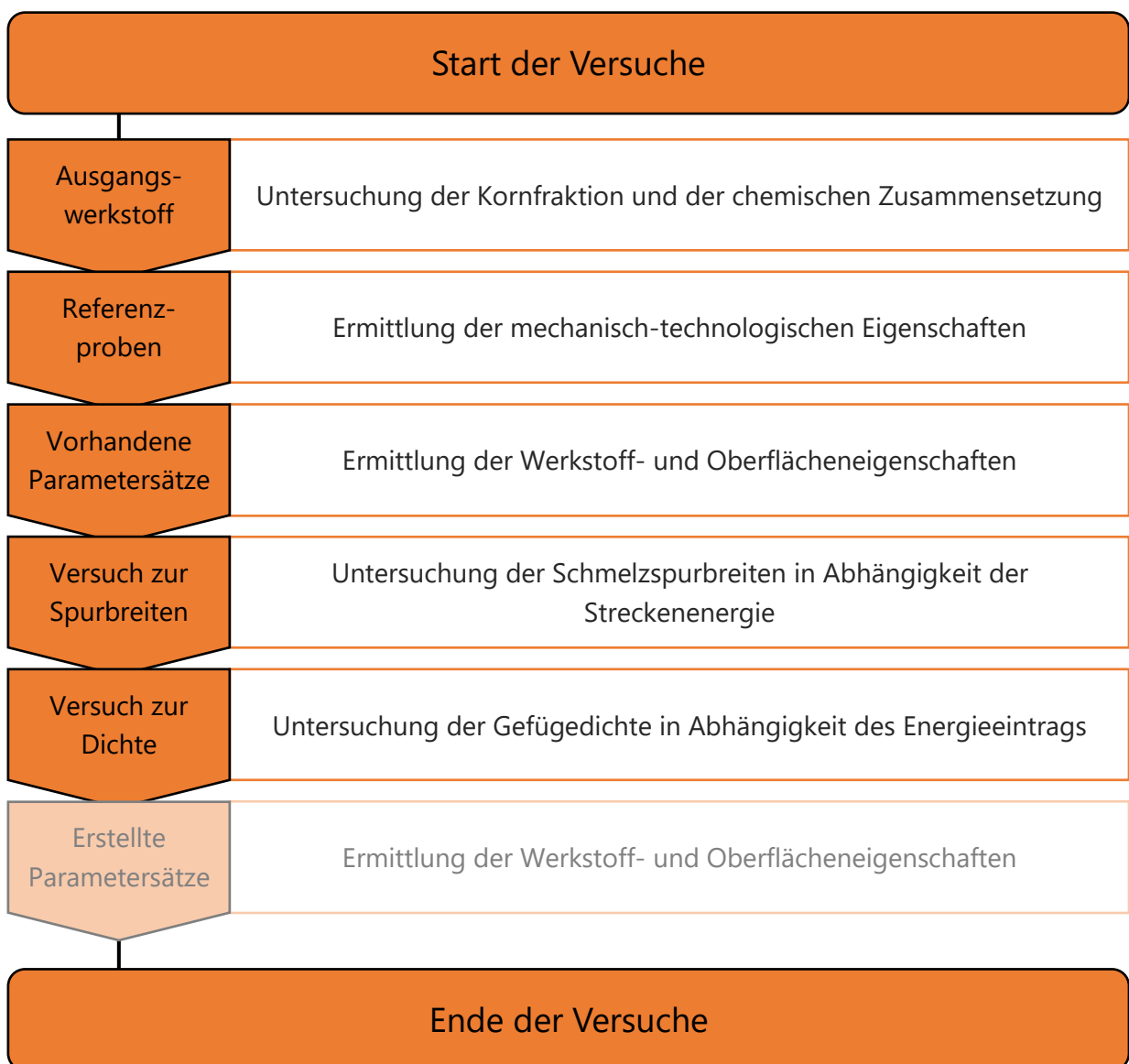


Abb. 26: Versuchsplan

In einem ersten Versuch wird das allen weiteren Versuchen zu Grunde liegende Ausgangsmaterial untersucht um materialbedingte Ergebnisverfälschungen ausschließen zu

können. Dabei wird vor allem die chemische Zusammensetzung und die Kornfraktion des Pulvers untersucht.

Zur besseren Einordnung der ermittelten Kennwerte selektiv Lasergeschmolzener Proben erfolgt ein Vergleich mit spanend gefertigten Zugproben. Diese werden zur Erzeugung von Referenzwerten genutzt und wie die selektiv lasergeschmolzene Proben hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht.

Zur Ermittlung der Ausgangssituation werden zu Beginn die drei vorhandenen Parametersätze untersucht und auf den Ergebnissen aufbauend ein Versuch zur Schmelzspurbreite konzipiert, um die Auslegung neuer Parametersätze zu erleichtern.

Daraufhin folgt ein Versuch, der den Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag und der Gefügedichte untersucht.

Nach Möglichkeit werden die Versuchsergebnisse genutzt werden um neue Parametersätze zu schreiben und vollständig zu untersuchen.

### 4.3 Materialien und Methoden

Im Folgenden werden die in der wissenschaftlichen Arbeit verwendete SLM-Anlagen, sowie das Ausgangsmaterial vorgestellt. Zusätzlich werden die eingesetzten Messeinrichtungen und Untersuchungsverfahren beschrieben.

#### 4.3.1 SLM-Maschine „Mlab cusing R“

Die „*Concept Laser Mlab cusing R*“, oder abgekürzt „Mlab“ ist eine SLM-Maschine des Herstellers Concept Laser. Die Anlage arbeitet nach dem LaserCUSING®-Verfahren, wobei es sich um eine Form des selektiven Laserschmelzens handelt. Die Anlage ist für die Verarbeitung von reaktiven Pulverwerkstoffen ausgelegt und verfügt dementsprechend über eine geschlossene Prozesskammer und kann mit einem Schutzgas durchströmt werden. (22)

Zusätzlich steht eine verfahrbare Handhabungsstation mit Handschuheingriff zur Verfügung um Arbeiten am Bauraum durchführen zu können, ohne diesen mit der Umgebungsluft in

Verbindung zu bringen. Dazu kann die Handhabungsstation über einen Verriegelungsmechanismus gasdicht an die SLM-Anlage andockt werden. (22)

Der Hersteller gibt folgende Daten für die Mlab an:

Bearbeitungsbereich	90 mm x 90 mm x 80 mm (x, y, z)
Laser	Diodengepumpter Yb-Faserlaser mit 100 W Nennleistung
Focusdurchmesser	50 $\mu\text{m}$
Scangeschwindigkeit	Bis zu 7 m/s
Schutzgas	Stickstoff oder Argon
Schichtdicke	15 $\mu\text{m}$ – 50 $\mu\text{m}$

Für alle Versuche wird eine elastische Beschichter Klinge verwendet, um Prozessstörungen durch sich aufstellende Bauteilkanten entgegenzuwirken.

### 4.3.2 Werkstoff

Für die Versuche wird der austenitische nichtrostende Stahl X2CrNiMo17-13-2 in Pulverform verwendet. Das Ausgangsmaterial wurde über Concept Laser erworben und eignet sich laut diesem für Funktionsbauteile und Werkzeugkomponenten. (23)

Der Lieferant gibt für die chemische Zusammensetzung folgende Werte an.

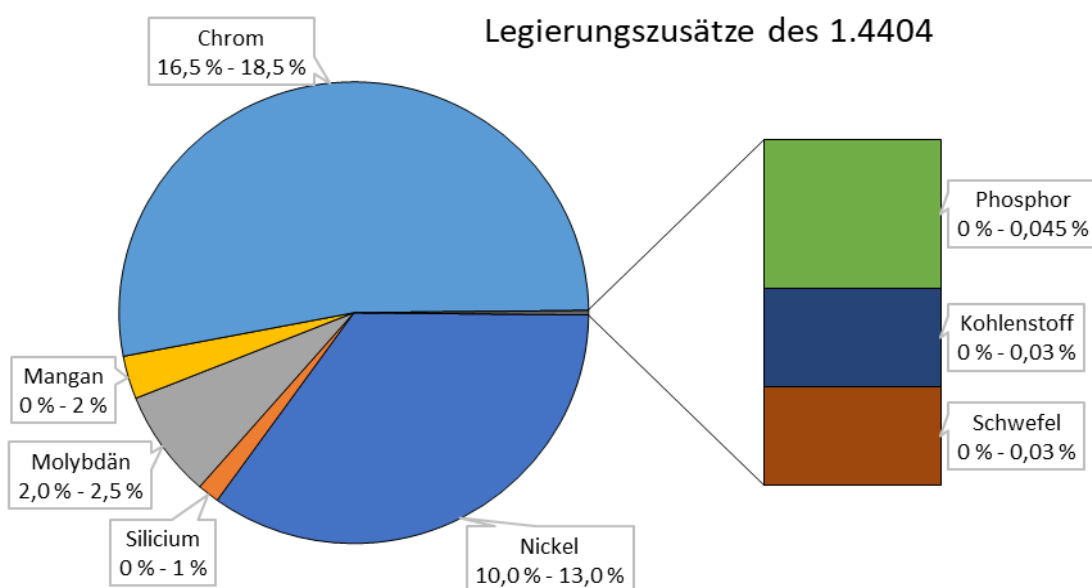


Diagramm 1: Grafische Darstellung der Legierungszusätze des 1.4404 Pulvers. (Die Grafik wurde anhand von Mittelwerten erstellt) (23)

Für die technischen Daten gibt der Lieferant lediglich Werte für den wärmebehandelten Zustand an. Deshalb werden noch As-built-Werte (20 S. 181-183) und allgemeine Materialwerte (24 S. 98-101) aus der Literatur herangezogen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Härtewerte in eine einheitliche Dimension umgewandelt.

Tabelle 1: Kennwerte des genutzten Werkstoffes (24 S. 98-101), (23), (20 S. 181-183), (25)

Kennwert	Allgemeine Angaben	Lieferantenangaben - Wärmebehandelt			Bauzustand (As-built)
		liegend	diagonal	stehend	
Dehngrenze in MPa	200	374 ± 5	385 ± 5	330 ± 5	462
Zugfestigkeit in MPa	500 - 700	659 ± 5	640 ± 5	529 ± 5	565
Bruchdehnung in %	40	65 ± 4	63 ± 4	63 ± 4	54
Härte	≤ 215 (HB30)	20 (HRC)	20 (HRC)	20 (HRC)	-
Härte (umgerechnet)	225 (HV30)	240 (HV30)	240 (HV30)	240 (HV30)	-

### 4.3.3 Messeinrichtungen

Die in der wissenschaftlichen Arbeit verwendeten Messverfahren und die zugehörigen Messmittel sind in diesem Kapitel zusammengefasst und werden einer Messmittelfähigkeitsanalyse unterzogen, um die Aussagekraft der Untersuchungen sicherzustellen. Die ausgewählten Messverfahren wurden zusätzlich in Vorversuchen auf ihre Messmitteltauglichkeit untersucht.

#### Analysenwaage

Zur Bestimmung der Masse wird die Analysenwaage mit einer Auflösung von 0,1 mg verwendet. (26) Bedingt durch die ideale Masse eines Dichtewürfels und der Auflösung der Waage kann ein Dichtenunterschied von 0,006 % unter Idealbedingungen detektiert werden.

Für die Untersuchung wird die elektronische Analyse- und Präzisionswaage „A 200 S“ von Sartorius verwendet. (26)

#### Lichtmikroskopie



Durch die Lichtmikroskopie lässt sich unter anderem die Gefügeart bestimmen. Dazu wird der aufbereitete Probekörper beleuchtet (Auflicht-Mikroskopie) und die reflektierten Lichtstrahlen werden über Linsen gebündelt. Dabei ist eine maximale Vergrößerung, durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts, auf das 1.000fache begrenzt. (12 S. 309 - 313), (27 S. 2 & 3)

Für die Untersuchungen wird das digitale Lichtmikroskop „VHX-2000“ von Keyence (Abb. 27) verwendet.

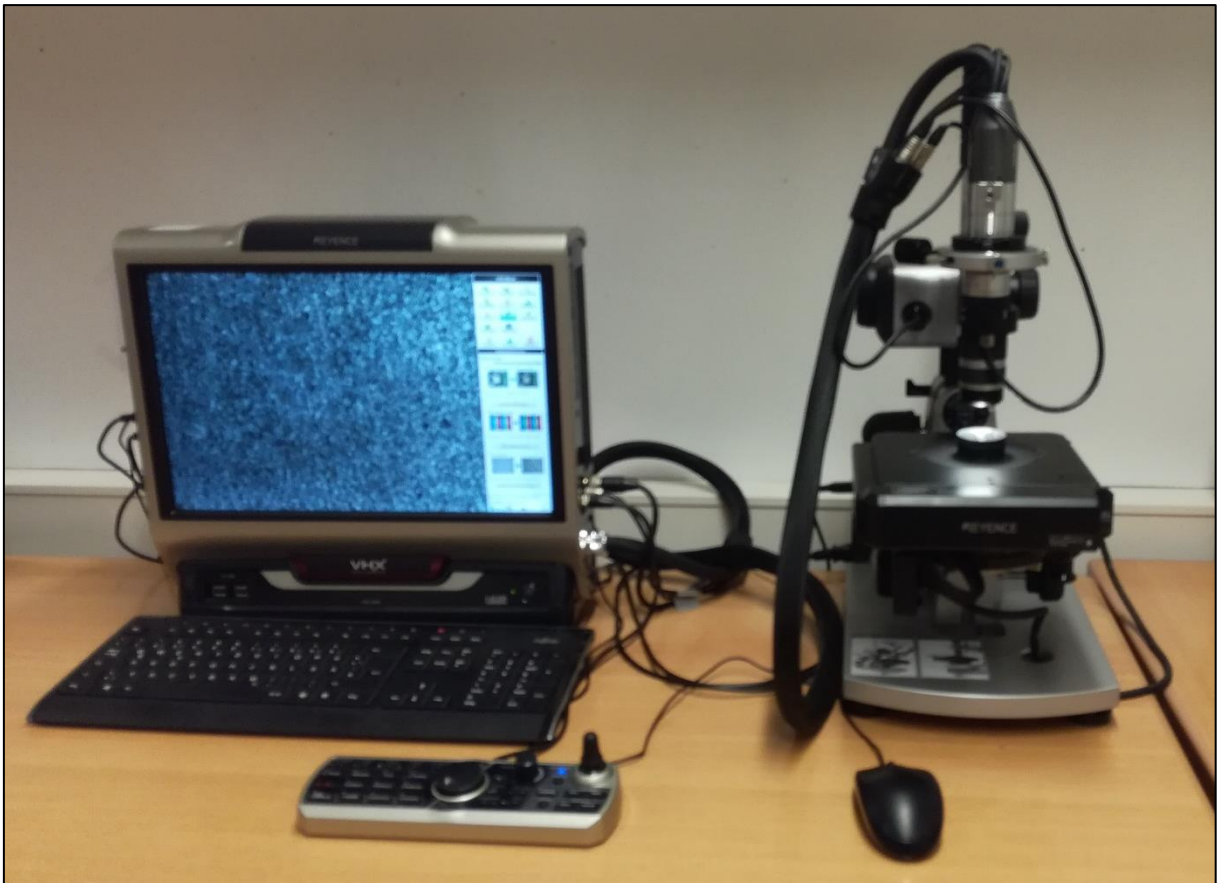


Abb. 27: Digitales Lichtmikroskop „VHX-2000“ vom Hersteller Keyence

### Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) ist ein leistungsstarkes Mikroskopieverfahren und übersteigt die Leistungsfähigkeit der Lichtmikroskopie um ein Vielfaches. Durch den Einsatz von Elektronenstrahlen, anstelle sichtbaren Lichts, ist eine 200.000fache Vergrößerung bei hoher Auflösung und Schärfentiefe möglich. Dadurch eignet sich die Rasterelektronenmikroskopie zur Analyse des Gefügebau. (12 S. 309 - 313), (27 S. 6 & 7)

Für die Untersuchung wird das Rasterelektronenmikroskop mit integrierter EDX-Analyse „Phenom ProX“ verwendet.



Abb. 28: Desktop Rasterelektronenmikroskop mit integrierter EDX-Analyse „Phenom ProX“ (28)

### Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) gibt Aufschluss über die elementare Zusammensetzung eines Festkörpers. Dazu regt ein Elektronenstrahl, wie er auch beim REM verwendet wird, die Atome des Probenkörpers an, eine für ihr Element charakteristische Röntgenstrahlung abzugeben. Diese Röntgenstrahlung wird von einem Detektor registriert, in digitale Signale umgewandelt und an einen Auswertungs-PC weitergeleitet. (27 S. 60 & 61)

Für die Untersuchung wird, wie bei der Rasterelektronenmikroskopie, das „Phenom ProX“ verwendet.

### Härteprüfung nach Vickers

Das Härteprüfverfahren nach Vickers zeichnet sich durch eine universelle Anwendbarkeit aus, welche auf der Einstellbarkeit der Prüfkraft beruht, wodurch diese an die Messgegebenheiten angepasst werden kann. Aufgrund der Messbedingungen empfiehlt sich die Standard-Prüfkraft von 30 kp (HV30), was 294 N entspricht. Dabei werden alle zu erwartenden Härtewerte abgedeckt, bei einer maximalen Mindestprobendicke von 2 mm. (29)

Bei der Prüfung dringt ein pyramidenförmiger Diamant mit quadratischer Grundfläche in die Probe ein. Dabei muss die Prüfkraft stoßfrei aufgebracht und konstant gehalten werden. Nach einer vereinbarten Prüfzeit wird entlastet und die zurückbleibenden Eindrucksdiagonalen werden vermessen, woraus sich die Härte nach Vickers bestimmen lässt. (29), (12 S. 290 & 291)

Verwendet wird eine Härteprüfmaschinen der Otto-Wolpert – Werke GmbH aus dem Jahr 1958.

### Rauheitsuntersuchung mittels Tastschnittverfahren

Die in der Literatur angegebenen Rauheitswerte reichen von 20  $\mu\text{m}$  bis 130  $\mu\text{m}$  bei der gemittelten Rautiefe Rz und von 6  $\mu\text{m}$  bis 15  $\mu\text{m}$  für den Mittenrauwert Ra (11 S. 55-57), (30). Zur Abdeckung dieses Bereichs wird das Tastschnittverfahren angewandt, bei dem eine Diamanttastnadel mit konstantem Vorschub über die zu testende Oberfläche bewegt wird. Dabei wird der senkrechte Hub der Tastnadel in elektrische Signale umgewandelt und von der Software in die entsprechenden Rauheitskennwerte umgewandelt. (31), (32)

Zur Verfügung steht das Oberflächenmessgerät „Perthen Perthometer PRK“ vom Hersteller „Mahr Perthen“ (Abb. 29).



Abb. 29: Oberflächenmessgerät „Perthen Perthometer PRK“ vom Hersteller „Mahr Perthen“; Baujahr 1996

### Bügelmessschraube

In der Literatur wird für das selektive Laserschmelzen eine Genauigkeit von  $\pm 0,1\%$  bis  $\pm 0,2\%$  für Längen angegeben, wobei der Wert je nach verwendetem Ausgangsmaterial, Prozessparametern und Literatur schwankt (11 S. 61-77).

Die in Abb. 30 dargestellte Bügelmessschraube ist eine Form der Messschraube zur Ermittlung von Außenmaßen (33). Durch Drehung der gerändelten Trommel (rechter Teil der Bügelmessschraube) wird diese zusammen mit der Messspindel verfahren. Dadurch können die Messflächen zusammengefahren werden, bis ein dazwischen befindliches Prüfstück vollständigen, flächigen Kontakt hat. Die Distanz zwischen den beiden Messflächen spiegelt die Länge des Prüfstücks wieder und kann durch eine Skala mit Nonius an der Trommel

abgelesen werden. Dabei wird eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,2\%$  erreicht, wodurch das Messmittel für die Untersuchungen als geeignet angesehen wird. (33), (34)

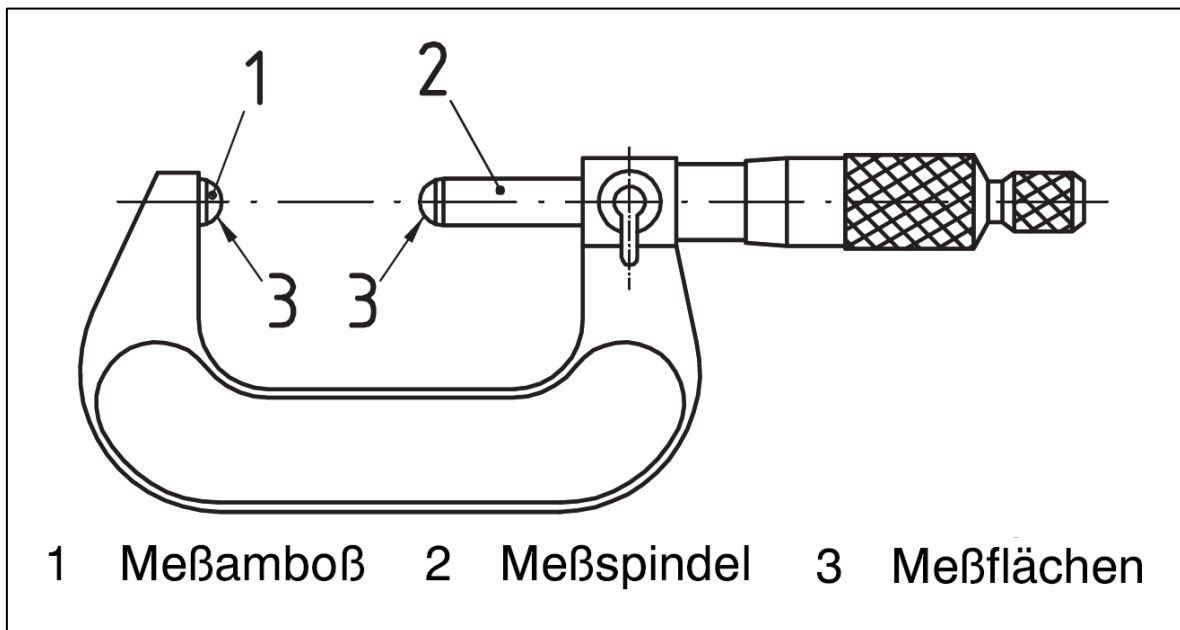


Abb. 30: Bügelmessschraube nach DIN 683-3 (33)

### Zugmaschine

Beim Zugversuch werden in der Regel genormte Proben durch eine konstant steigende Zugbelastung bis zum Bruch verlängert. Während der Untersuchung wird die Probenverlängerung und die Zugkraft aufgezeichnet, woraus grundlegenden Informationen und Kennwerte über das Verformungsverhalten eines Werkstoffes gewonnen werden können. (15), (12 S. 260)

Basierend auf der maximalen Zugfestigkeit des Werkstoffes wird eine Prüfkraft von 8400 N erwartet. Die verfügbare Zug-Druck-Prüfmaschine vom Hersteller „Roell und Korthaus“ aus dem Jahr 1991 weist eine maximale Prüfkraft von 25 kN auf, wodurch die Verfahrensfähigkeit gewährleistet ist.

### **4.3.4 Probenpräparation**

Die Metallographie untersucht den Gefügebautbau durch mikroskopische Verfahren. Dazu wird eine Schnittebene durch das Gefüge gelegt, um dieses als zweidimensionales Bild, dem sogenannten Schliffbild, darzustellen. In der Abb. 31 wird dieses Prinzip durch einen Meteoriten verdeutlicht. Durch die reine Betrachtung ist kaum eine Aussage über den inneren Aufbau des

Meteoriten zu treffen. Erst durch einen Schnitt durch das Material können Art, Größe, Form und Anordnung der einzelnen Bestandteile bestimmt werden. Darüber hinaus werden Poren und Einschlüsse sichtbar. (12 S. 309 - 313), (35 S. 1)



Abb. 31: Angeschliffener Meteorit (36)

### Technische Umsetzung

Die Dichtequader werden gereinigt und zur besseren Handhabung in einem Kunststoffgranulat auf Epoxidharzbasis formpressend eingefasst. Bei dem auch als „Warmeinbetten“ bezeichneten Verfahren werden die Quader mit dem Kunststoffgranulat in einem Werkzeug unter Wärme- und Druckeinwirkung miteinander zu einem Probekörper verbunden. (37 S. 71-74)

Nach dem Abkühlen werden die erzeugten Probekörper maschinengestützt nassgeschliffen, um die Oberfläche zu ebnen (37 S. 81). Dabei werden die Probekörper in einer rotierenden Aufnahme mit konstanter Anpresskraft auf einer gegensätzlich rotierenden Schleifscheibe gedrückt.

Dem Schleifen folgt das mechanische Polieren, um die Oberfläche zu glätten (37 S. 113). Dabei werden feiner werdende Diamantemulsionen auf Polierscheiben aufgetragen und wie bei dem Nassschleifverfahren werden die Probekörper maschinengestützt bearbeitet. Die Proben

werden mit der nächst feineren Emulsion bearbeitet, sobald ein gleichmäßiges Oberflächenbild entstanden ist und keine Unregelmäßigkeiten mehr zu erkennen sind. Als Polierstufen werden 30 µm, 15 µm, 9 µm, 3 µm und 0,25 µm angewendet.

Zwischen den einzelnen Polierstufen muss eine gründliche Reinigung der Probekörper stattfinden, da sonst Schleifartikel aus vorherigen Polierstufen die Polierscheiben verunreinigen und die Oberfläche der Probekörper zerkratzen. Dazu werden die Proben gründlich mit Wasser gespült und anschließend mit vergälltem Ethanol benetzt, welcher durch einen warmen Luftstrom verdunstet wird. Dadurch können mineralische Verunreinigungen wie zum Beispiel Kalkflecken vermieden werden (37 S. 152-154).

Die polierten Proben können nun auf ihre Gefügedichte hin untersucht werden.

Damit das Gefüge betrachtet werden kann, müssen die Proben kontrastiert werden. Dazu wird die Oberfläche angeätzt. Dabei werden die Gefügebestandteile unterschiedlich stark angegriffen, wodurch sie einfallendes Licht unterschiedlich reflektieren und unterscheidbar werden (14 S. 156). Für die aus einem Chrom-Nickel-Stahl bestehenden Quader wurde eine aus 50 % Salzsäure und 10 % Salpetersäure bestehende V2A-Beize verwendet. Die Proben wurden der Säure für 60 Sekunden bei einer Temperatur zwischen 60°C und 80°C ausgesetzt.

### 4.3.5 Umwertung von Härtewerten

Die Umwertung von Härtewerten untereinander und zu Festigkeitswerten ist in der DIN EN ISO 18265 geregelt. Dabei muss beachtet werden, dass sich Härteprüfung und Zugversuch hinsichtlich der Werkstoffbeanspruchung deutlich unterscheiden, wodurch kein direkter Zusammenhang besteht. Jedoch konnte in statistisch Versuchen eine Korrelation der beiden Größen nachgewiesen werden. Dementsprechend basiert die Umrechnung auf empirischen Versuchen und weist dadurch lediglich einen beschränkten Gültigkeitsbereich auf. (25)

Die DIN EN ISO 18265 gilt ausschließlich für unlegierte und niedriglegierte Stähle, Vergütungsstähle, Kaltarbeitsstähle, Schnellarbeitsstähle, Werkzeugstähle, Hartmetalle sowie NE-Metalle und deren Legierungen. (25)

Da keine Regelung für die Umwertung bei Edelstählen besteht, erfolgt die Umwertung im Folgenden in Anlehnung an der Norm. Dazu werden die Umrechnungstabellen herangezogen,

die mit dem für 1.4404 zu erwartenden Härtewerten (HV 30) übereinstimmen. Aus den Daten wurde das Diagramm 2 erzeugt. Die einzelnen Punkte wurden mit einer polynomischen Trendlinie durchzogen, die dabei ein Bestimmtheitsmaß von 1 aufweist.

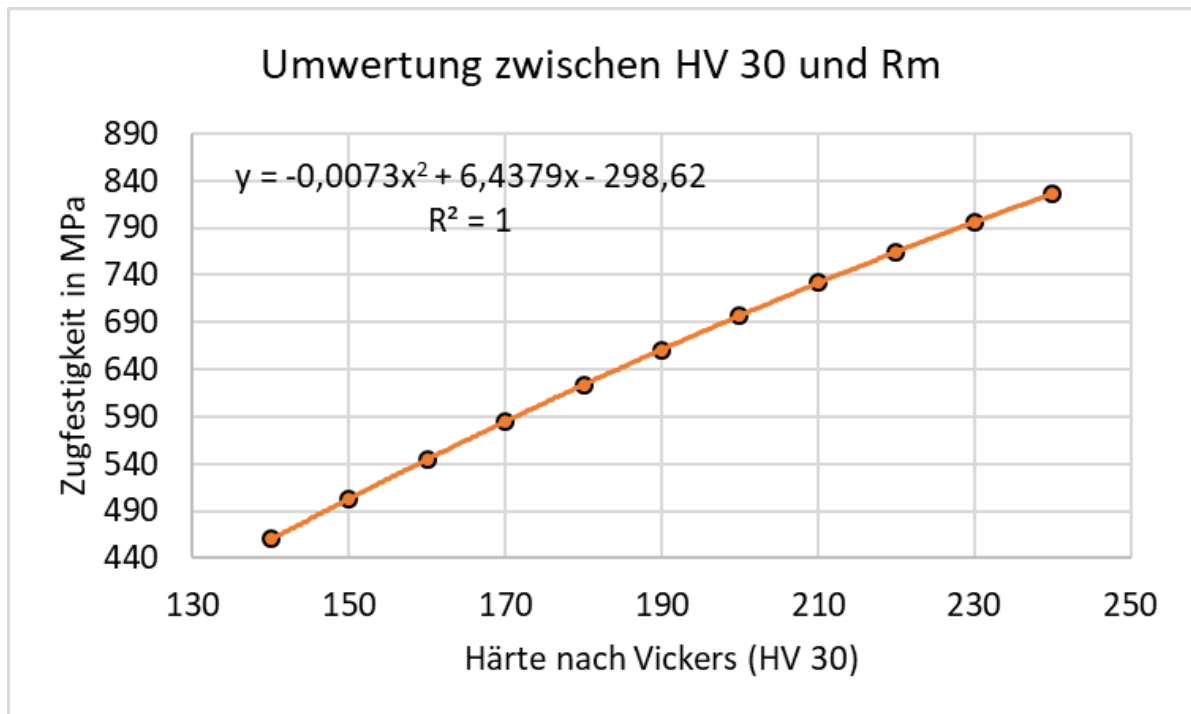


Diagramm 2: Diagramm zur Umwertung von Härtewerten nach Vickers in Zugfestigkeit (25)

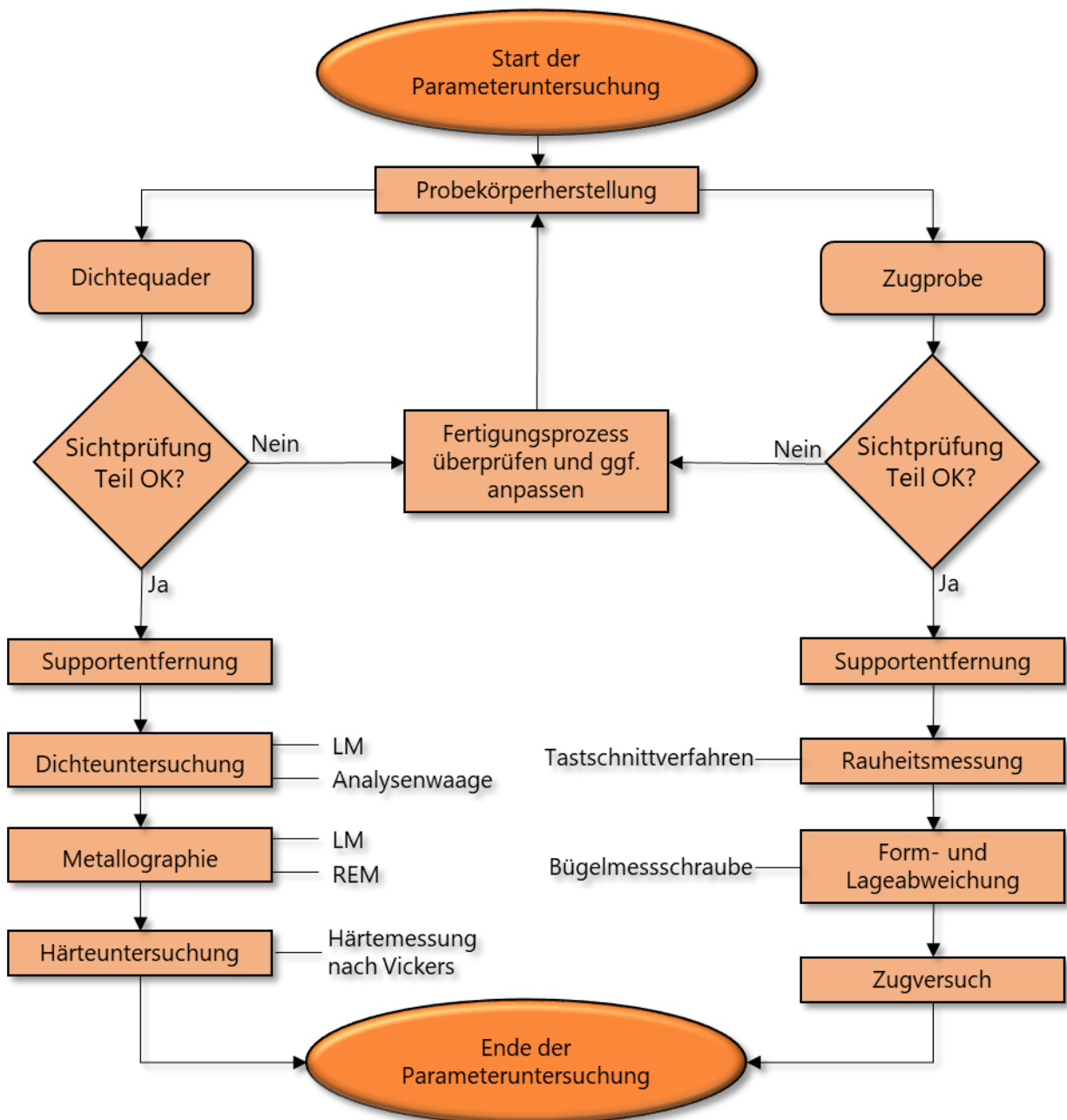
Die Graphengleichung wurde mit den entsprechenden Variablen versehen und kann nun im Härtebereich (HV 30) von 140 bis 240 angewandt werden.

$$R_m = -0,0073 \cdot (HV\ 30)^2 + 6,4379 \cdot (HV\ 30) - 298,62 \quad (4.1)$$

### 4.3.6 Untersuchung der Parametersätze

Damit eine Vergleichbarkeit der einzelnen Parametersätze möglich ist, wird der Untersuchungsablauf festgelegt und beschrieben, um die Wiederholbarkeit der zu Versuche gewährleisten.

Unter Verwendung der einzelnen Parametersätze werden Probekörper gefertigt und hinsichtlich ihrer Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften untersucht. Das Vorgehen ist im Ablaufdiagramm 1 festgelegt.



Ablaufdiagramm 1: Untersuchung der Parametersätze



Für die Untersuchung werden jeweils Dichtequader und Zugproben gefertigt und einer ersten Sichtprüfung unterzogen, um Fehler beim Aufbauprozess zu entdecken.

Zur Bestimmung der Dichte werden zwei Verfahren an den Dichtewürfeln angewandt.

Zum einen wird die Masse mittels einer Feinwaage bestimmt und mit dem Idealgewicht verglichen um eine Aussage zur Dichte zu erhalten. Daraus wird eine Kennzahl berechnet, die im Weiteren als „theoretischer Dichtewert“ bezeichnet wird. Diese dimensionslose Kennzahl wird mit  $D_T$  abgekürzt und ist als der Quotient zwischen idealer  $m_i$  und gewogene Masse  $m_g$  definiert.

$$D_T = \frac{m_g}{m_i} \quad (4.2)$$

Bei der theoretischen Dichte muss beachtet werden, dass Maßabweichungen und Pulveranhaftungen die Messwerte verfälschen, wodurch die Ergebnisse ausschließlich für den internen Vergleich genutzt werden können.

Zum anderen werden die Quader präpariert und unter dem Lichtmikroskop betrachtet um weitere Informationen zur Gefügedichte zu erhalten. Dabei findet eine softwaregestützte optische Auswertung statt. Da die Fehlstellen einfallendes Licht anders reflektieren, als die polierte Oberfläche, können diese durch ihren Kontrastunterschied unterschieden und ausgewertet werden. Die Flächeninhalte der Fehlstellen werden gemessen und als Prozentwert ausgegeben, woraus sich eine Aussage zur Dichte treffen lässt.

Der Gefügebau wird durch metallographische Verfahren untersucht. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der durch die Probenpräparation sichtbaren Schmelzspuren.

Zusätzlich erfolgt eine Härtemessung nach Vickers an den Dichtequadern. Zum Vergleich werden die Härtewerte zu Zugfestigkeit umgewertet.

Die Zugprobe wird in erster Linie zur Ermittlung mechanisch-technologischer Eigenschaften durch einen Zugversuch eingesetzt. Darüber hinaus werden die, im Vergleich zum Dichtequader, großen Abmessungen der Zugprobe für eine Rauheitsmessung mittels Tastschnittverfahren und zur Untersuchung der Abmaße genutzt.

### Probekörper

Der in Abb. 32 gezeigte Dichtequader weist eine Grundform von 5 mm × 6 mm × 7 mm auf und ist an zwei der oberen Kanten mit einer Fase versehen. Durch den unsymmetrischen Aufbau des Probekörpers wird eine zweifelsfreie Bestimmung der Ansichten während der metallographischen Untersuchungen ermöglicht.

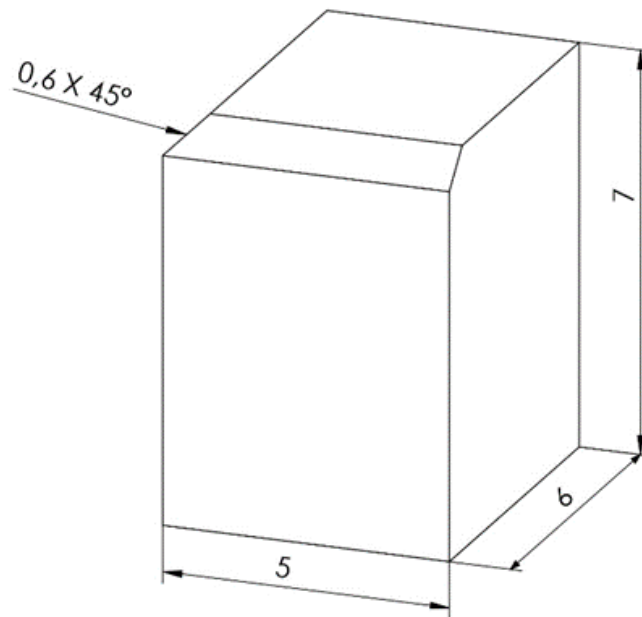


Abb. 32: 3D-Skizze des Dichtequaders

Als Basis der Zugprobe wird eine vorhandene Flachprobe gewählt, welche für den Versuchsaufbau ausgelegt wurde und sich an der DIN EN ISO 6892-1 orientiert (21). Da es bei Vorversuchen zu Prozessstörungen an den Übergangsradien kam, wurden diese entsprechend der Gestaltungsrestriktionen (Kapitel 3.1.1 Gestaltungsrestriktionen) angepasst. Die angepasste Zugprobe ist in Abb. 33 abgebildet.

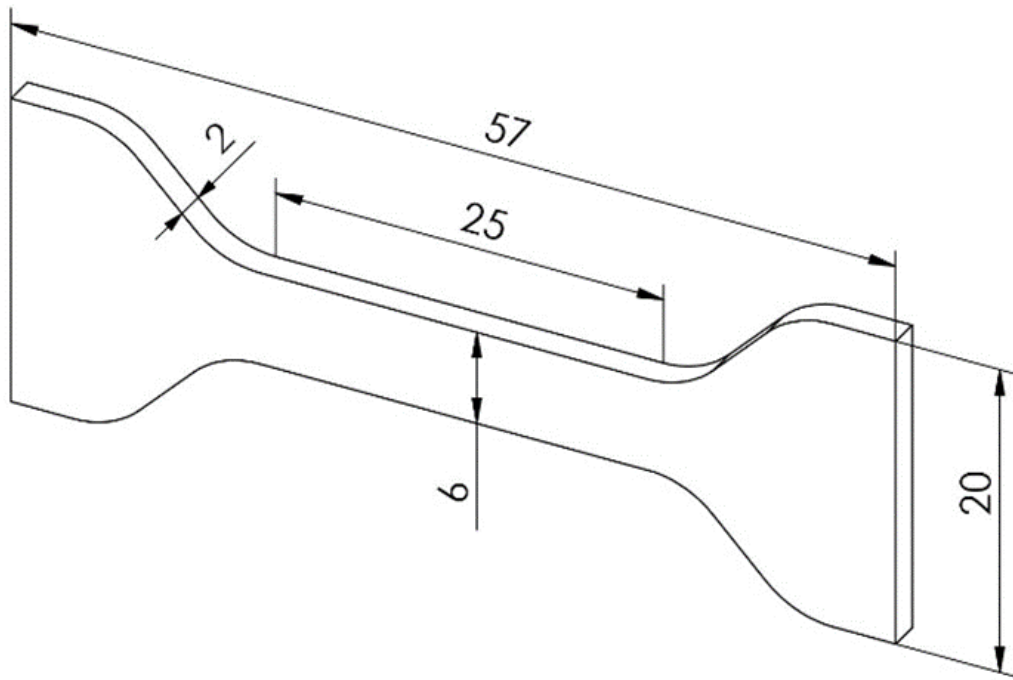


Abb. 33: 3D-Skizze der Zugprobe

Die jeweiligen technischen Zeichnungen sind dem Anhang (A1 und A2) zu entnehmen.

### Probenfertigung

Da die verwendeten Probekörper nur verhältnismäßig kleine zu generierende Schichten aufweisen, empfiehlt sich eine durchgängige Belichtung, da Islands die Länge der einzelnen Belichtungsvektoren auf eine kritische Länge reduzieren würde (siehe Abb. 34). Was einen unnötigen Anstieg der Anfangs- und Endpunkte der Schmelzspur bedeuten würde und damit die Gefahr von Bindefehlern erhöht.

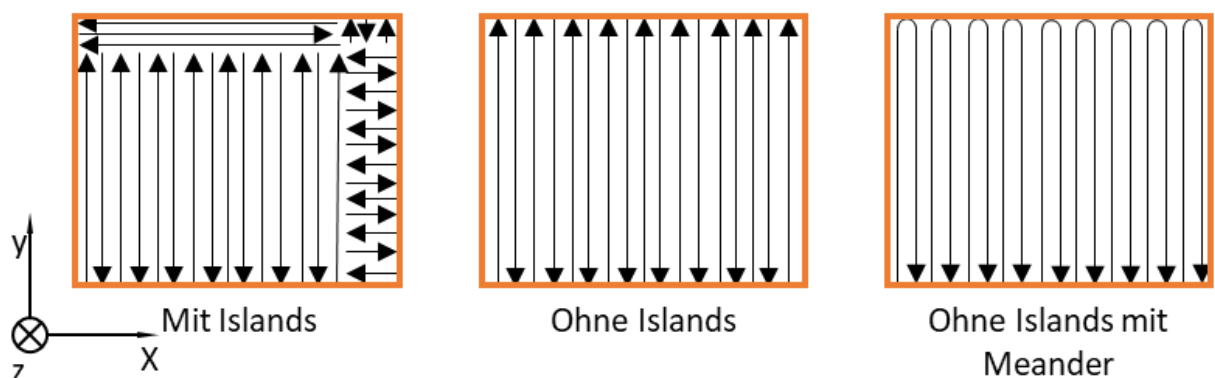


Abb. 34: Auswirkung der Islands-Strategie bei kleinen zu belichtenden Flächen

Daher wird für die Versuche ausschließlich eine durchgängige Belichtung verwendet. Darüber hinaus wird für die Flächenbelichtung die Meanderfunktion eingesetzt um die Schmelzspur Anfangs- und Endpunkten zu reduzieren.



*Abb. 35: Gefertigte Zugproben und Dichtequader*

## 5 Experimentelle Untersuchung

Innerhalb dieses Kapitels werden die im Versuchsplan aufgeführten Versuche umgesetzt. Dazu wird die Versuchsauslegung und Durchführung beschrieben und die Ergebnisse ausgewertet, sowie in einer Schlussfolgerung kurz zusammengefasst.

### 5.1 Untersuchung des Ausgangsmaterials

Für die experimentellen Versuche wird neues und aufbereitetes Pulver, welches schon mehrfach in Baujobs aufgetragen und gesiebt wurde verwendet. Um einen etwaigen prozessbeeinflussenden Unterschied der beiden Pulverarten identifizieren zu können, werden die chemische Zusammensetzung und Kornfraktionen untersucht. Zusätzlich wird das Pulver mit den Lieferantenangaben verglichen.

#### 5.1.1 Versuchsauslegung und Durchführung

Zur Untersuchung des Ausgangsmaterials wird zum einen eine Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels Energiedispersive Röntgenspektroskopie und zum anderen eine Untersuchung der Kornfraktion durch Lichtmikroskopie durchgeführt.

Für die Untersuchungen werden Probekörperhalter (Abb. 36) mit doppelseitiger Klebefolie präpariert und in die entsprechenden Pulverproben gedrückt, wodurch eine auswertbare Pulverschicht entsteht.



Abb. 36: Probekörperhalter mit aufgetragener Pulverschicht

Die Materialanalyse erfolgt mit der EDX-Einheit des Rasterelektronenmikroskops. Dabei werden zehn Standard- und eine Langzeitmessung durchgeführt. Bei der Langzeitmessung lassen sich Röntgenbremsstrahlung und charakteristische Röntgenstrahlung der Elemente im EDX-Spektrum besser unterscheiden, wodurch sich der Aussagewert der anderen Messungen besser einordnen lässt.

Zur Untersuchung der Kornfraktion werden vier zufällig ausgewählte Felder auf der Pulverschicht mit einer Abmessung von  $250\ \mu\text{m} \times 340\ \mu\text{m}$  untersucht. Dazu werden Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop gemacht und die Körner mit einer nahgeschalteten Software vermessen.

### 5.1.2 Versuchsauswertung

Die Ergebnisse der EDX-Analyse sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Analyse konnte eindeutig Sauerstoff festgestellt werden, welcher jedoch für die Auswertung herausgerechnet wurde, um die Zusammensetzung der Legierung zu bestimmen. Darüber hinaus konnte der Sauerstoff im EDX-Spektrum nur unsauber detektiert werden, wodurch keine genaue Aussage zur Konzentration möglich ist. Die unbehandelten Ergebnisse befinden sich im Anhang (A4: Experimentale Untersuchung des Ausgangsmaterials).

Der Chrom-, Nickel- und Mangangehalt des Lieferanten wurde in beiden Pulverproben bestätigt. Es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem neuen und aufbereiteten Pulver nachgewiesen werden, jedoch befinden sich die gemessenen Werte innerhalb der vom Lieferanten angegebenen Konzentration.

Bei der Messung konnte Silicium, Phosphor, Kohlenstoff und Schwefel gemessen werden. Jedoch konnte der jeweilige Anteil der Elemente nicht bestimmt werden, da sich die charakteristischen Röntgenstrahlungen überlagerten und so nicht genau zugeordnet werden konnten. Darüber hinaus besteht der Verdacht, dass der hohe gemessene Molybdängehalt aus einer Überlagerung mit Phosphor und Schwefel resultiert.

Tabelle 2: Übersicht der Versuchsergebnisse der EDX-Analyse

Chemische Zusammensetzung							
Element		Lieferant		Neues Pulver		Aufbereitetes Pulver	
		Min	Max	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
Fe	Eisen	Rest		61,32	1,82	60,95	7,81
Cr	Chrom	16,50	18,50	18,91	0,30	18,38	2,38
Ni	Nickel	10,00	13,00	11,37	0,82	11,03	2,02
Mo	Molybdän	2,00	2,50	1,01	0,40	1,16	0,32
Mn	Mangan	0,00	2,00	0,95	0,24	1,16	0,19
Si	Silicium	0,00	1,00	Messmethode unzureichend		Messmethode unzureichend	
P	Phosphor	0,00	0,05				
C	Kohlenstoff	0,00	0,03				
S	Schwefel	0,00	0,03				

Für eine bessere Überschaubarkeit sind die Ergebnisse für Chrom, Nickel, Molybdän und Mangan in dem Diagramm 3 mit der jeweiligen Standardabweichung und den Lieferantenanangaben aufgetragen. Dabei stehen die orangen Balken für das neue Pulver, während die blauen Balken das aufbereitete Pulver abbilden. Die grauen Felder im Hintergrund geben den vom Lieferanten angegebenen Konzentrationsbereich an.

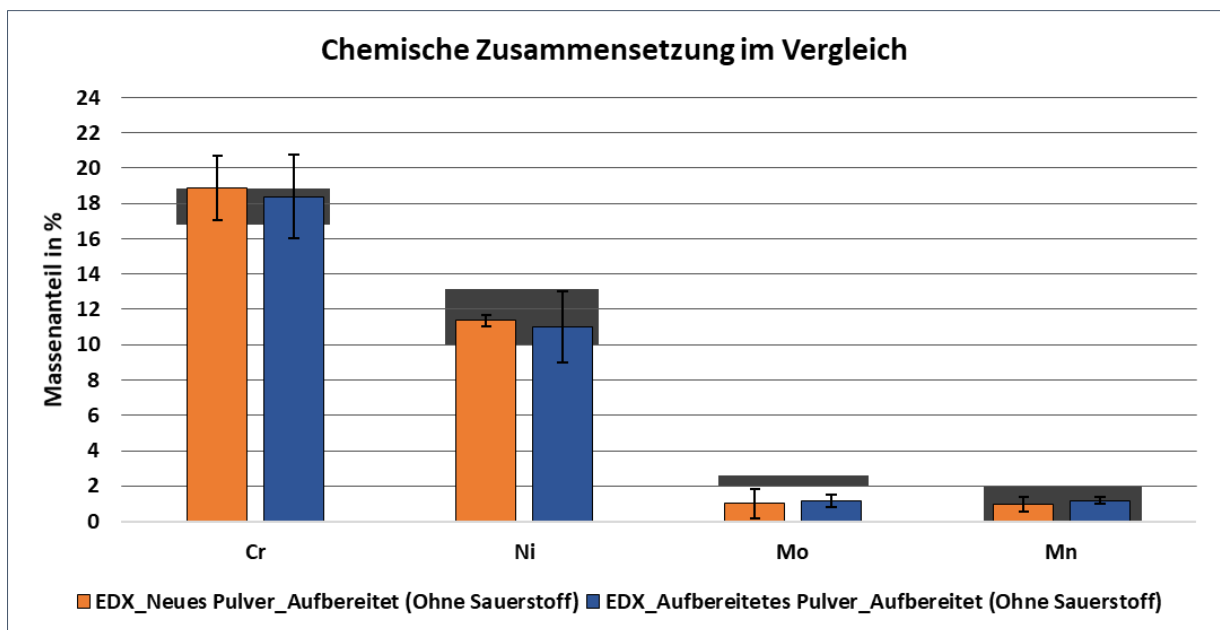


Diagramm 3: Graphische Darstellung der Hauptlegierungselemente

Die Untersuchung der Kornfraktion ergab für beide Proben einen durchschnittlichen Durchmesser von 30  $\mu\text{m}$ , lediglich die Standardabweichung des aufbereiteten Pulvers (11  $\mu\text{m}$ ) liegt geringfügig niedriger, als beim neuen Pulver (13  $\mu\text{m}$ ). Ein durchgeführter T.Test-Hypothesentest ergab keinen signifikanten Unterschied der beiden Proben.

Ein Unterschied wird bei Betrachtung der Histogramme in Diagramm 4 deutlich. Das neue Pulver weist im unteren und im oberen Klassenbereich jeweils ein lokales Maximum auf, während sich bei dem aufbereiteten Pulver eine Glockenkurve abzeichnet.

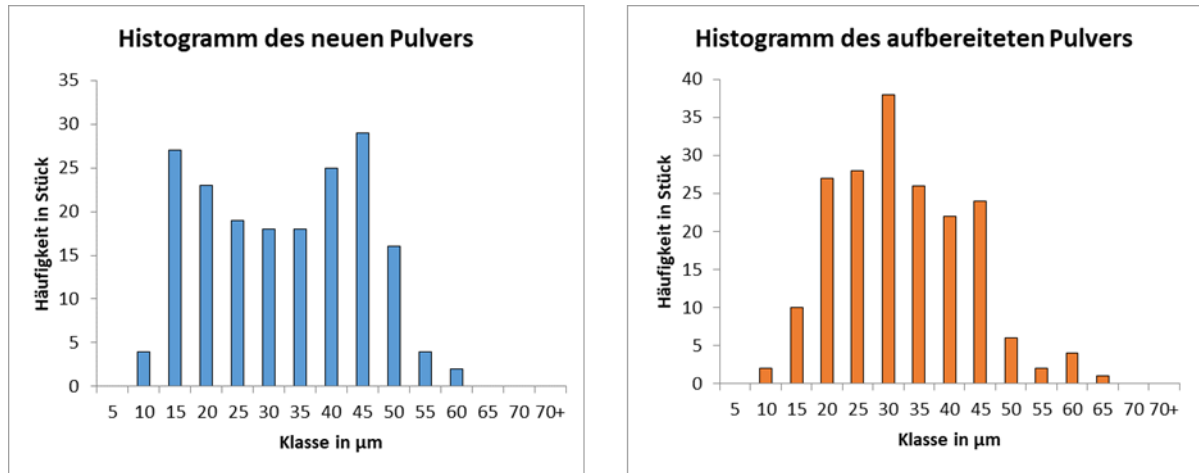


Diagramm 4: Histogramme zur Größenverteilung der beiden Pulverarten

Zum besseren Vergleich der beiden Proben, werden die Histogramme in Verteilungskurven umgewandelt und übereinandergelegt. Dazu werden die Häufigkeiten als Punkte aufgetragen und mit interpolierten Linien verbunden.

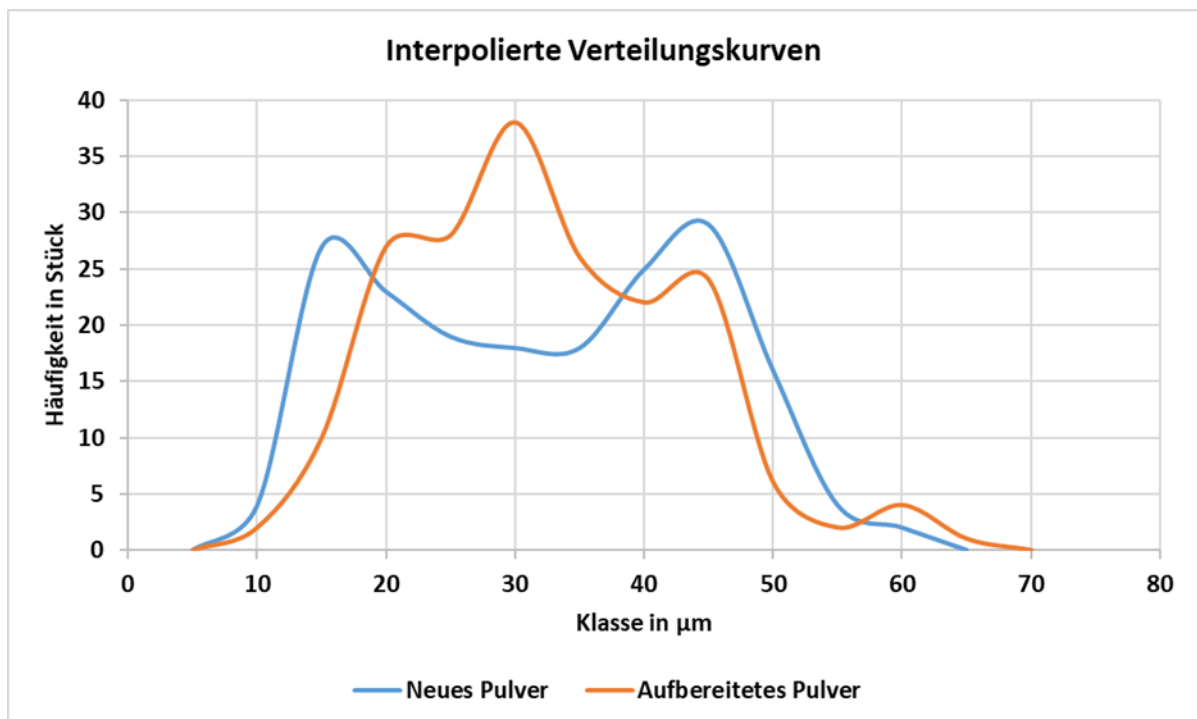


Diagramm 5: Verteilungskurven der Kornfraktionsklassen

Zur weiteren Untersuchung wurden die Häufigkeitsverteilung der beiden Stichproben untersucht. Dabei konnte durch einen Kolmogorow-Smirnow-Lilliefors-Test die



Normalverteilung beider Proben bestätigt werden. Womit die Kornfraktion der beiden Pulverzustände als vergleichbar angesehen werden kann.

Die Abb. 37 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der untersuchten Pulverschichten. Auf der linken Seite ist das neue und auf der rechten Seite das aufbereitete Pulver abgebildet. Zu einem weist das aufbereitete Pulver eine durchgehend geringere Flächenbelegungsichte auf und zum anderen sind angelaufene Körner (orange Markiert) zu erkennen.

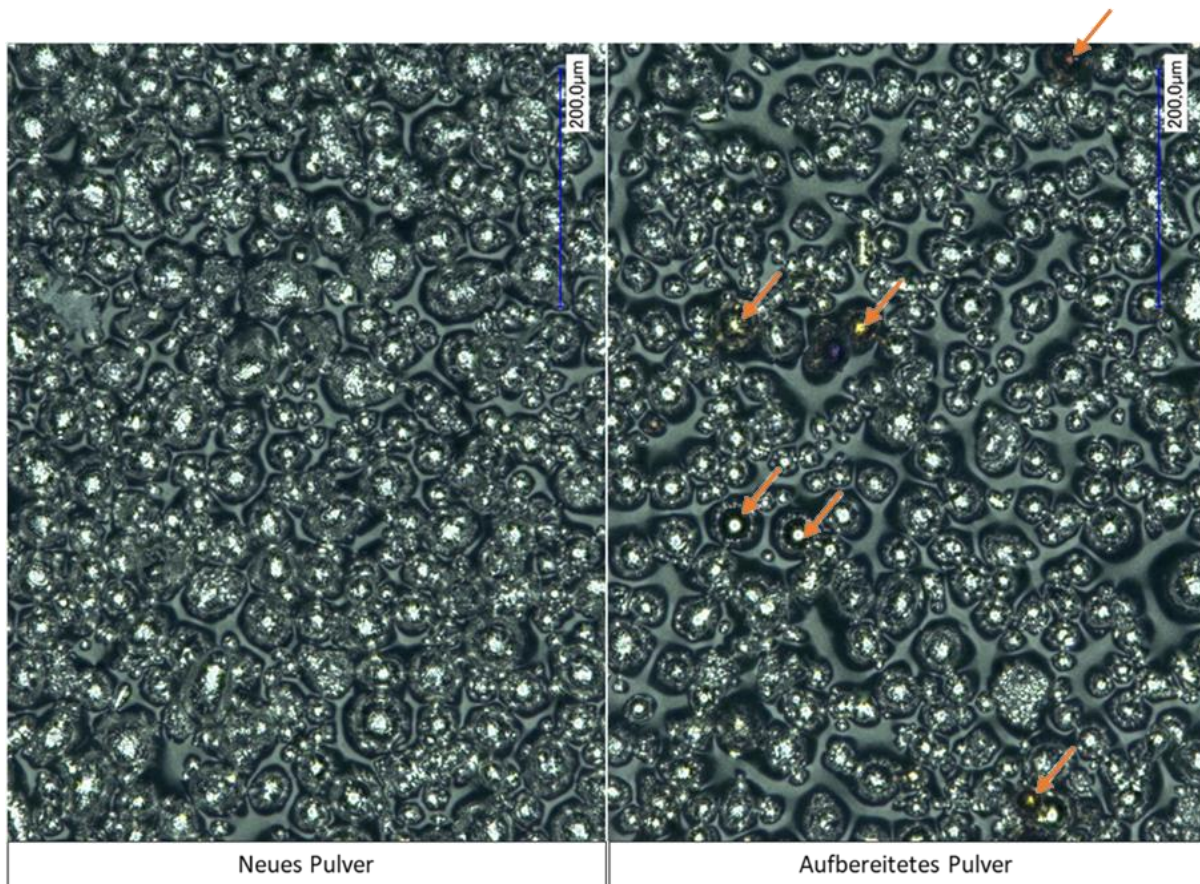


Abb. 37: Gegenüberstellung des neuen und aufbereiteten Pulvers

Das Anlaufen der Körner deutet auf im SLM-Prozess oxidativ umgesetzten Sauerstoff hin, welcher durch dünne wässrige Anhaftungen an den Pulverkörnern in den Prozess eingebracht wird. Bedingt durch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Ausgangsmaterial, könnte so trotz inertisierter Atmosphäre, Sauerstoff in signifikanter Menge zugeführt worden sein.

### 5.1.3 Zusammenfassung

Die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials konnte, für beide Pulverzustände, nur teilweise bestätigt werden, da sich die Messmethode (EDX) für die Elemente Silicium, Phosphor, Kohlenstoff und Schwefel als unzureichend erwies. Der Molybdängehalt konnte nur ungenau ermittelt werden. Darüber hinaus weist die Kornfraktion der beiden Pulverzustände keine signifikanten Unterschiede auf. Lediglich die optische Betrachtung der beiden Proben zeigt eine Unterscheidung. Das aufbereitete Pulver weist oxidativ umgesetzten Sauerstoff auf, der bei weiterer Verwendung zu Unregelmäßigkeiten führen könnte.

## 5.2 Spanend gefertigte Vergleichsproben

Für eine bessere Bewertung und Einordnung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der additiv gefertigten Proben, werden spanend hergestellte Zugproben untersucht. Dazu werden zwei Sätze mit jeweils 10 Zugproben aus einer gewalzten 1.4404 Blechtafel mit unterschiedlicher Walzrichtung gefertigt.

Für die Zugprobengeometrie wird die bereits vorgestellte Form verwendet. Lediglich die Übergänge wurden aus fertigungstechnischen Gründen angepasst. Die verwendete Form ist in Abb. 38 veranschaulicht.

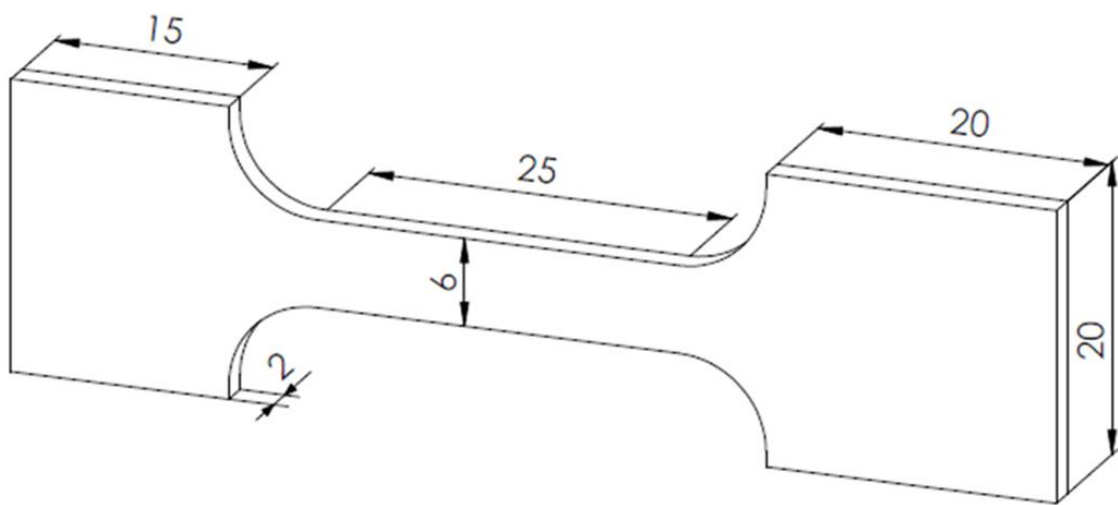


Abb. 38: Geometrie für die spanend zu fertigen Referenzproben

Die durch den Zugversuch ermittelten Kennwerte sind in der Tabelle 3 aufgeführt und in dem Diagramm 6 graphisch dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich der Einfluss der Walzrichtung.

Für den ersten, mit der Walzrichtung gefertigten, Zugprobensatz ergibt sich eine gemittelte Dehngrenze ( $R_{p0,2\%}$ ) von 312 MPa mit einer Standardabweichung von 10 MPa und für die mittlere Zugfestigkeit 618 MPa mit einer Standardabweichung von 6 MPa. Die Untersuchung des zweiten, orthogonal zur Walzrichtung gefertigten, Probensatzes ergab eine gemittelte Dehngrenze ( $R_{p0,2\%}$ ) von 298 MPa mit einer Standardabweichung von 6 MPa und für die mittlere Zugfestigkeit 627 MPa mit einer Standardabweichung von 5 MPa.

Tabelle 3: Übersicht der im Zugversuch ermittelten Kennwerte

Probe	Einheit	1_01	1_02	1_03	1_04	1_05	1_06	1_07	1_08	1_09	1_10	Mittel	Stabw
Dehngrenze	MPa	297	311	327	299	313	307	312	324	309	316	312	10
Zugfestigkeit	MPa	611	617	626	613	620	614	616	628	613	624	618	6
Bruchdehnung	%	57	56	56	57	56	57	57	56	57	57	57	1

Probe	Einheit	2_01	2_02	2_03	2_04	2_05	2_06	2_07	2_08	2_09	2_10	Mittel	Stabw
Dehngrenze	MPa	292	294	302	309	294	295	298	305	294	297	298	6
Zugfestigkeit	MPa	634	623	620	631	624	627	630	631	617	628	627	5
Bruchdehnung	%	52	51	52	50	51	52	51	51	50	51	51	1

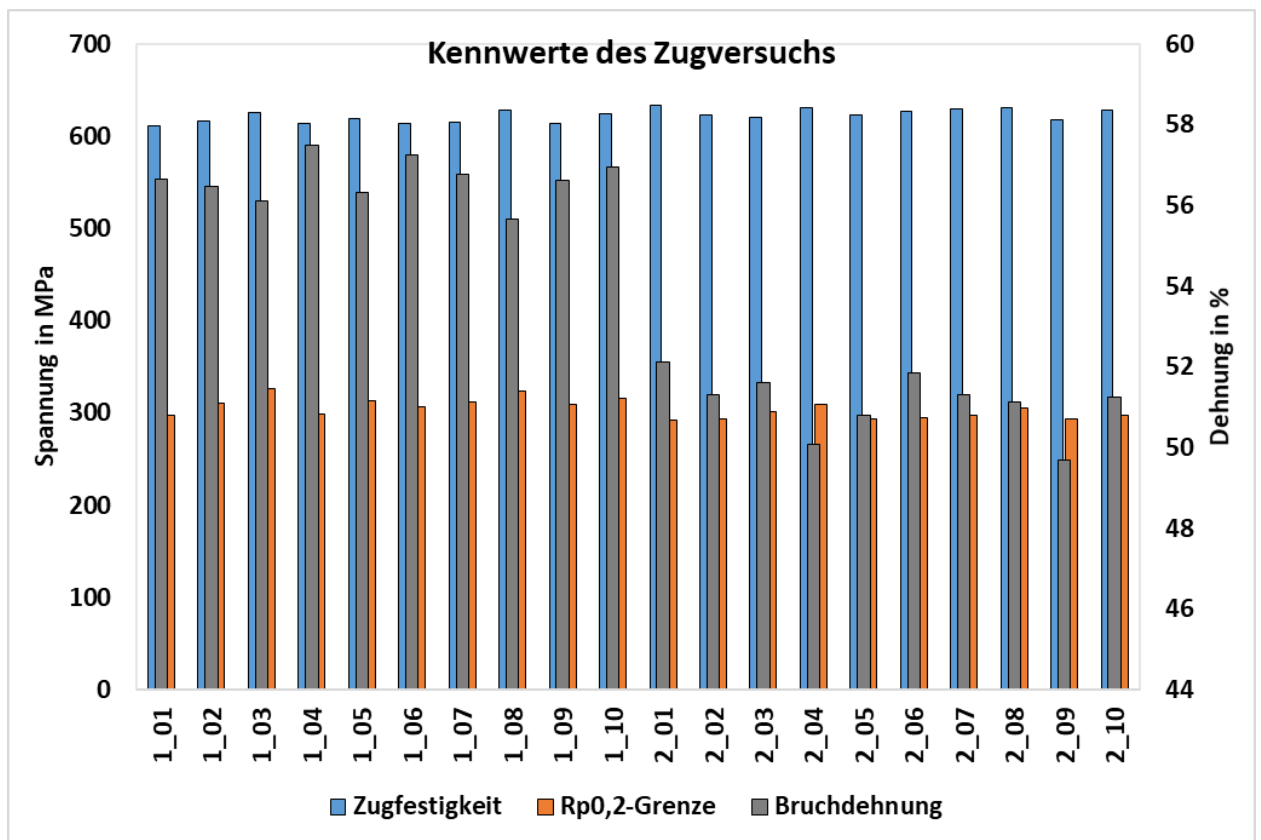


Diagramm 6: Optische Darstellung der im Zugversuch ermittelten Kennwerte

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der einzelnen Zugversuche sind in Diagramm 7 übereinandergelegt. Dort sind Unregelmäßigkeiten an den Ausgangspunkten einiger Kurven zu erkennen, wodurch es bei den betroffenen Spannungs-Dehnungs-Kurven zu einem Versatz in X-Richtung kommt. Die Ursache der Unregelmäßigkeit liegt in der Bauart der Probenaufnahme der Zugmaschine. Diese verwendet eine Keilspannung mit bezahnter Spannfläche, bei der die Hauptspannkraft erst durch einsetzen der Prüfkraft aufgebaut wird. Erst beim Aufbau der Prüfkraft dringen die Zähne der Spannfläche in die Oberfläche der Proben ein. Dabei kann es zu einem nachrutschen der Keilspannung kommen, was sich in einem Abfall

der Prüfkraft äußert und die Spannungs-Dehnungs-Kurve entlang der X-Achse nach rechts verschiebt. (21 S. 50-52)

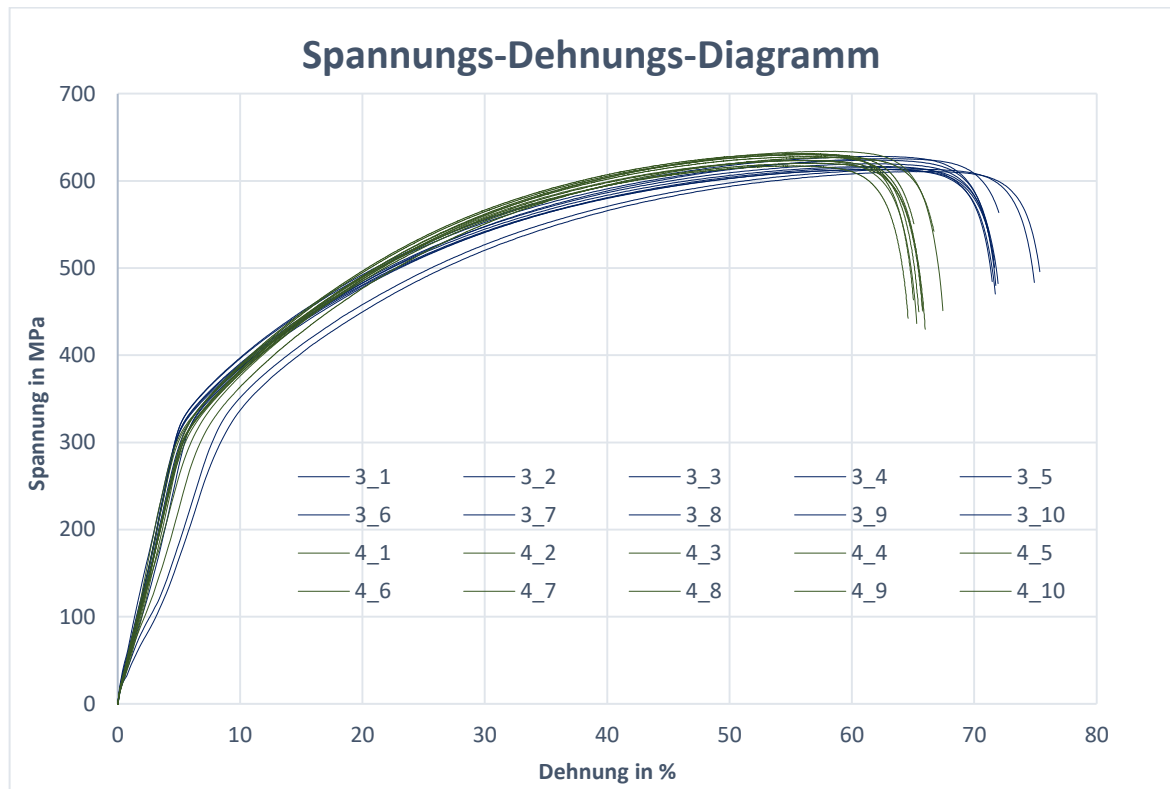


Diagramm 7: Gemeinsames Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die abweichenden Kennwerte der beiden Probenansätze voneinander lassen sich auf die unterschiedliche Walzrichtung zurückführen.

## 5.3 Untersuchung der vorhandenen Parameter

Im Folgenden werden die einzelnen Parametersätze nach dem festgelegten Verfahren untersucht, um Rückschlüsse auf die Auswirkungen einzelnen Parameter ziehen zu können.

### 5.3.1 CL20\_performance

Der vom Maschinenhersteller mitgelieferte Parametersatz CL20\_performance soll besonders für mechanisch stark beanspruchte Bauteile geeignet sein (17), was einen erhöhten Energieeintrag, mit entsprechend hoher Dichte, vermuten lässt. Der Parametersatz ist versiegelt und kann nicht ausgelesen werden.

Die Dichtequader konnten ohne sichtbare Störungen aufgebaut werden, während es bei den Zugproben zu Verbrennungen am oberen Radius, wie in Abb. 39 zu erkennen, kam. Eine mögliche Ursache für das unsymmetrische Auftreten des Aufbaufehlers, ist der Einfluss des Beschichters. Durch einen zu hohen Energieeintrag kommt es bedingt durch thermisch induzierte Eigenspannungen zu einem sogenannten Aufstellen der Außenkante, welche aus dem Pulverbett herausragt und mit dem Beschichter kollidiert.

Während des Belichtungsprozess kam es zu verstärkten Rauch- und Spritzerbildung, was ebenfalls auf einen hohen Energieeintrag hindeutet.

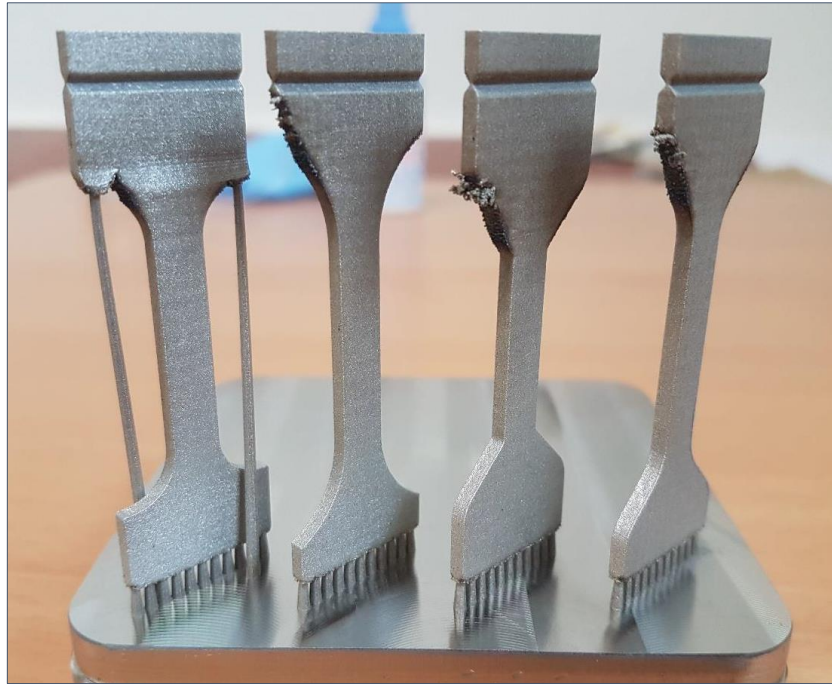


Abb. 39: In einem Vorversuch gefertigte Probekörper mit dem Parametersatz CL20\_performance

### Gefügebau

Die Abb. 40 zeigt die eingebettete, geschliffene und polierte Oberseite eines Dichtequaders. Dieser weist, bis auf einige Randstellen, ein dichtes Gefüge auf. Die Auffälligkeit kann aus einer fehlerhaften Abstimmung des Scanprozesses resultieren, bei der die Außenkontur nicht durchgängig mit der Flächenbelichtung verbunden wurde. Eine mögliche Ursache könnte eine falsch angenommene Schmelzspurbreite sein.

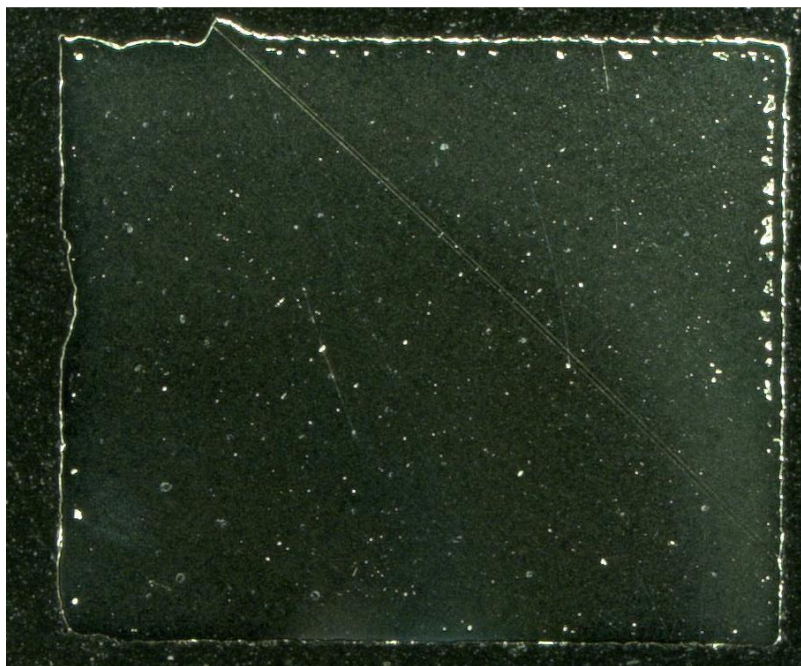


Abb. 40: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20\_performance (30fache Vergrößerung)

Die Ermittlung der theoretischen Dichte ergab einen Kennwert von 1,0019. Die Überschreitung der 1 des Kennwertes, kann auf Pulveranhaftungen und positive Abmaße zurückgeführt werden. Bei der optischen Dichteuntersuchung konnte ein Wert von 99,84 % bei einer Standardabweichung von 0,16 % ermittelt werden. Dabei wurden die Fehlstellen am Rand nicht mit einbezogen.

Um weitere Aussagen über das Gefüge machen zu können sind in Abb. 41 die Schliffbilder der Drauf- und Seitenansicht bei 300facher Vergrößerung abgebildet. Die roten Markierungen zeigen die Eingriffrichtung des Laserstrahls an. Durch den Ätzzvorgang sind die für das SLM-Verfahren typischen feinen Linien sichtbar. Dabei handelt es sich um die Begrenzungsflächen der einzelnen „Schweißraupen“, wodurch sich einzelne Schmelzspuren voneinander unterscheiden lassen.

Auch bei Betrachtung der Schliffe sind keine Fehlstellen erkennbar. In der Ansicht von oben ist der Einfluss der Wechselbelichtung, anhand der sich kreuzenden Schmelzspuren sichtbar. Aufgrund von unvermeidlichen Ungenauigkeiten beim Präparieren der Proben, sind die Schliffoberfläche und die einzelnen Bauteilschichten stets um einen Winkel versetzt, weshalb immer mehrere Schichten zu sehen sind. In der Seitensicht sind die einzelnen ineinander ragenden Schmelzspuren zu erkennen.

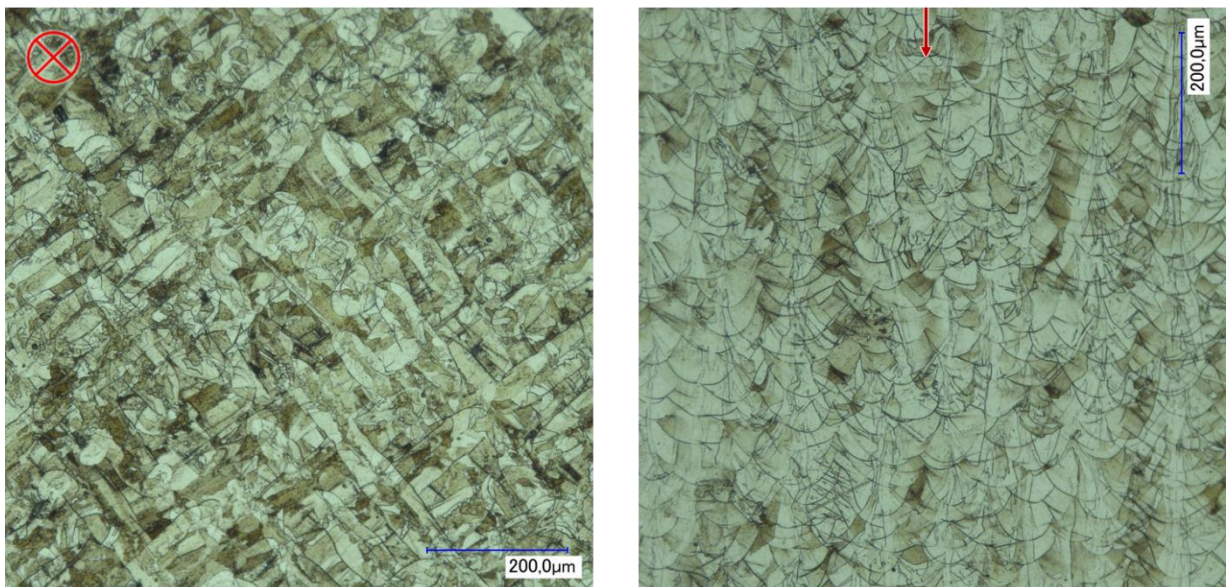


Abb. 41: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet.



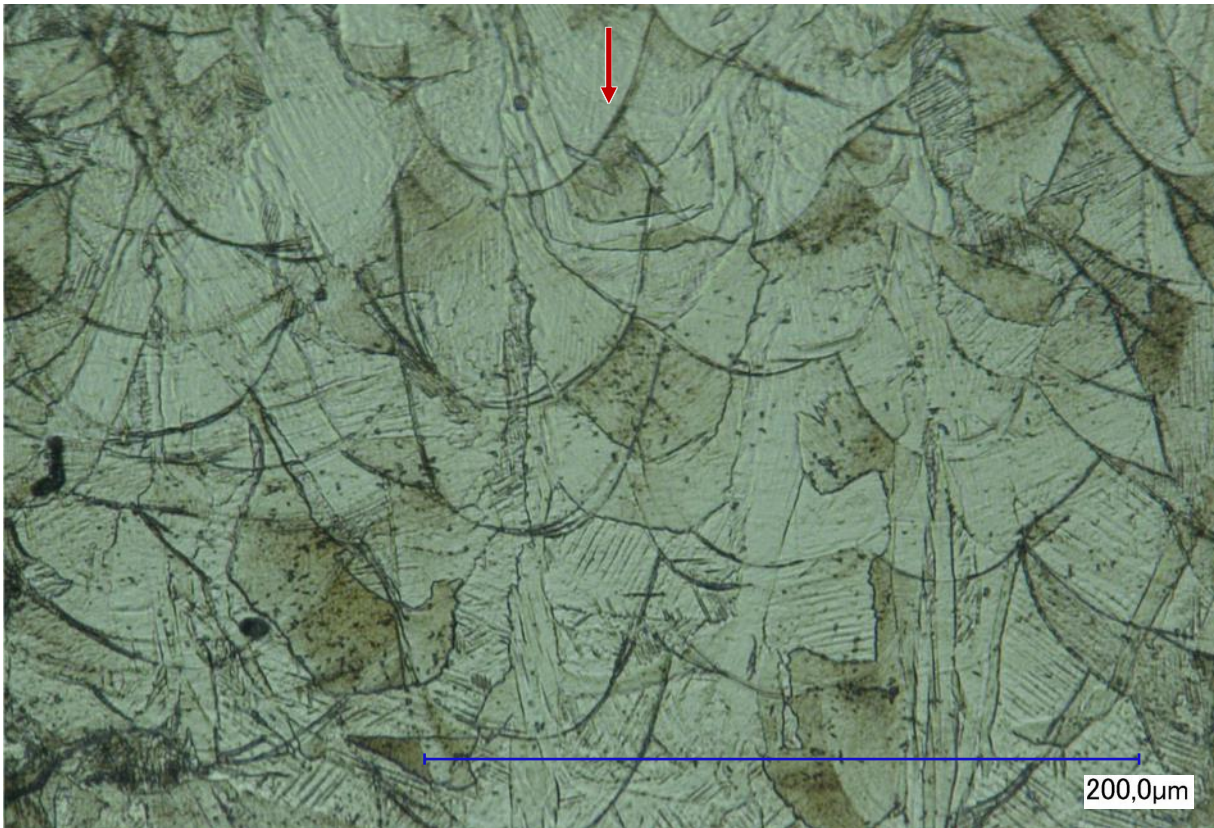


Abb. 42: Schliffbild der Setenansicht eines Dichtequaders (1000fache Vergrößerung)

### Mechanisch-Technologische-Eigenschaften

Insgesamt wurden sieben Zugproben in zwei Sätzen untersucht. Der erste Satz (Probe 1\_1 bis 1\_3) wurde zu Beginn der wissenschaftlichen Arbeit gefertigt und konnte ohne Störungen untersucht werden. Der zweite Satz (Proben 2\_1 bis 2\_4) wurde zu Ende gefertigt, mit mehrfach aufbereitetem Pulver. Bei zwei von vier Zugproben kam es zu einem vorzeitigen Sprödbbruch der Probe, wodurch nicht alle Kennwerte erhoben werden konnten. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse des zweiten Satzes geringere Kennwerte auf und zeigten sprödere Bruchkanten. Die ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „performance“-Proben

Probe	1_1	1_2	1_3	2_1	2_2	2_3	2_4	Mittelwert	Stabw
0,2%-Dehngrenze in Mpa	555	568	546	520	-	-	514	541	23
Zugfestigkeit in Mpa	621	627	627	622	-	587	625	618	15
Bruchdehnung in %	28	22	28	23	-	-	26	25	3
Bemerkung	-	-	-	-	Materialfehler	Verutscht	-		

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „performance“-Proben sind in Diagramm 8 übereinanderliegend abgebildet. Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die Kurven des ersten Satzes gestrichelt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Kurven des zweiten Satzes abrupter abreißen, was auf eine Versprödung hindeutet.

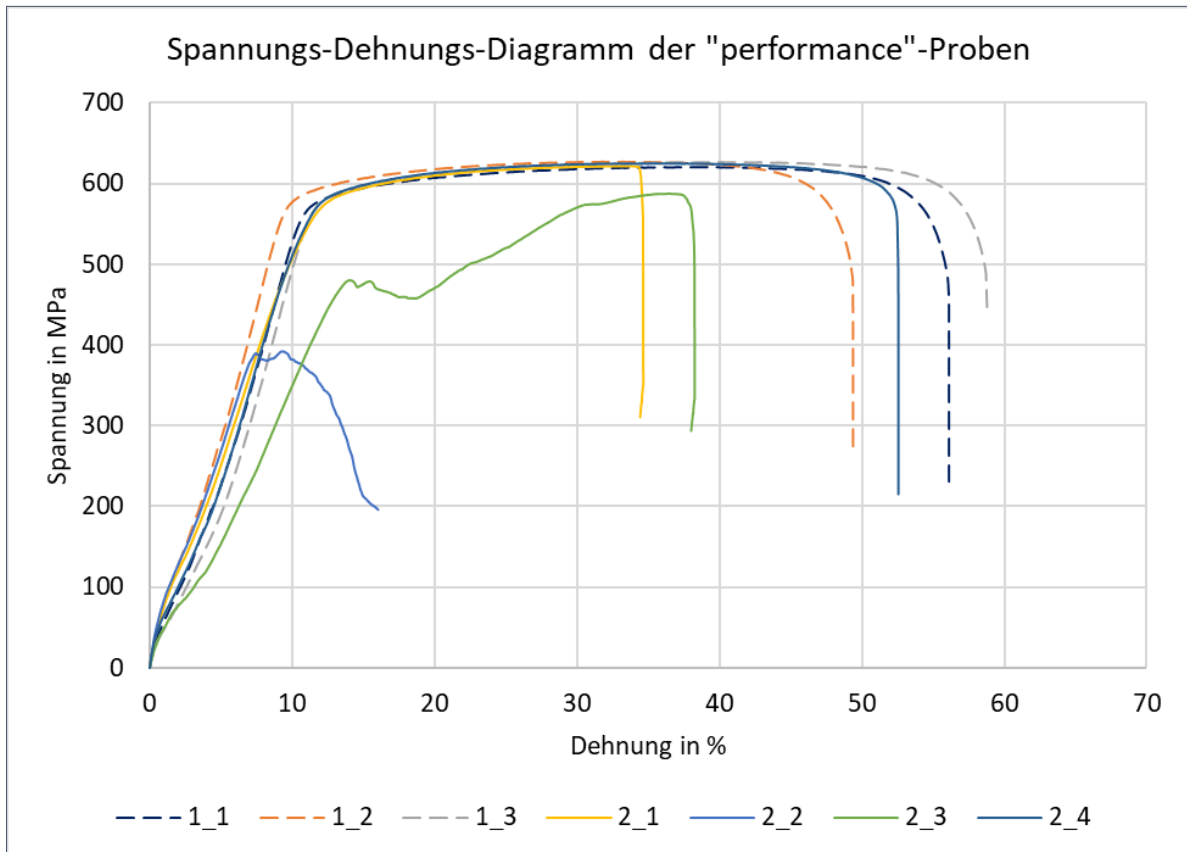


Diagramm 8: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „performance“-Proben

Der deutliche Unterschied der beiden Probensätze im Zugversuch, könnte auf eine Alterung des Pulvers zurückgeführt werden und muss weiter untersucht werden.

Die Härtemessung nach Vickers (HV 30) ergab einen Wert von 216 mit einer Standardabweichung von 10. Die aus der Härte umgewandelte Zugfestigkeit liegt bei 751,4 MPa, was einer Abweichung von 22 % vom Ergebnis des Zugversuchs entspricht.

#### Oberflächenbeschaffenheit und Maßabweichungen

Die Ergebnisse der Abmaßuntersuchung sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Es wurde für die Dicke eine relatives Abmaß von 10,53 % bei einer Standardabweichung von 1,19 % gemessen. Die Abmaße für die Kopf- und Stegbreite liegen deutlich niedriger bei 0,16 % für die Kopfbreite und 0,10 % für die Stegbreite, bei einer Standardabweichung von ungefähr 0,1 %.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20\_performance

Zusammengefasste Abmaße der Zugversuchsprobe CL20_performance					
Messstelle	Messlänge (Soll) in mm	Abmaß			
		Absolut im mm		Relativ in %	
		Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
Dicke	2,00	0,21	0,01	10,53	1,19
Kopfbreite	20,00	0,02	0,03	0,16	0,11
Stegbreite	6,00	0,13	0,01	2,08	0,10

Da es sich ausschließlich um positive Abmaße handelt und die Standardabweichung vergleichsweise niedrig liegt, wird von Pulveranhaftungen ausgegangen.

Die Ergebnisse des Tastschnittsverfahrens können der Tabelle 6 entnommen werden. Die ermittelten Rauheitswerte weisen in Z- und X/Y-Richtung einen signifikanten Unterschied auf.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20\_performance

CL20_performance							
Rauheiten in Z-Richtung				Rauheiten in X/Y-Richtung			
Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$		Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$	
Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
6,69	0,37	36,70	2,18	9,04	0,83	51,91	6,47

### Zusammenfassung

Die Proben des CL20\_performance zeigten eine hohe Gefügedichte und gute mechanisch-technologischen Eigenschaften. Bei der Fertigung der Zugproben kam es zu thermisch bedingten Aufbaufehlern. Alle untersuchten Proben zeigten ein konstantes Übermaß, was auf Pulveranhaftungen zurückgeführt werden kann.

### 5.3.2 CL20\_cusing\_V1

Die mit dem Titel „cusing“ bezeichneten Parametersätze des Maschinenherstellers sollen, besonders für filigrane Bauteile geeignet sein (17). Der Parametersatz war bei der Übergabe nicht auslesbar, was jedoch nach dem Auftreten einiger Probleme und dem Nachreichen des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2 vom Maschinenhersteller geändert wurde.

Der ausgelesene vereinfachte Parametersatz ist in Tabelle 7 abgebildet. Es zeigt sich, dass der Abstandsfaktor  $A1 = 1,31$  beträgt, wodurch der Spurabstand größer, als die eigentliche

Spurbreite ist. Folglich findet keine Überlappung der einzelnen Schmelzspuren statt, was sich gravierend negativ auf die Werkstoffeigenschaften auswirkt. Da der Abstandsfaktor ausschließlich die Flächenbelichtung beeinflusst, sollten die Oberflächenrauigkeit keiner signifikanten Auswirkung unterliegen.

Tabelle 7: Parametersatz CL20\_cusing\_V1 (vereinfacht)

Parametersatz	Belichtungselement	Streckenenergie		Spurversatz	
		$P_L [W]$	$v_S [\frac{mm}{s}]$	$S_B [mm]$	A1
CL20_CUSING_V1	Flächenbelichtung	90	1500	0,08	1,31
	Innenkontur	60	600		
	Außenkontur	60	600		
	Support	60	600		

Eine Rücksprache mit dem Maschinenhersteller ergab, dass der zu hohe Abstandsfaktor einem Softwarefehler verschuldet ist.

Die Probekörper konnten ohne sichtbare Störung gefertigt werden.

#### Gefügeaufbau

Der Dichtequader in Abb. 43 weist viele Fehlstellen und damit eine geringe Gefügedichte auf, was ebenfalls durch den Kennwert der theoretische Dichte von 0,8166 bestätigt wird. Für die optisch ermittelte Dichte konnte ein Wert von 82,89 % bei einer Standardabweichung von 8,22 % gemessen werden.

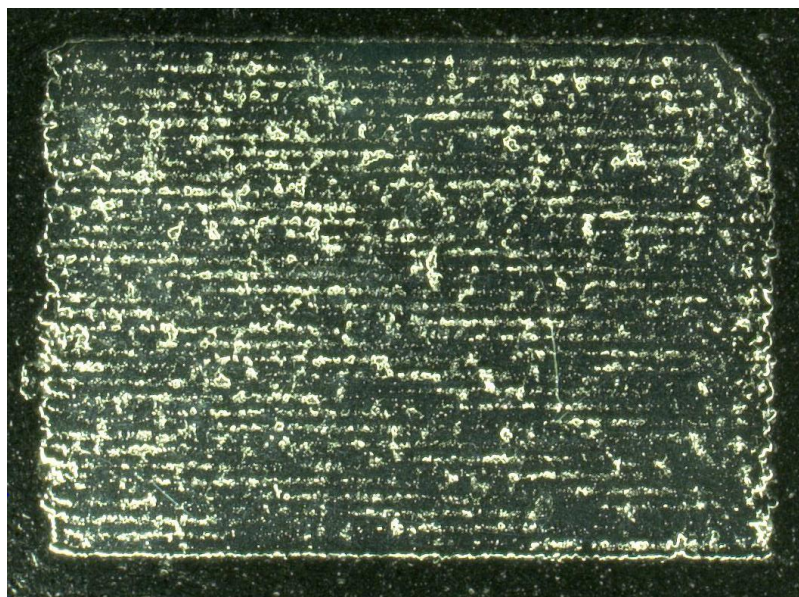


Abb. 43: Eingebettet, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20\_cusing\_V1 (30fache Vergrößerung)

Die Fehlerauswirkung des Abstandsfaktors wird in Abb. 44 besonders deutlich. Die linke Abbildung zeigt die Ansicht von oben, während die rechte Abbildung die Seitenansicht wiedergibt. Die Eingriffsrichtung des Laserstrahls wird durch die roten Pfeile angegeben. Es zeigt sich, dass die einzelnen, durch einen orangenen Pfeil markierten, Schmelzspuren durch einen Bereich mit lediglich angeschmolzenen Pulver (blauer Pfeil) voneinander getrennt sind. Nur die sich bedingt durch die Wechselbelichtung, überkreuzenden Schmelzspuren sind miteinander verschmolzen.

Durch das eingeschlossene Pulver, welches sich auf die Bauteilmasse auswirkt, aber nicht Teil des eigentlichen Bauteils ist, wird der Kennwert der theoretischen Dichte verfälscht und ist nicht aussagekräftig.

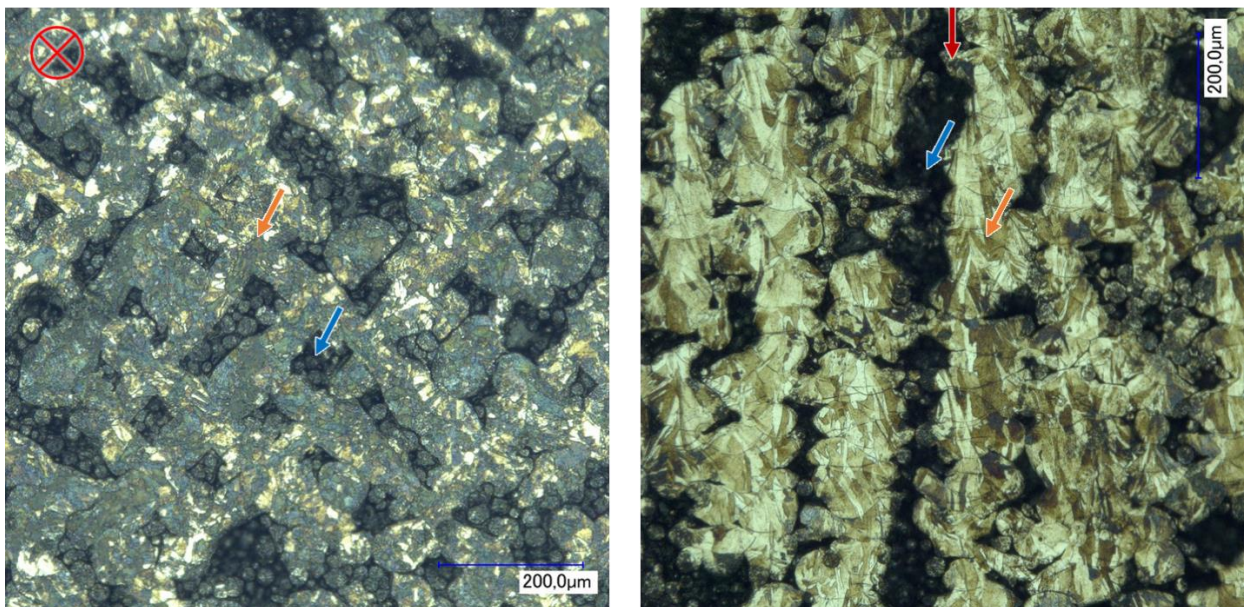


Abb. 44: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet.

In Abb. 45 ist ein Schliff der Seitenansicht bei 1000facher Vergrößerung dargestellt. Die orangenen Pfeile markieren beispielhaft die nicht vollständig aufgeschmolzenen Pulverkörner. Die für den SLM-Prozess typischen Schmelzspurlinien sind nur bedingt zu erkennen, da es nur wenige sich überlappende Schmelzspuren gibt.

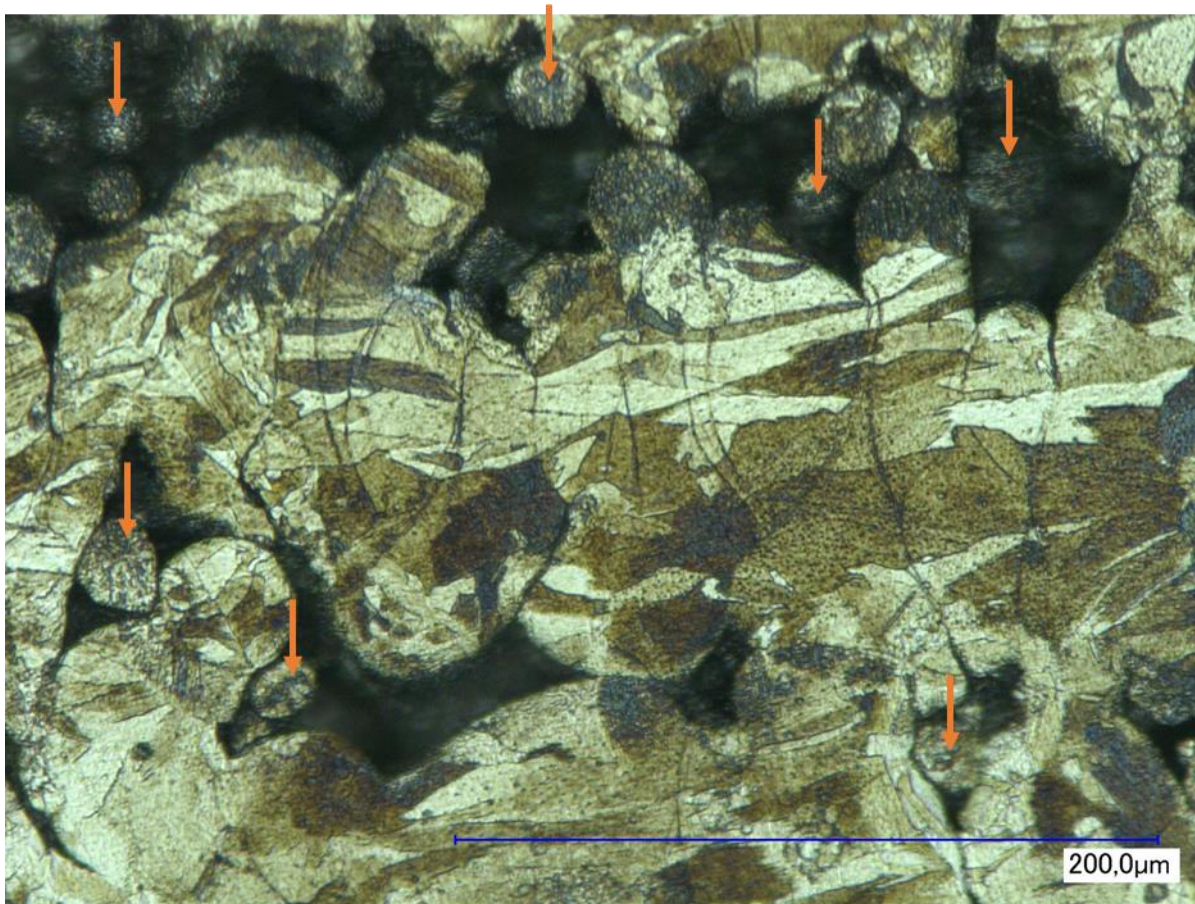


Abb. 45: Schliffbild der Seitenansicht eines Dichtequaders (1000fache Vergrößerung)

Bedingt durch die geringe Dichte und die mangelhaften Bindestellen zwischen den einzelnen Schmelzspuren, sind nur niedrige Kennwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften zu erwarten.

#### Mechanisch-Technologische-Eigenschaften

Für den Parametersatz wurden acht Zugproben gefertigt. Auch hier erfolgte die Fertigung, wie bei dem „performance“-Parametersatz, in zwei Sätzen. Die Ergebnisse sind der Tabelle 8 zu entnehmen. Die erreichten Kennwerte sind deutlich reduziert, was auf eine mangelnde Pulveraufschmelzung und -bindung zurückgeführt werden kann. Auch hier zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Probensätzen. Der später, mit aufbereitetem Pulver, gefertigte Zugprobensatz weist niedrigere Kennwerte auf, weshalb die Ergebnisse in der Tabelle nach den Probensätzen aufgeteilt sind.

Tabelle 8: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusing\_V1“-Proben

Probe	1_1	1_2	1_3	Mittelwert	Stabw
0,2%-Dehngrenze in MPa	200	182	190	191	9
Zugfestigkeit in MPa	212	221	225	219	7
Bruchdehnung in %	1	3	5	3	2
Bemerkung	-	-	-		

Probe	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5	Mittelwert	Stabw
0,2%-Dehngrenze in MPa	156	156	163	157	160	158	3
Zugfestigkeit in MPa	165	170	172	165	170	168	3
Bruchdehnung in %	1	1	1	1	1	1	0
Bemerkung	-	-	-	-	-		

Durchgeführte T-Tests ergaben für die Bruchdehnung einen signifikanten Unterschied der Kennwerte.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing\_V1“-Proben sind in Diagramm 9 übereinanderliegend abgebildet. Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die Kurven des ersten Satzes gestrichelt dargestellt. Auch hier wird der Unterschied zwischen den beiden Sätzen deutlich.

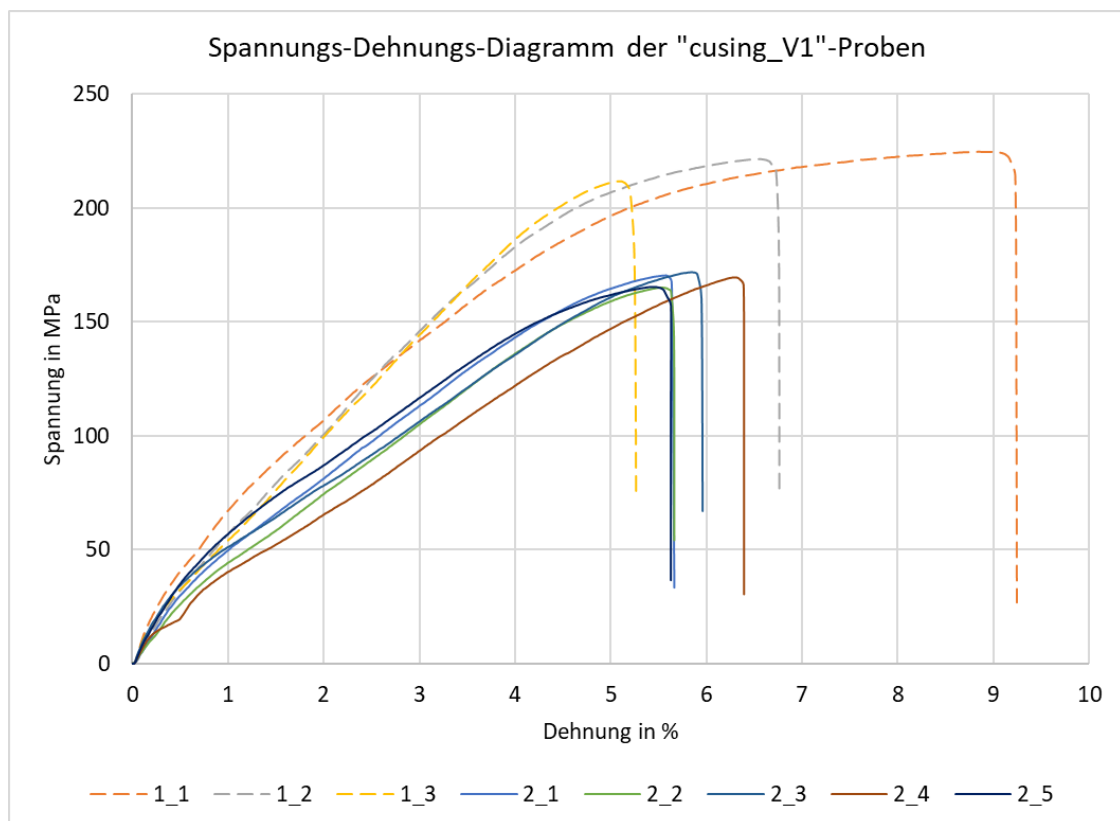


Diagramm 9: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing\_V1“-Proben

Eine Härtemessung nach Vickers (HV 30) ergab einen Wert von 69 mit einer Standardabweichung von 5. Die Umwertung des Härtevalues ist hier nicht zulässig, da für den Härtebereich keine Angaben in der Norm hinterlegt sind.

### Oberflächenbeschaffenheit und Maßabweichungen

Die Ergebnisse der Abmaßuntersuchung sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Es wurde für die Dicke eine relatives Abmaß von 10,26 % bei einer Standardabweichung von 0,53 % gemessen. Die Abmaße für die Kopf- und Stegbreite liegen deutlich niedriger bei 0,46 % mit einer Standardabweichung von 0,17 % für die Kopfbreite und 3,03 % mit einer Standardabweichung von 0,30 % für die Stegbreite.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20\_cusing\_V1

Zusammengefasste Abmaße der Zugversuchsprobe CL20_cusing_V1					
Messstelle	Messlänge (Soll) in mm	Abmaß			
		Absolut in mm		Relativ in %	
		Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
Dicke	2,00	0,21	0,01	10,26	0,53
Kopfbreite	20,00	0,09	0,03	0,46	0,17
Stegbreite	6,00	0,18	0,02	3,03	0,30

Da es sich ausschließlich um positive Abmessungen und geringen Standardabweichungen handelt, kann von Pulveranhaftungen ausgegangen werden.

Die ermittelten Rauheitswerte können der Tabelle 10 entnommen werden. Die Rauheitswerte in Z- und X/Y-Richtung weisen keinen signifikanten Unterschied auf.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchungen des Parametersatzes CL20\_cusing\_V1

CL20_cusing_V1							
Rauheiten in Z-Richtung				Rauheiten in X/Y-Richtung			
Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$		Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$	
Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
8,92	0,93	48,25	6,80	8,92	0,50	49,58	2,04

### Zusammenfassung

Bedingt durch einen Softwarefehler ist der Abstandfaktor A1 um den Faktor zwei zu groß. Dadurch überlappen sich die einzelnen Schmelzspuren nicht, was sich gravierend auf die Dichte auswirkt, woraus niedrige mechanisch-technologischen Kennwerte resultieren. Aufgrund des Fehlers ist der Parametersatz nicht nutzbringend einsetzbar.



### 5.3.3 CL20\_cusing\_V2

In dem Parametersatz CL20\_cusing\_V2 (Tabelle 11) wurde der fehlerhafte Wert für den Abstandfaktor korrigiert und beträgt nun 0,7. Dadurch sollten das Gefüge signifikant dichter werden und die Probekörper höhere mechanisch-technologische Kennwerte aufweisen.

Tabelle 11: Parametersatz CL20\_cusing\_V2 (vereinfacht)

Parametersatz	Belichtungselement	Streckenenergie		Spurversatz	
		$P_L [W]$	$v_S [\frac{mm}{s}]$	$S_B [mm]$	A1
CL20_CUSING_V2	Flächenbelichtung	90	1500	0,08	0,7
	Innenkontur	60	600		
	Außenkontur	60	600		
	Support	60	600		

Bei den Versuchen konnten alle Probekörper ohne sichtbare Störung aufgebaut werden.

#### Gefügebau

Bei Betrachtung des Dichtequaders in Abb. 46 sind deutliche Einschlüsse zu erkennen. Der Kennwert der idealen Dichte beträgt 0,9608 während die optisch ermittelte Dichte 95,17 % bei einer Standardabweichung von 1,44 % beträgt.

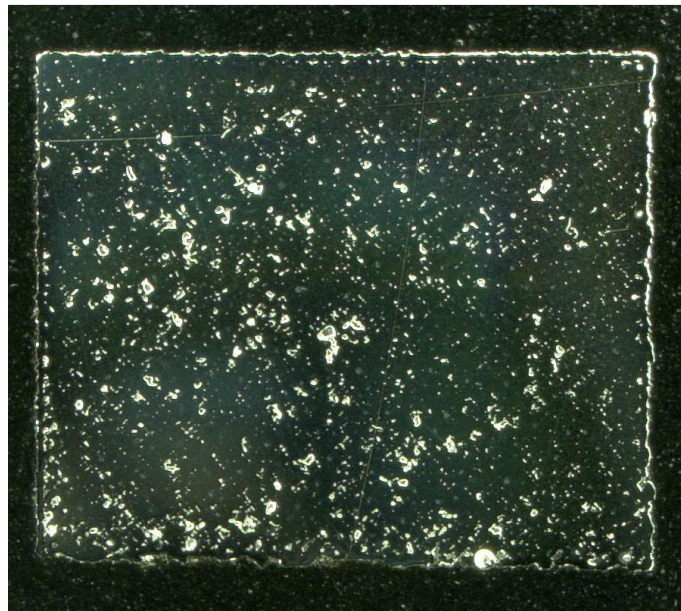


Abb. 46: Eingebettet, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2 (30fache Vergrößerung)

Zur Gefügebetrachtung zeigt Abb. 47 die 300fach vergrößerten Schliffe der Dichtequader. Links ist die Drauf- und rechts die Seitenansicht zu erkennen. Dabei zeigen die roten Markierungen die Eingriffsrichtung des Laserstrahls, während die orangen Pfeile auf einige

Fehlstellen hindeuten. Es zeigt sich, dass die einzelnen Schmelzbahnen nicht vollständig miteinander verbunden sind, was durch einen zu niedrigen Energieeintrag hindeutet, welcher aus einer falsch angenommenen Schmelzspurbreite resultieren könnte.

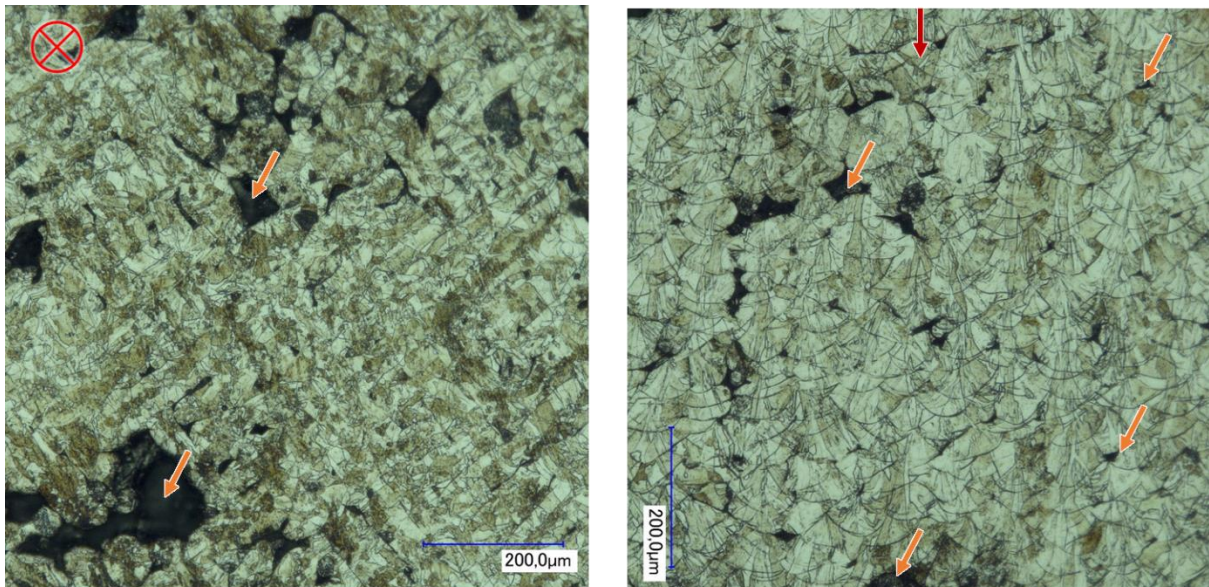


Abb. 47: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. (300fach vergrößert)

Die aufgeführten Fehler sind in der 1000fachen Vergrößerung der Seitenansicht (Abb. 48) noch deutlicher zu erkennen.

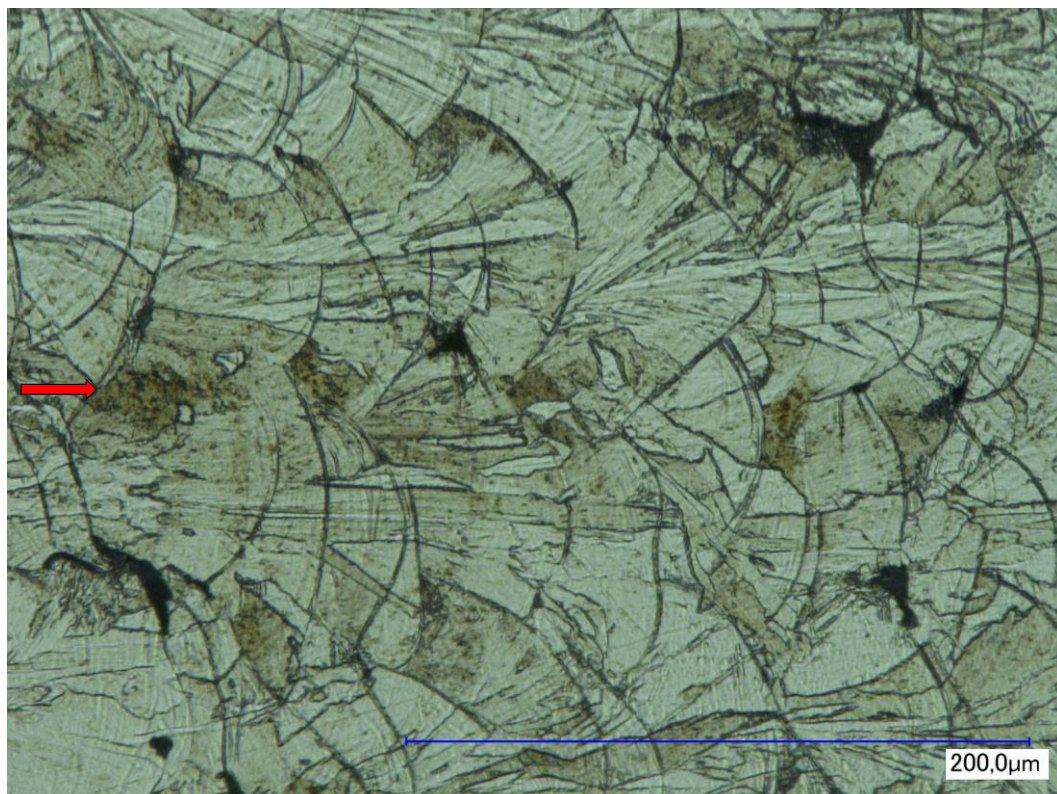


Abb. 48: Seitenansicht eines präparierten Dichtequaders bei 1000facher Vergrößerung

### Mechanisch-Technologische-Eigenschaften

Für den Parametersatz wurden acht Zugproben gefertigt. Auch hier erfolgte die Fertigung, wie bei den vorherigen Parametersätzen in zwei Sätzen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt. Von den 5 Zugproben des zweiten Satzes konnte nur eine ohne Störungen untersucht werden. Die dabei entstandenen Kennwerte liegen deutlich unter denen des ersten Probensatzes. Bedingt durch den Unterschied der beiden Sätze werden auch hier die ermittelten Kennwerte getrennt dargestellt.

Tabelle 12: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusning\_V2“-Proben

Probe	1_1	1_2	1_3	Mittelwert	Stabw
0,2%-Dehngrenze in Mpa	446	461	479	433	60
Zugfestigkeit in Mpa	503	513	533	478	77
Bruchdehnung in %	8	9	12	7	5
Bemerkung	-	-	-		

Probe	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
0,2%-Dehngrenze in Mpa	-	-	-	346	-
Zugfestigkeit in Mpa	-	-	-	364	-
Bruchdehnung in %	-	-	-	1	-
Bemerkung	Störung	Störung	Störung	-	Störung

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „crusing\_V2“-Proben sind in Diagramm 10 übereinanderliegend aufgetragen. Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die Kurven des ersten Satzes gestrichelt dargestellt. Hier wird der Unterschied zwischen den beiden Sätzen besonders deutlich. Während die Proben des ersten Satzes eine vollständige Spannungs-Dehnungs-Kurve bilden, versagen die Proben des zweiten Satzes schon im Bereich der Hookeschen Gerade durch einen Sprödbruch.

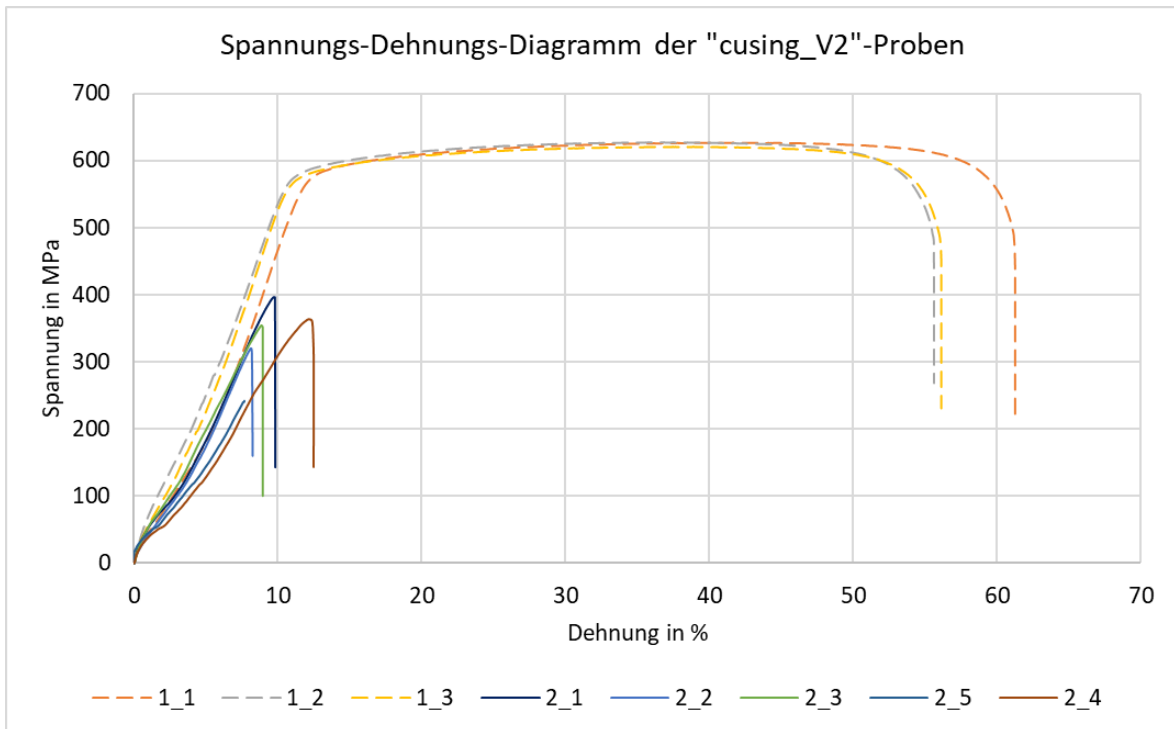


Diagramm 10: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing\_V2“-Proben

Werden nur die Ergebnisse des ersten Satzes betrachtet, zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Kennwerte bei eindimensionaler Zugbelastung, gegenüber dem CL20\_cusing\_V1.

Die Härtemessung nach Vickers (HV 30) ergab einen Wert von 168 mit einer Standardabweichung von 6. Die aus der Härte umgewandelte Zugfestigkeit liegt bei 576,9 MPa, was einer Abweichung von 21 % vom Ergebnis des ersten Prozentsatzes und einer Abweichung von 67 % des zweiten Prozentsatzes entspricht.

#### Oberflächenbeschaffenheit und Maßabweichungen

Die Ergebnisse der Abmaßuntersuchung sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Es wurde für die Dicke eine relatives Abmaß von 10,65 % bei einer Standardabweichung von 0,43 % gemessen. Die Abmaße für die Kopf- und Stegbreite liegen deutlich niedriger bei 2,93 % mit einer Standardabweichung von 0,11 % für die Kopfbreite und 2,93 % mit einer Standardabweichung von 0,28 % für die Stegbreite.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2

Zusammengefasste Abmaße der Zugversuchsprobe CL20_cusing_V2					
Messstelle	Messlänge (Soll) in mm	Abmaß			
		Absolut in mm		Relativ in %	
		Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
Dicke	2,00	0,21	0,01	10,65	0,49
Kopfbreite	20,00	0,09	0,02	0,43	0,11
Stegbreite	6,00	0,18	0,02	2,93	0,28

Die positiven Abmaße weisen wieder auf Pulveranhaftungen hin. Dabei lässt sich durch die niedrige Standardabweichung auf eine hohe Fertigungsgenauigkeit schließen.

Die Ergebnisse der Rauheitsuntersuchung können der Tabelle 14 entnommen werden. Dabei weisen die Messwerte keinen signifikanten Unterschied zwischen Z- und X/Y-Richtung auf.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2

CL20_cusing_V2							
Rauheiten in Z-Richtung				Rauheiten in X/Y-Richtung			
Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$		Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$	
Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
9,92	0,34	52,77	2,43	9,40	0,35	50,91	1,90

Die Ergebnisse ähneln dem des CL20\_Cusing\_V1 Parametersatzes, was darauf hindeutet, dass der Abstandfaktor ausschließlich die Flächenbelichtung beeinflusst.

### Zusammenfassung

Der CL20\_Cusing\_V2 weist durch die Anpassung des Abstandsfaktors ein deutlich dichteres Gefüge auf, woraus erhöhte mechanisch-technologische Eigenschaften resultieren. Aufgrund des sicheren Aufbaues und den vorhandenen Einschlüssen kann der Parametersatz zur Fertigung von kritisch aufzubauenden Bauteilen genutzt werden, bei denen eine Einschränkung der Festigkeit in Kauf genommen werden kann.

### 5.3.4 CL20\_cusing\_V2-1

Der Parametersatz CL20\_cusing\_V2-1 war nicht im Lieferungsumfang enthalten und wurde selbst geschrieben, um den Zusammenhang zwischen Gefügedichte und Energieeintrag zu untersuchen. Der Parametersatz ist bis auf die Scangeschwindigkeit mit dem CL20-cusing\_V2

Parametersatz identisch. Um den Energieeintrag zu erhöhen, wurden die Scangeschwindigkeit um 10 % reduziert, was in Tabelle 15 zu sehen ist.

Tabelle 15: Parametersatz CL20\_cusing\_V2-1 (vereinfacht)

Parametersatz	Belichtungselement	Streckenenergie		Spurversatz	
		$P_L [W]$	$v_S [\frac{mm}{s}]$	$S_B [mm]$	A1
CL20_CUSING_V2-1	Flächenbelichtung	90	1360	0,08	0,7
	Innenkontur	60	600		
	Außenkontur	60	600		
	Support	60	600		

### Gefügebau

Auch nach der Erhöhung des Energieeintrags weist das Gefüge in Abb. 49 Poren und Einschlüsse auf. Der Kennwert der theoretischen Dichte beträgt 0,9840 und die optisch ermittelte Dichte beträgt 96,19 % bei einer Standardabweichung von 1,44 %.

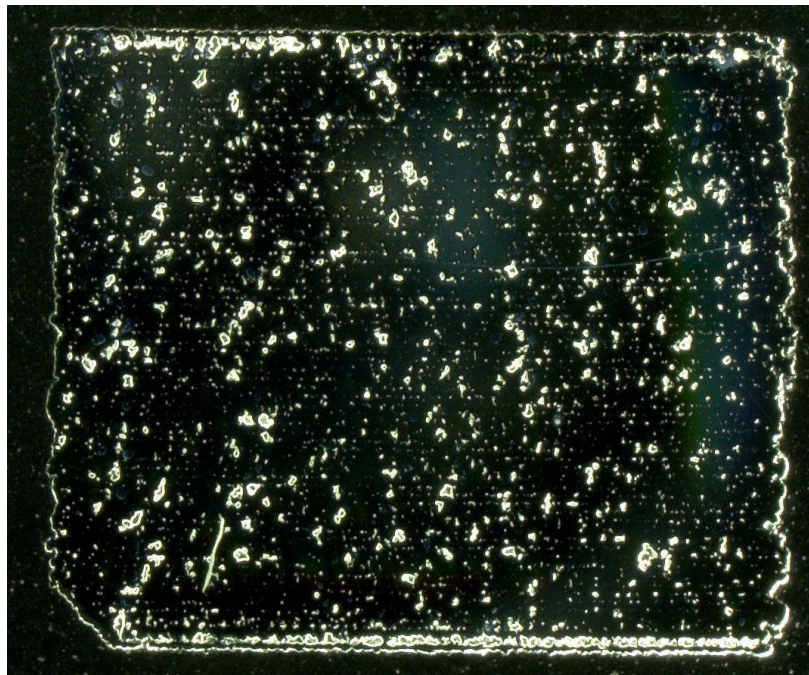


Abb. 49: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2-1 (30fache Vergrößerung)

Die Poren scheinen durch den erhöhten Energieeintrag weniger, aber größer geworden zu sein. Im Randbereich zeigt sich eine Häufung der Fehlstellen, was auf Probleme bei der Verbindung zwischen Flächen- und Konturbelichtung hindeutet. Da die Spurbreite nicht auf die neue Streckenenergie angepasst wurde, kann der Fehler darauf zurückzuführen sein.

Das Gefüge ist in Abb. 50 zu sehen. Es zeichnen sich einige größere Fehlstellen zwischen den einzelnen Schmelzspuren.

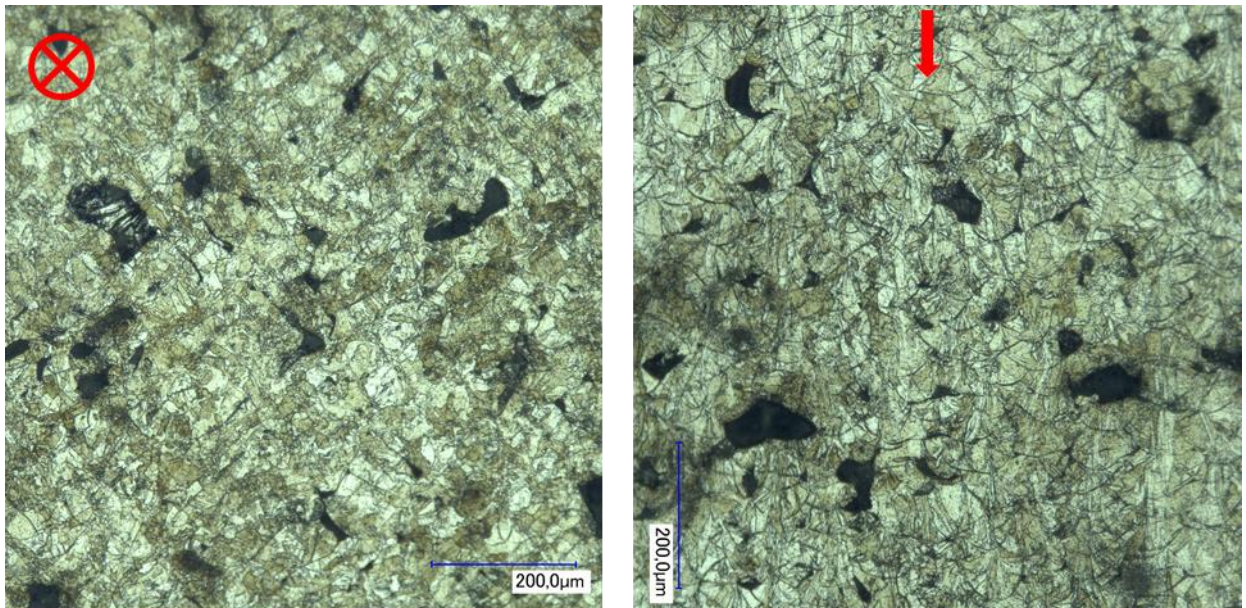


Abb. 50: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. (300fach vergrößert)

### Mechanisch-Technologische-Eigenschaften

Für die Ermittlung der mechanisch-technologischen Kennwerte wurden fünf Zugproben gefertigt, von denen zwei vollständig im Zugversuch untersucht werden konnten. Während die anderen Proben im Bereich der Hookeschen Gerade vorzeitig rissen. Die Zugproben wurden aus mehrfach aufbereitetem Material gefertigt und wiesen ein sprödes Verhalten bei der Untersuchung auf. Die ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 16 zusammengefasst und die dazugehörigen Spannungs-Dehnung-Kurven im Diagramm 11 übereinanderliegend abgebildet. Auffallend ist auch hier die niedrige Bruchdehnung.

Tabelle 16: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusning\_V2-1“-Proben

Probe	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5	Mittelwert	Stabw
0,2%-Dehngrenze in Mpa	-	-	462	466	-	464	3
Zugfestigkeit in Mpa	-	-	484	510	-	497	18
Bruchdehnung in %	-	-	1	5	-	3	3
Bemerkung	Störung	Störung	-	-	Störung		

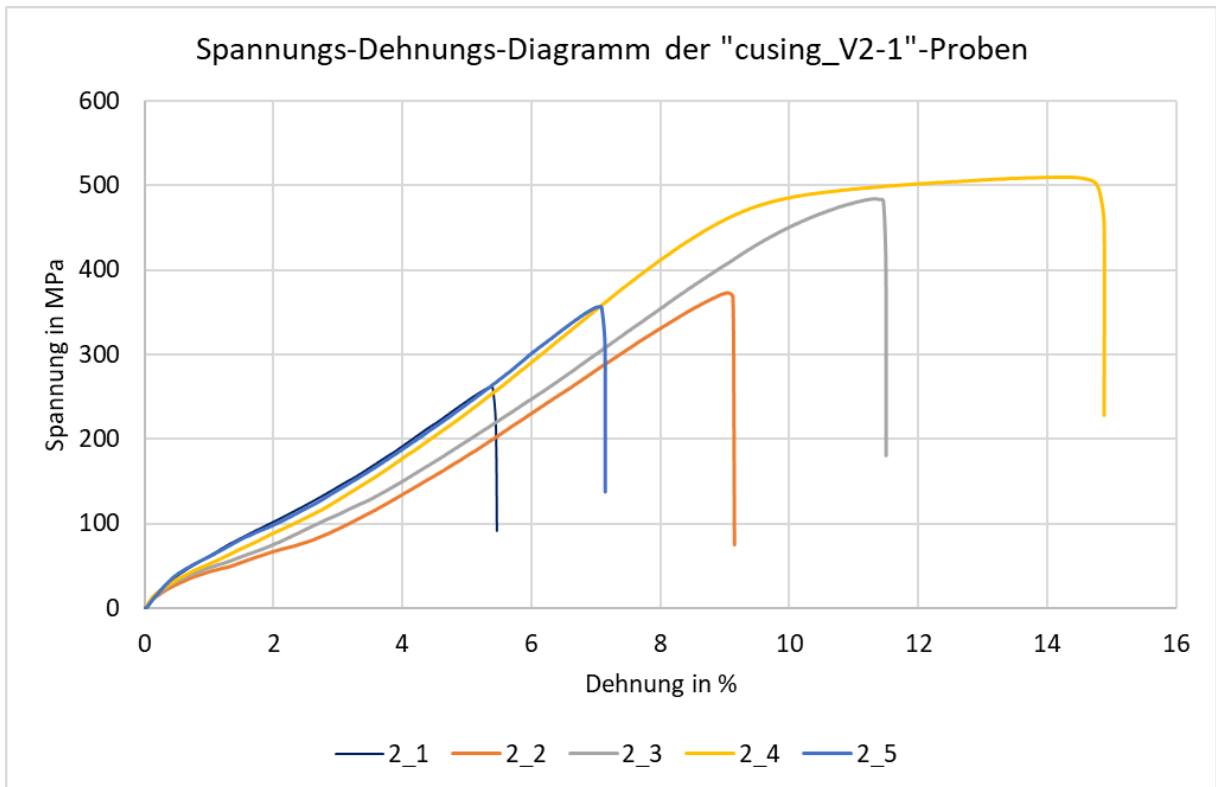


Diagramm 11: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing\_V2-1“-Proben

Die Härtemessung nach Vickers (HV 30) ergab einen Wert von 168 mit einer Standardabweichung von 6. Die aus der Härte umgewandelte Zugfestigkeit liegt bei 576,9 MPa, was einer Abweichung von 16% vom Ergebnis des Zugversuchs entspricht.

### Oberflächenbeschaffenheit und Maßabweichungen

Die Ergebnisse der Abmaßuntersuchung sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Es wurde für die Dicke eine relatives Abmaß von 111,82 % bei einer Standardabweichung von 0,41 % gemessen. Die Abmaße für die Kopf- und Stegbreite liegen deutlich niedriger bei 0,36 % mit einer Standardabweichung von 0,11 % für die Kopfbreite und 3,07 % mit einer Standardabweichung von 0,15 % für die Stegbreite.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2-1

Zusammengefasste Abmaße der Zugversuchsprobe CL20_cusing_V2-1					
Stelle	Messlänge in mm	Abmaß			
		Absolut im mm		Relativ in %	
		Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
Dicke	2,00	0,24	0,01	11,82	0,41
Kopfbreite	20,00	0,07	0,02	0,36	0,11
Stegbreite	6,00	0,18	0,01	3,07	0,15



Die positiven Abmaße und niedrigen Standardabweichungen weisen auf Pulveranhaftungen hin. Die Ergebnisse der Rauheitsuntersuchung können der Tabelle 18 entnommen werden. Die Messwerte weisen keinen signifikanten Unterschied zwischen Z- und X/Y-Richtung auf.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20\_cusing\_V2-1

CL20_cusing_V2-1							
Rauheiten in Z-Richtung				Rauheiten in X/Y-Richtung			
Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$		Ra in $\mu\text{m}$		Rz in $\mu\text{m}$	
Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw	Mittel	Stabw
10,10	1,34	55,88	5,45	10,46	1,30	54,19	5,69

### Zusammenfassung

Durch den höheren Energieeintrag konnte die Gefügedichte gesteigert werden, dabei zeigte die Härte keine Unterschiede. Durch die vermeintliche Pulveralterung können keine Aussagen zur Festigkeit getroffen werden. Die Maßabweichungen und Oberflächenbeschaffenheiten weisen keine signifikanten Unterschiede auf.

### 5.3.5 Gegenüberstellung und Fazit

In der Gegenüberstellung werden die Ergebnisse der einzelnen Parametersätze miteinander verglichen und auf Basis dessen werden Rückschlüsse auf die Einflüsse der einzelnen Parameter gezogen.

### Gefügebau

Die Ergebnisse der theoretischen und optisch ermittelten Dichte sind der Tabelle 19 zu entnehmen. Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse im Diagramm 12 graphisch dargestellt.

Tabelle 19: Theoretische und optisch ermittelte Dichte im Überblick

Parameter		CL20_performance	CL20_cusing_V1	CL20_cusing_V2	CL20_cusing_V2-1
Theoretische Dichte		1,0019	0,8166	0,9608	0,9840
Optische Dichte in %	Mittelwert	99,84	82,89	95,17	96,19
	Standardabweichung	0,16	8,22	1,44	1,44

Die Ergebnisse der theoretischen Dichte (blau) sind auf der Primärachse aufgetragen, während die Sekundärachse die optisch ermittelten Dichte (orange) wiedergibt.

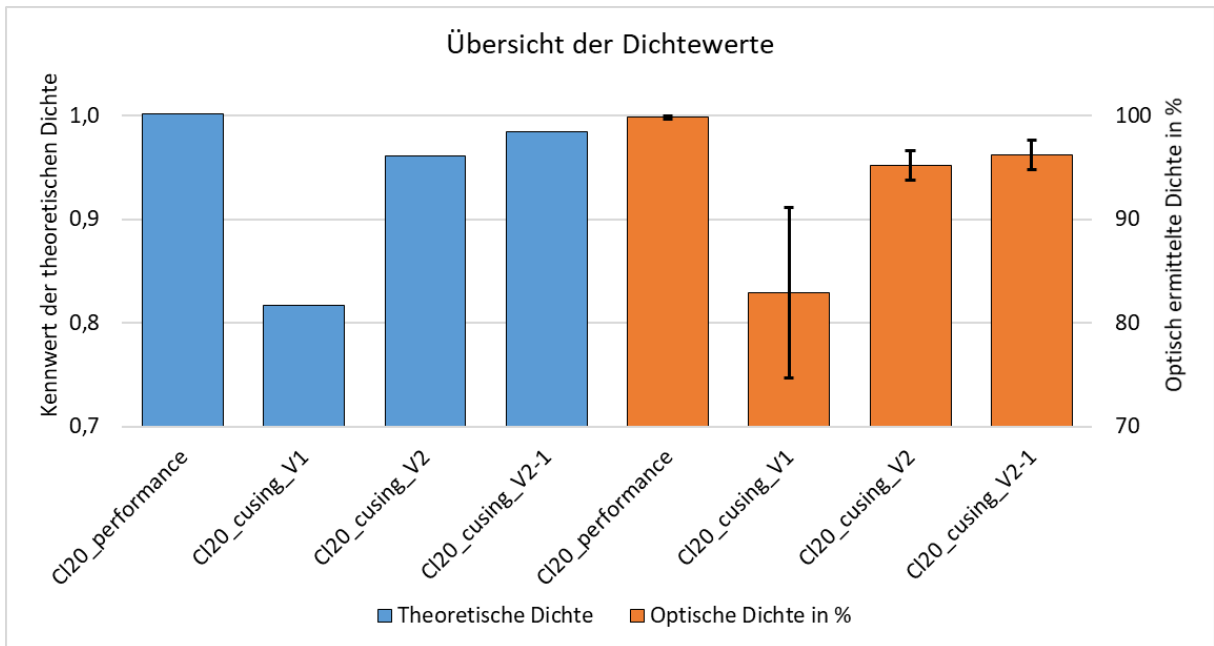


Diagramm 12: Graphische Darstellung der theoretischen und optisch ermittelten Dichtewerte

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der beiden Messmethoden zur Ermittlung der Dichte vergleichbare Ergebnisse liefern. Der CL20\_performance weist ein nahezu dichtes Gefüge auf, während die „cusing“-Parametersätze Einschlüsse und Fehlstellen aufweisen, was sich negativ auf die Dichte auswirkt. Innerhalb der „cusing“-Parametersätze nimmt die Dichte der Reihenfolge nach zu, was in Abb. 51 besonders deutlich wird. Die Abbildung gibt einen Überblick der entstandenen Gefüge. In den oberen und unteren Aufnahmen sind die 30fach vergrößerten Aufnahmen des ungeätzten Probekörper zu erkennen. Der mittlere Streifen zeigt die 300fach Vergrößerung des Gefüges. Es zeigt sich deutlich der Einfluss der einzelnen Parametersätze.

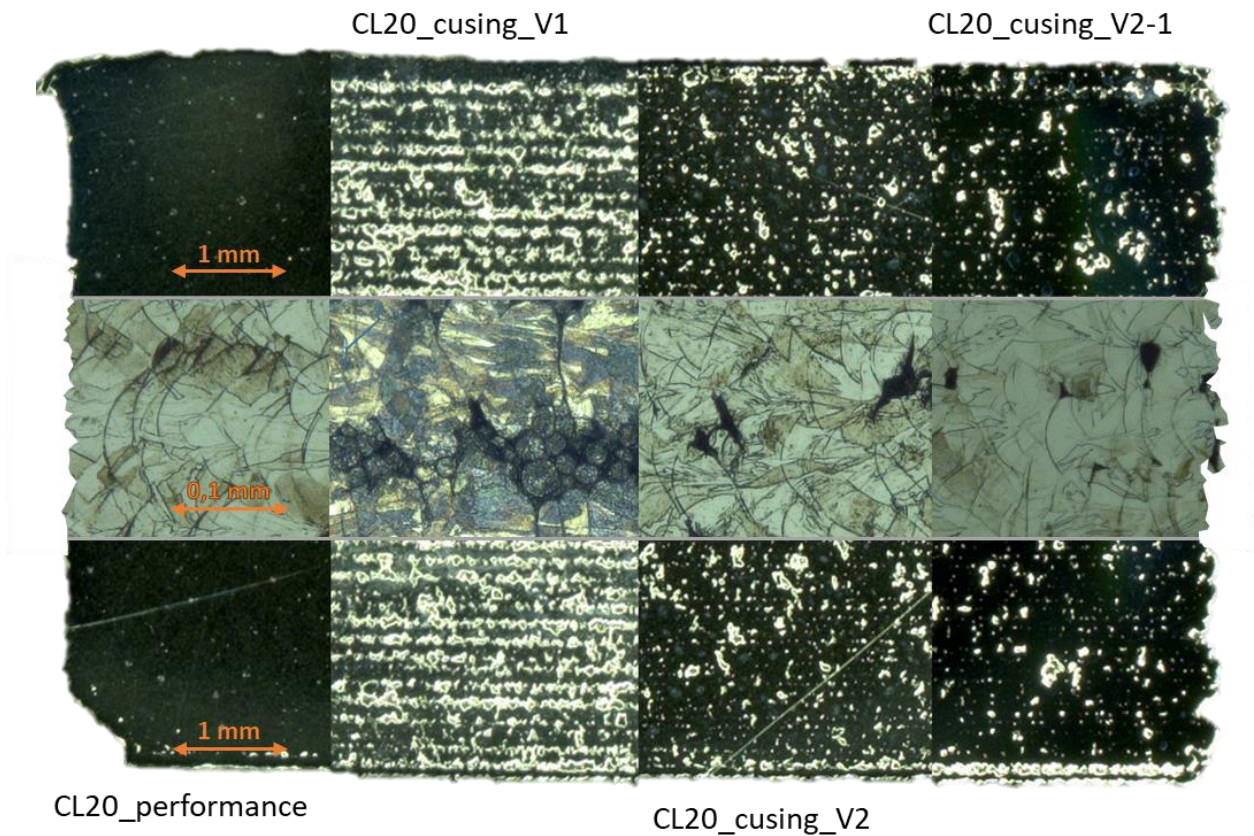


Abb. 51: Vergleich der Gefüge

Die unterschiedlichen Dichten können auf den unterschiedlichen Energieeintrag zurückgeführt werden. Da der CL20\_performance wahrscheinlich einen vergleichsweise hohen Energieeintrag aufweist, entsteht ein dichtes Gefüge.

Bedingt durch den Softwarefehler und dem damit einhergehenden erhöhten Abstandsfaktor erzeugt der CL20\_cusing\_V1 ein poröses Gefüge, da sich die einzelnen Schmelzbahnen nicht überlappen.

Durch die Korrektur des Abstandsfaktors bei dem CL20\_cusing\_V2 weist dieser den zweifachen Energieeintrag des CL20\_cusing\_V1 auf. Woraus ein deutlich dichteres Gefüge resultiert.

Der Energieeintrag des CL20\_cusing\_V2-1 liegt 10 % höher, als beim CL20\_cusing\_V2. Woraus ein etwas dichteres Gefüge entsteht. Jedoch kann keine sichere Aussage zur Signifikanz getroffen werden.

Es deutet darauf hin, dass eine Korrelation zwischen dem Energieeintrag und der Dichte besteht. Der Energieeintrag der „cusing“-Parametersätze erscheint unzureichend, um eine hohe Gefügedichte zu erzielen. Durch den Softwarefehler des CL20\_cusing\_V1 ist der

Parametersatz kaum nutzbringend einsetzbar, jedoch wird der Einfluss des Abstandsfaktors anschaulich verdeutlicht.

Die Fehlerhäufung im Randbereich der Probekörper resultiert aus einer unzureichenden Bindung zwischen Kontur- und Flächenbelichtung, für die keine umfassende Ursache lokalisiert werden konnte.

### Mechanisch-Technologische-Eigenschaften

Die Werte der mechanisch-technologischen Untersuchungen sind in Tabelle 20, zusammen mit den Ergebnissen der spanend gefertigten Referenzproben, zusammengefasst. Dabei gibt die eingeklammerte Zahl hinter den Parametersatzbezeichnungen den Probekörpersatz an.

Der Härtewert und der darauf basierende umgewertete Zugfestigkeitswert für die gespannten Proben mussten, aufgrund eines technischen Defekts der Prüfanlage, der Literatur (24) entnommen werden. Alle weiteren Härtewerte wurden aus Probekörpern des zweiten Probesatzes ermittelt.

Für eine bessere Übersicht sind die Ergebnisse in Diagramm 13 und Diagramm 14 graphisch dargestellt.

Tabelle 20: Zusammenfassung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften

Parameter	Dehngrenze		Zugfestigkeit		Bruchdehnung		Härte nach Vickers		Zugfestigkeit (Umgewertet)
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	
Cl20_performance	541	23	618	15	25	3	216	10	751,4
Cl20_cusing_V1 (1)	191	9	219	7	3	2			
Cl20_cusing_V1 (2)	158	3	168	3	1	0	69	5	
Cl20_cusing_V2 (1)	433	60	478	77	7	5			
Cl20_cusing_V2 (2)	346		364		1		168	6	576,9
Cl20_cusing_V2-1	464	3	497	18	3	3	168	6	579,6
Zerspante Vergleichsproben	305	8	623	6	54	1	233	2	805

Im folgenden Diagramm sind die Festigkeitswerte auf der Primärachse aufgetragen und die Dehnung auf der Sekundärachse. Für die graphische Auswertung wurden für die Parametersätze CL20\_cusing\_V1 und V2 nur die Werte des ersten Probekörpersatzes verwendet. Zu einem wird dadurch eine bessere Übersicht erreicht. Zum anderen ist es zu erwarten, dass die niedrigeren Werte des zweiten Satzes auf eine Pulveralterung zurückzuführen ist und somit nur bedingt vergleichbar ist. Aufgrund dessen und da nur eine

Zugprobe vollständig untersucht werden konnte, sind die ermittelten Werte für den CL20-cusing\_V2-1 Parametersatz nur bedingt belastbar.

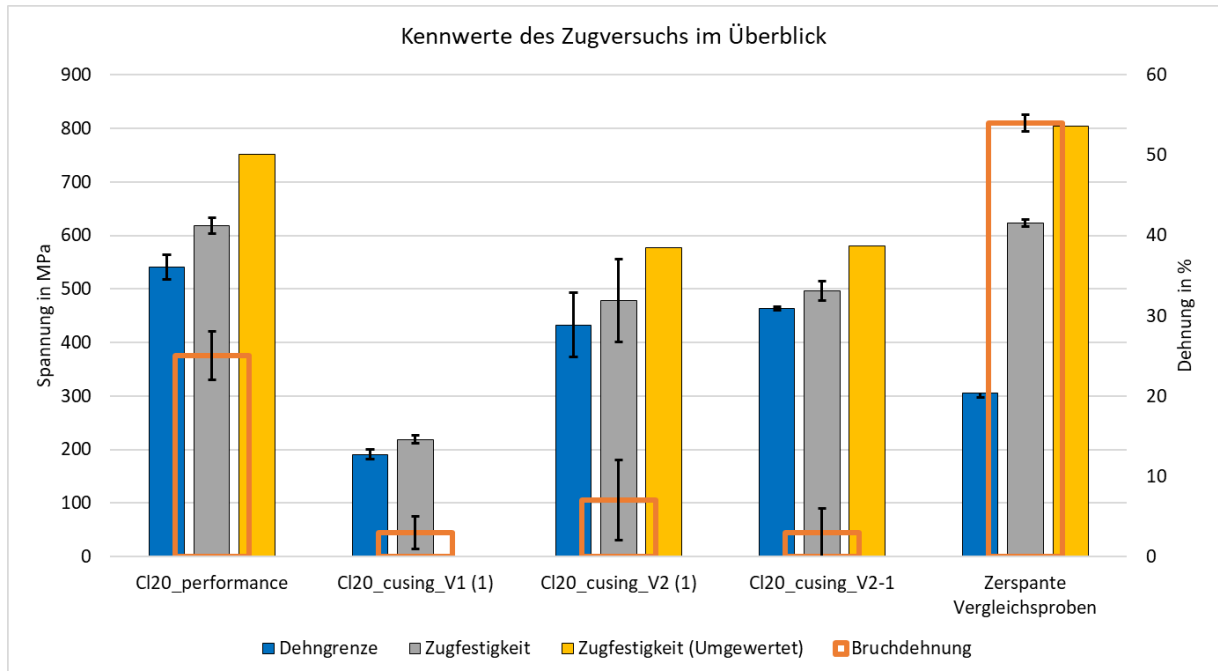


Diagramm 13: Graphische Darstellung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften I

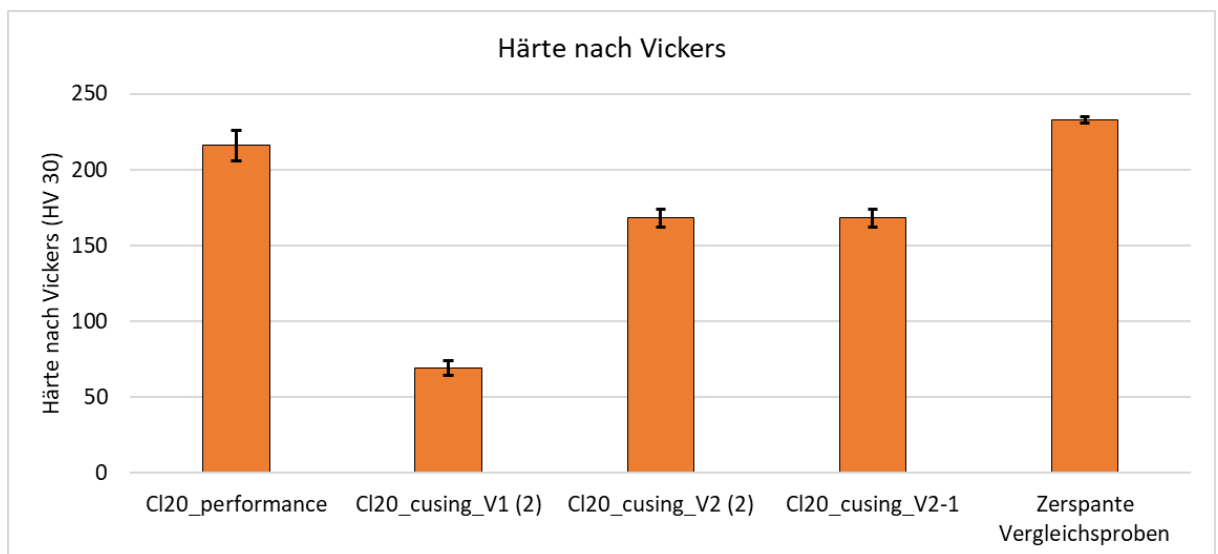


Diagramm 14: Graphische Darstellung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften II

Bei Betrachtung der Diagramme zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei den Dichtewerten. Die Parametersätze mit einer geringeren Dichte weisen dabei niedrigere mechanisch-technologische-Kennwerte auf, was auf einen Zusammenhang zwischen Dichte und Festigkeit hindeutet. Dies kann an einer schlechteren Verbindung der einzelnen Schichten, aufgrund zu niedrigem Energieeintrag, liegen. Sowie der Tatsache verschuldet sein, dass bei einer

niedrigeren Dichte, auch weniger Material vorhanden ist und somit die resultierende Testfläche kleiner ist.

Im Vergleich mit den Referenzproben liegen die ermittelten Zugfestigkeiten und Dehngrenzen teilweise deutlich niedriger. Während die Dehngrenzen, bis auf die der CL20\_cusing\_V1 Proben, oberhalb der Referenzwerte liegen.

Des Weiteren zeigt sich, dass die umgewerteten Zugfestigkeiten oberhalb der tatsächlichen Werte liegen. Aufgrund der unzureichenden Übereinstimmung wird die Härteumwertung im betrachteten Prozessfenster als ungenügend betrachtet und im Folgenden nicht mehr angewandt. Dabei muss beachtet werden, dass alle Härtewerte an den Proben des zweiten Fertigungssatzes ermittelt wurden. Da bei diesen eine Versprödung zu vermuten ist, können der ermittelte Härtewert höher liegen, als es im normalen Zustand der Fall wäre. Wodurch sich die umgewertete Zugfestigkeitswerte erhöhen, was die Abweichungen erklären könnte.

### Oberflächenbeschaffenheit

Die ermittelten Rauheiten der vier Parametersätze sind in Tabelle 21 zusammengefasst und mit ihrer jeweiligen Standardabweichung im Diagramm 15 und Diagramm 16 graphisch dargestellt.

Tabelle 21: Übersicht der ermittelten Rauheiten

Parameter	Rauheit in Z-Richtung in $\mu\text{m}$				Rauheit in X/Y-Richtung in $\mu\text{m}$			
	Ra		Rz		Ra		Rz	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
CL20_performance	6,69	0,37	36,70	2,18	9,04	0,83	51,91	6,47
CL20_cusing_V1	8,92	0,93	48,25	6,80	8,92	0,50	49,58	2,04
CL20_cusing_V2	9,92	0,34	52,77	2,43	9,40	0,35	50,91	1,90
CL20_cusing_V2-1	10,10	1,34	55,88	5,45	10,46	1,30	54,19	5,69

Das erste Diagramm gibt den Mittenrauwert wieder und im zweiten sind die gemittelten Rautiefen abgebildet. Dabei sind die Messstrecken in Z-Richtung blau und die in X/Y-Richtung orange dargestellt.

Es zeigt sich, dass sowohl Mittenrauwert und gemittelte Rautiefe der drei „cusing“-Parametersätze keine signifikanten Unterschiede zueinander aufweisen. Lediglich der CL20\_performance Parametersatz unterscheidet sich signifikant von den anderen getesteten Parametersätzen. Wobei der Unterscheid jedoch verhältnismäßig gering ist. Der Unterschied

kann aus einem unterschiedlichen Unterparameter zur Außenkontur zurück zu führen sein oder aus einem deutlich höheren Energieeintrag resultieren.

Die Messungen in Z- und X/Y-Richtung unterschieden sich innerhalb der einzelnen Parametersätze lediglich beim CL20\_performance signifikant voneinander.

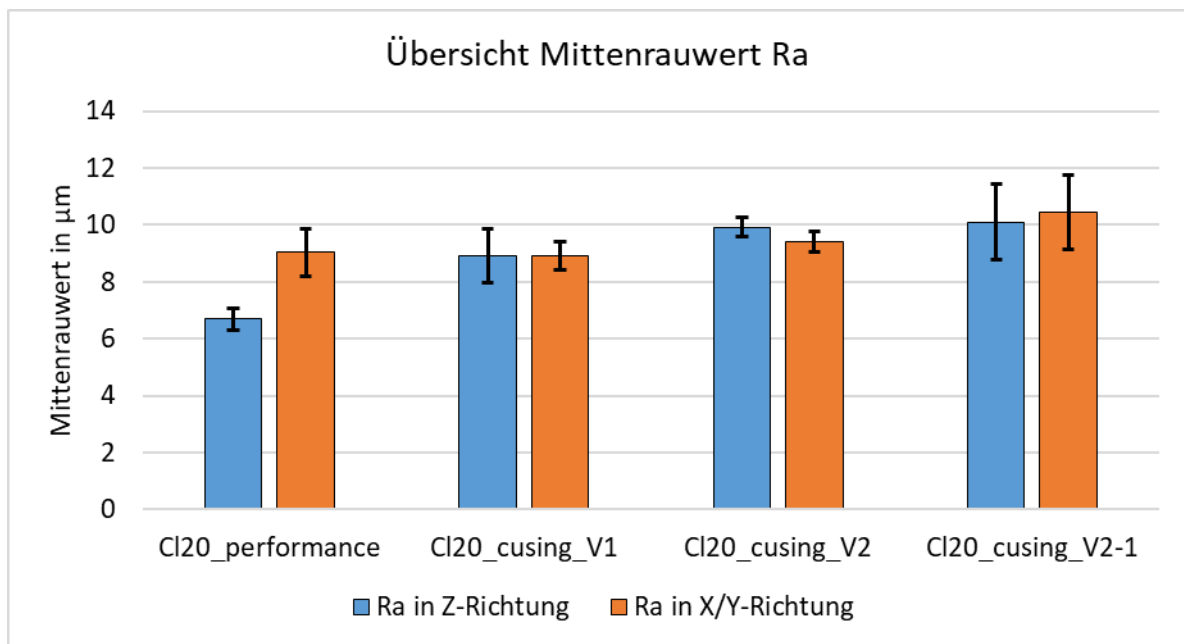


Diagramm 15: Graphische Darstellung der Mittenrauwerte mit der Standardabweichung

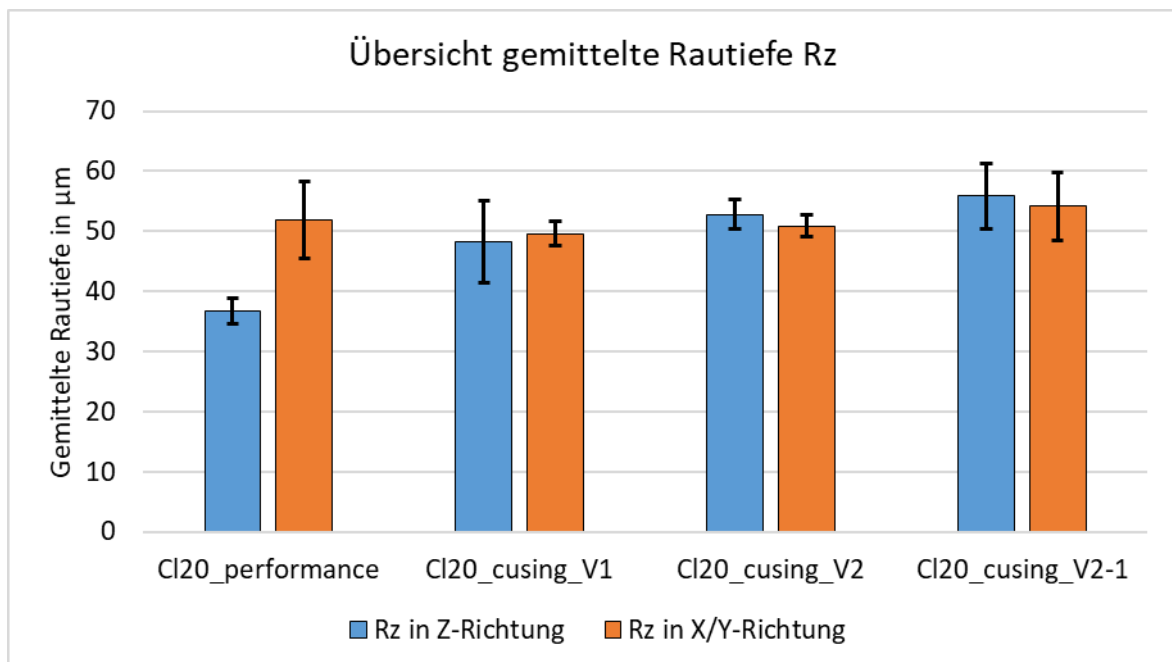


Diagramm 16: Graphische Darstellung der gemittelten Rautiefen mit der Standardabweichung

Die ähnlichen Rauheiten der Parametersätze lassen sich auf zwei Einflüsse zurückzuführen. Zum einen verwenden die „cusing“-Parameter einen identischen Unterparametersatz für die Außenkontur. Zum anderen wurden alle Messungen ohne vorheriger Nachbehandlung durchgeführt, wodurch Pulveranhaftungen zu erwarten sind, welche das Messeergebnis der Rautiefen entscheidend beeinflussen können.

Darüber hinaus kam es bei dem CL20\_performace Parametersatz zu thermisch bedingten Aufbaufehlern, während die anderen Parametersätze keine sichtbaren Prozessstörungen aufwiesen.

Verglichen mit der spanenden Fertigung sind die erreichten Oberflächenwerte mit dem Fräsen beim Schruppvorgang vergleichbar, was dem ISO-Toleranzgrad 11 entspricht. (38 S. 96)

### Abmaße

Die ermittelten relativen Abmaße sind der Tabelle 22 zu entnehmen. Zur besseren Übersicht wurden die Ergebnisse im Diagramm 17 graphisch zusammen mit der Standardabweichung aufgetragen.

Tabelle 22: Übersicht der ermittelten relativen Abmaße

Relative Abmaße und Standardabweichung in %		Messlänge	Cl20_performance		Cl20_cusing_V1		Cl20_cusing_V2		Cl20_cusing_V2-1	
			Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Messstelle	Dicke	2,00 mm	10,53	1,19	10,26	0,53	10,65	0,49	11,82	0,41
	Kopfbreite	20,00 mm	0,16	0,11	0,46	0,17	0,43	0,11	0,36	0,11
	Stegbreite	6,00 mm	2,08	0,10	3,03	0,30	2,93	0,28	3,07	0,15

Es zeigt sich, dass sich die Abmaße innerhalb einer Messstelle ähneln, während sich die einzelnen Messstellen deutlich unterscheiden. Die Probendicke weist die höchste Abweichung auf, während Kopf- und Stegbreite mit deutliche niedrigere Abmaßen behaftet sind. Dabei weisen die ermittelten Abmessungen eine geringe Standardabweichung von durchschnittlich 0,33 % auf, was auf eine systematische Maßabweichung hindeutet. Darüber hinaus wurden ausschließlich positive Abmaße ermittelt.



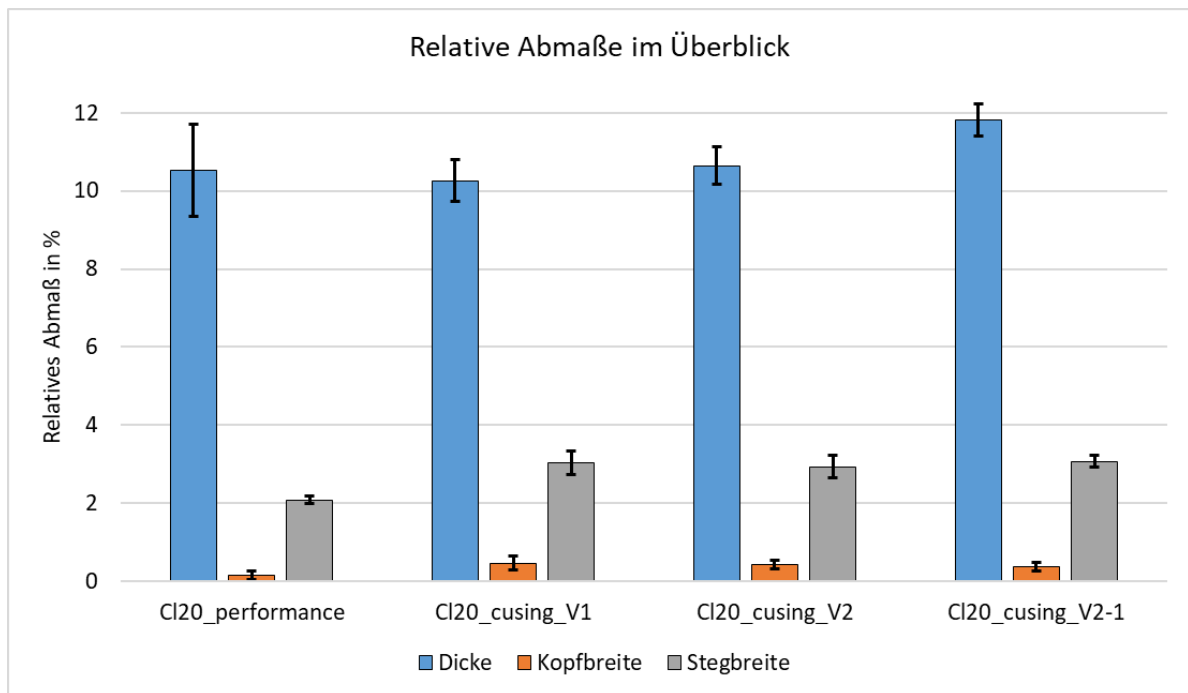


Diagramm 17: Graphische Darstellung der ermittelten relativen Abmaße

Da die Abmaße innerhalb einer Messstelle nur geringfügig voneinander abweichen, kann von einer hohen Maßhaltigkeit im Fertigungsprozess ausgegangen werden. Es konnten ausschließlich Übermaße ermittelt werden, welche auf das Anhaften von thermisch aktivierten Pulverkörnern hindeuten. Die vergleichsweise hohen Abmaße bei der Probendicke können durch die geometrischen Gegebenheiten der Messstelle erklärt werden. Die betrachtete Messstelle weist die größte Fläche auf, womit eine erhöhte Anfälligkeit für Pulveranhaftungen einhergeht.

### Fazit

Es zeigte sich eine Korrelation zwischen dem Energieeintrag und der Gefügedichte. Darüber hinaus scheinen die mechanisch-technologischen Eigenschaften direkt mit der Gefügedichte zusammenhängen. Bei der Fertigung der Proben konnte eine mit dem Alter des Ausgangsmaterial zunehmende Versprödung der Probekörper festgestellt werden. Die erstellten Proben wiesen eine gleichmäßige geometrische Abweichung, woraus auf einen präzisen Fertigungsprozess geschlossen wird. Zum Parametereinfluss auf die Oberflächenqualität kann keine Aussage getroffen werden.

## 5.4 Spurbreiten

Für die Auslegung von Parametersätzen ist es notwendig im Vorhinein eine Aussage über die zu erwartende Schmelzspurbreite treffen zu können. Um das zu ermöglichen, wird ein Versuch konzipiert, der den Zusammenhang zwischen Laserstrahlleistung, Scangeschwindigkeit und Schmelzspurbreite untersuchen soll.

### 5.4.1 Versuchsauslegung und Durchführung

Im Allgemeinen hängt die Größe der Schmelzspurbreite von drei Parametern ab, dem Laserfocus, der Laserstrahlleistung sowie der Scangeschwindigkeit. Der Entstehungsvorgang einer Schmelzspur ist in Abb. 52 dargestellt.

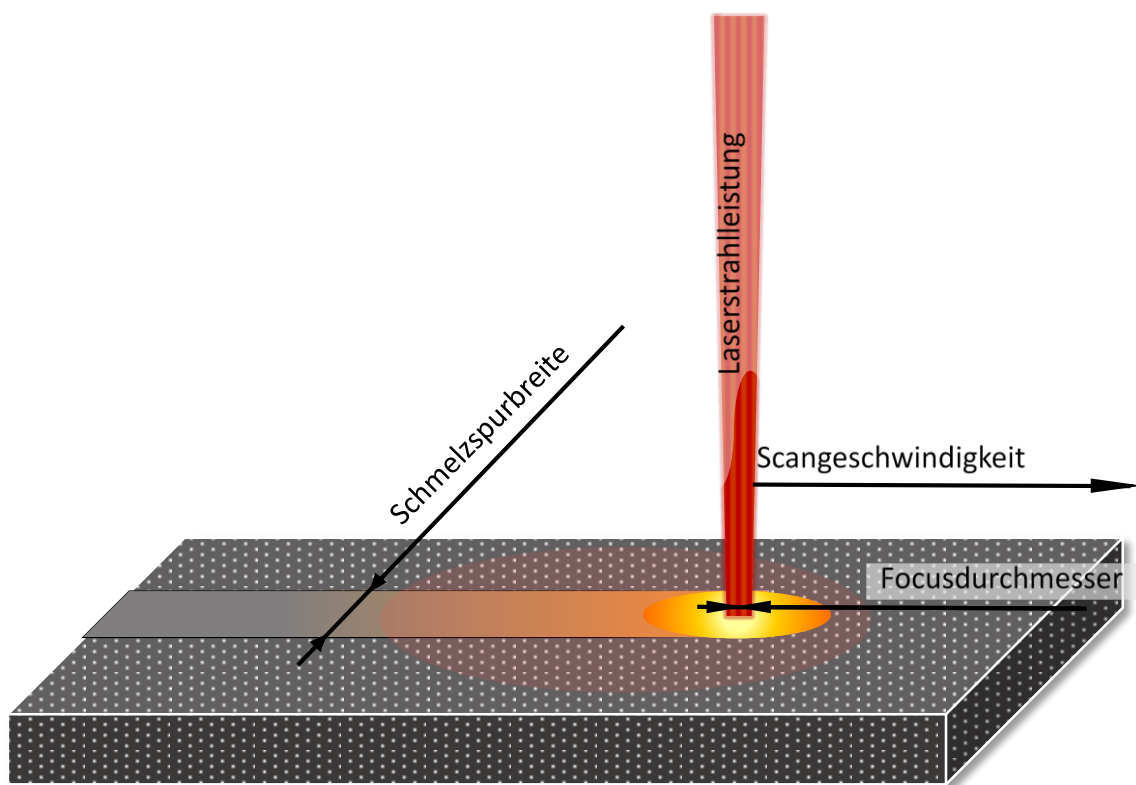


Abb. 52: Entstehung einer Schmelzspur

Der Laserstrahl erzeugt ein lokales Schmelzbad, welches durch die Vorwärtsbewegung des Laserstrahls bewegt wird und eine Schmelzspur erzeugt. Da der Laserfocus unveränderlich ist, lässt sich die Schmelzspurbreite ausschließlich über die Scangeschwindigkeit und die Laserleistung steuern, was den beiden Einflussfaktoren der Streckenenergie entspricht.

Aufgrund der Überschneidung lässt sich ein Zusammenhang zwischen Streckenenergie und Spurbreite erwarten.

Bei einer verminderten Laserstrahlleistung sollte die Breite des Schmelzbades sinken, was zu einer Spurbreitenreduzierung führt, während eine Senkung der Scangeschwindigkeit die Einwirkzeit des Laserstrahls erhöht, wodurch die Schmelzbadgröße ansteigen sollte.

Zusammengefasst wird davon ausgegangen, dass die Spurbreite bei steigender Streckenenergie zunimmt.

### Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Schmelzspurbreite wird der in Abb. 53 gezeigte Probekörper verwendet. Die linke Abbildung zeigt den, aus Vektorzügen bestehenden, Grundentwurf der Geometrie mit ihren 12 Messstellen, während der vollständige Probekörper auf der rechten Seite zu erkennen ist. Die äußeren Kanten (01 – 06) basieren auf einem Kreis mit einem Durchmesser von 10 mm, während die Aufbauhöhe 2 mm beträgt.

Da der Laserstrahl die einzelnen Vektorzüge abfährt, entspricht die Wanddicke des gefertigten Probekörpers der Schmelzspurbreite und kann mit dem Lichtmikroskop ausgewertet werden. Dabei sollen die unterschiedlich orientierten Messstellen positionsabhängigen Messabweichungen entgegenwirken.

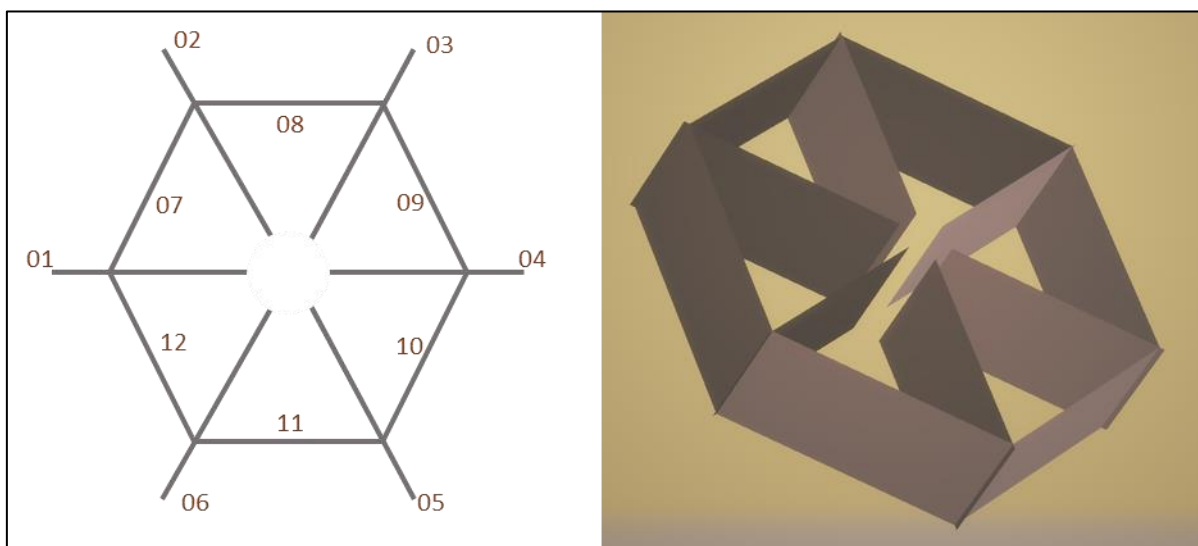


Abb. 53: Versuchsgeometrie für den Spurbreitenversuch

Für die Auslegung der Testparameter wird ein gedankliches Koordinatensystem, wie in Abb. 54 aufgespannt. Dabei steht die X-Achse für die Laserstrahlleistung und die Y-Achse für die Scangeschwindigkeit, wodurch die Streckenenergie von unten links nach rechts oben zunimmt.

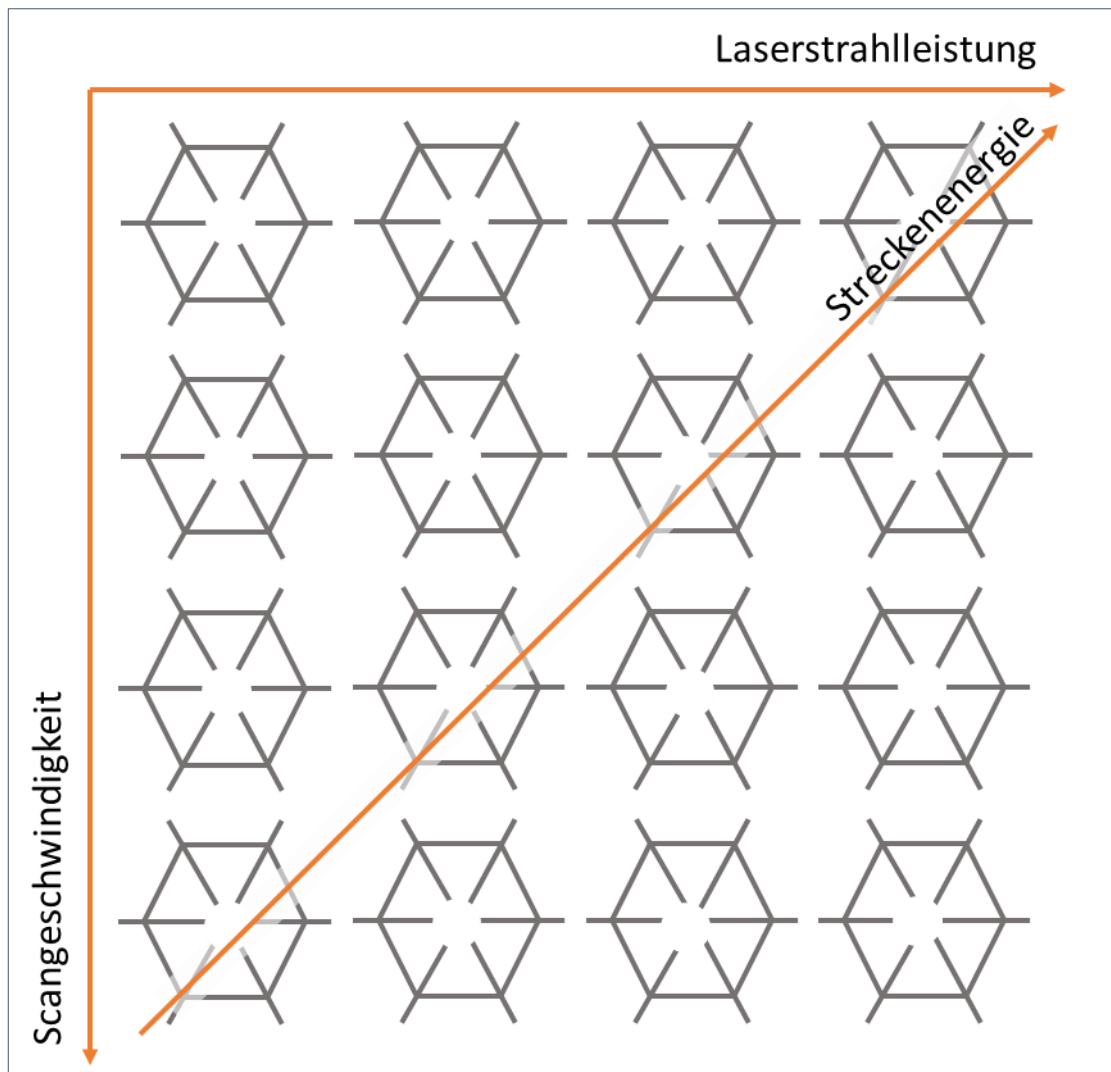


Abb. 54: Versuchsaufbau zur Schmelzspurbreitenermittlung

Dieses gedachte Koordinatensystem wird so über die, durch die drei Ausgangsparametersätze vorhandenen Parameter gelegt und positioniert, dass Testparameter unterhalb und oberhalb der vorhandenen Werte entstehen. Dabei wird die Skalierung so festgelegt, dass insgesamt 30 Testparameter entstehen.

Daraus resultieren folgenden Testwerte:

Laserstrahlleistung: 60 W; 67,5 W; 75 W; 82,5 W; 90 W und 100 W

Scangeschwindigkeit:  $0,6 \frac{m}{s}$ ;  $0,9 \frac{m}{s}$ ;  $1,2 \frac{m}{s}$ ;  $1,5 \frac{m}{s}$  und  $1,8 \frac{m}{s}$

Die vollständigen Testparameter können dem Anhang entnommen werden.



Abb. 55: Bauplatte mit 20 Probekörpern für die Schmelzspurbreite

### 5.4.2 Versuchsauswertung

Die beschriebenen Parameter konnten ohne Prozessstörungen vollständig aufgebaut und mittels Lichtmikroskopie vermessen werden. Es wurden die Messstellen möglichst in zufälliger Reihenfolge ausgewertet, um Messwertverfälschungen durch die Erwartungshaltung des Versuchsdurchführenden entgegenzuwirken.

Zur besseren Übersicht sind die Messergebnisse inklusive der jeweiligen Standardabweichung in Diagramm 18 dargestellt. Dabei ist die Schmelzspurweite auf der Y-Achse und die jeweiligen Parameter mit steigendem Streckenenergie auf der X-Achse aufgetragen. Dabei zeigt sich eine zunehmende Schmelzspurweite bei steigender Streckenenergie, wodurch die Anfangsthese gestützt wird.

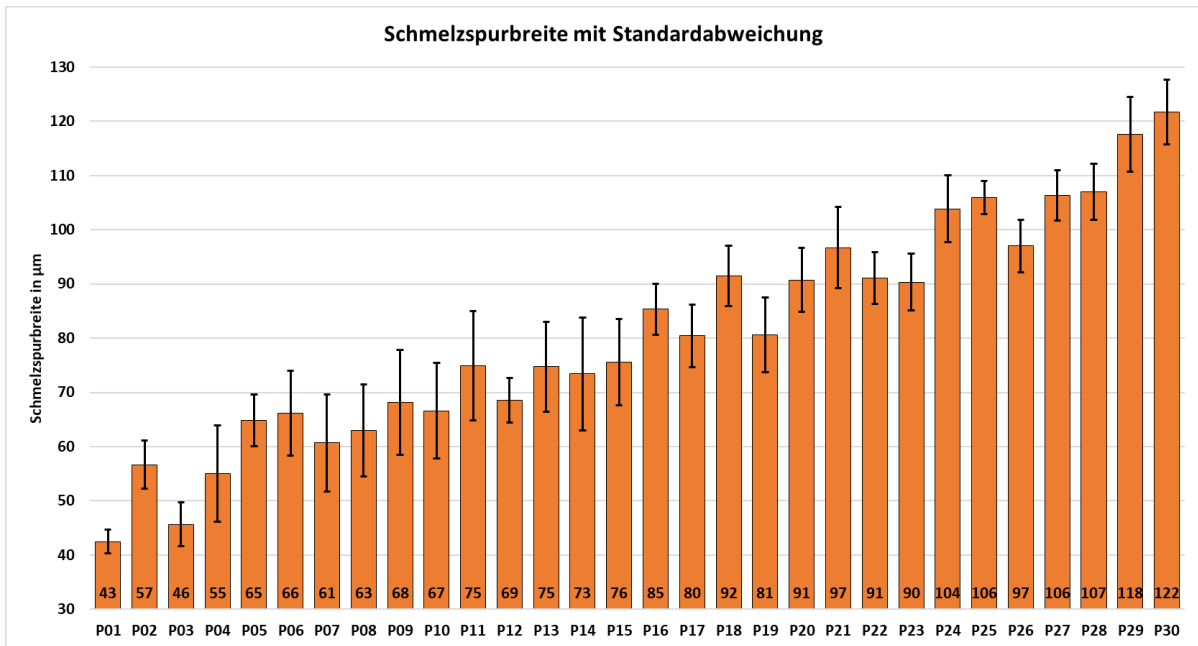


Diagramm 18: Ermittelte Schmelzspurbreite mit der jeweiligen Standardabweichung

Um die Korrelation zwischen Streckenenergie und Schmelzspurbreite besser veranschaulichen zu können, wird die Schmelzspurbreite im Diagramm 19 über die Streckenenergie aufgetragen. Dabei zeichnet sich ein logarithmischer Anstieg der Schmelzspurbreite ab.

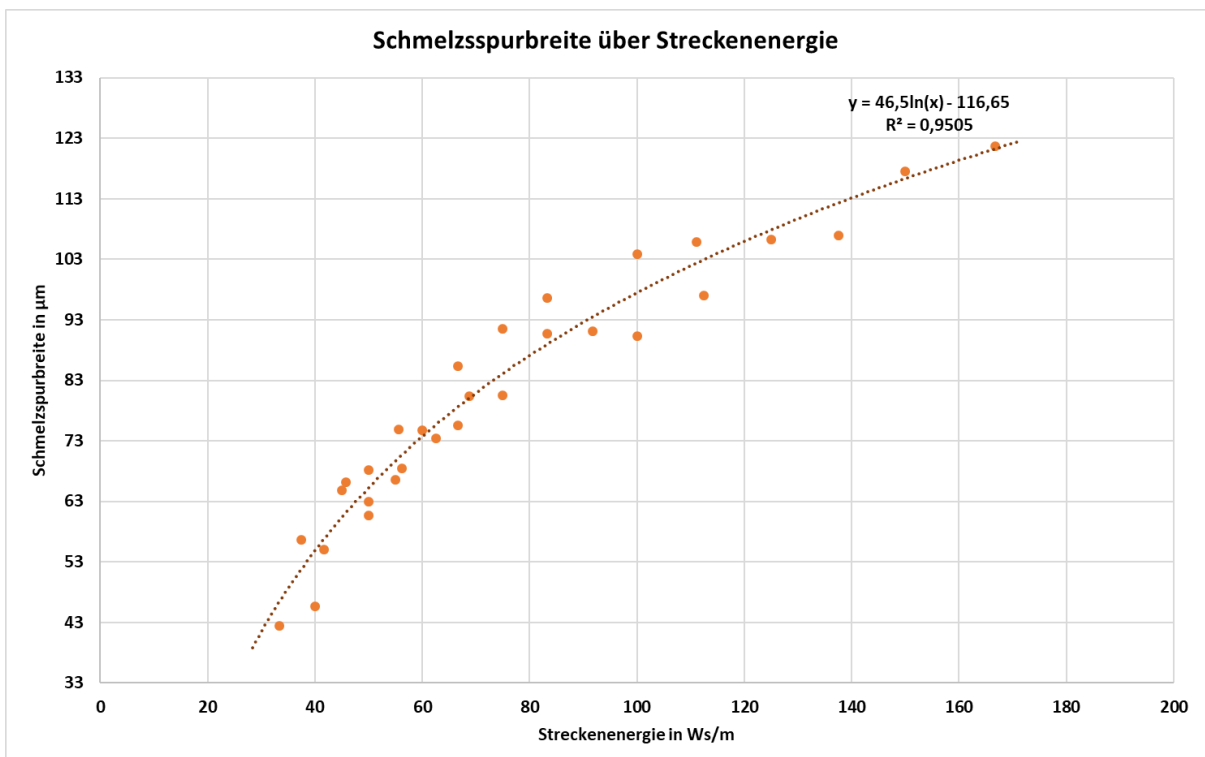


Diagramm 19: Die Schmelzspurbreite über die Streckenenergie aufgetragen mit logarithmischer Trendlinie

Zur Überprüfung der einzelnen Variablen der Streckenenergie, wird in Diagramm 20 die Schmelzspurbreite auf die Scangeschwindigkeit und in Diagramm 21 auf die Laserstrahlleitung aufgetragen.

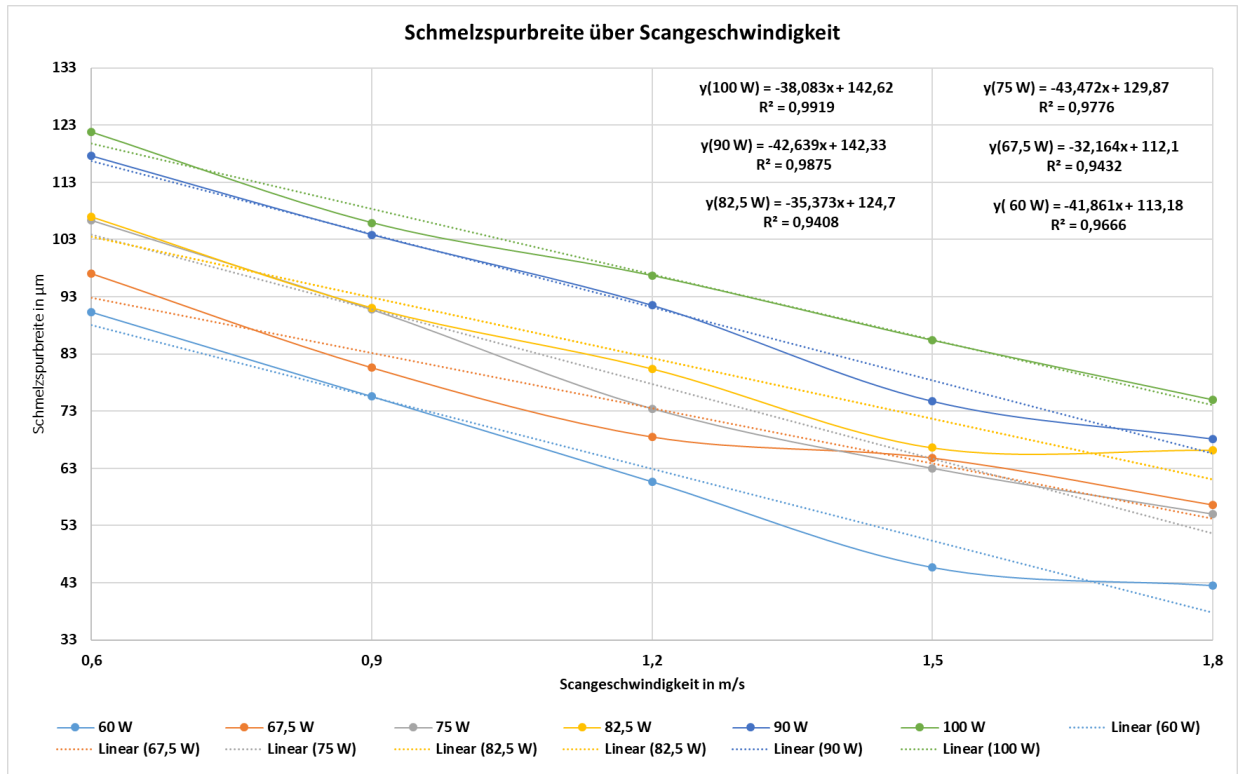


Diagramm 20: Schmelzspurbreite auf Scangeschwindigkeit

Es zeigt sich eine linear abnehmende Schmelzspurbreite bei steigender Scangeschwindigkeit, was sich durch die kürzere Einwirkdauer des Laserstrahls erklären lässt.

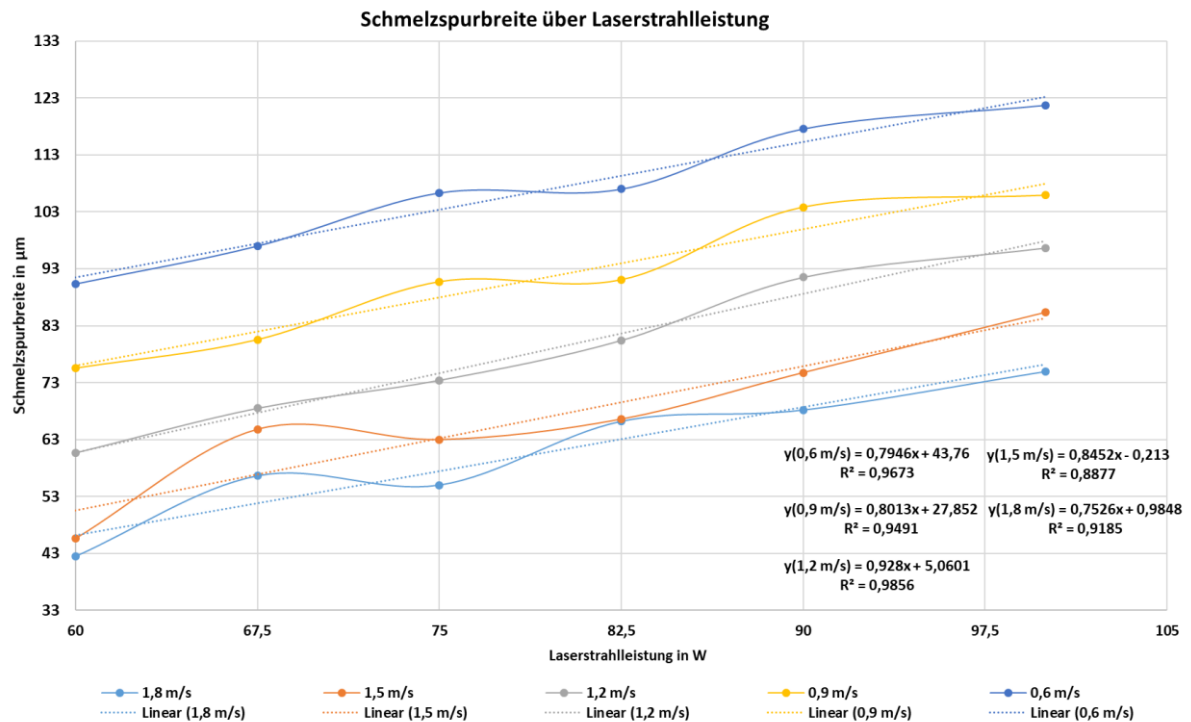


Diagramm 21: Schmelzspurbreite auf Laserstrahlleistung

Die Schmelzspurbreite nimmt mit steigender Laserstrahlleistung zu, was sich durch die erhöhte Energieeinbringung und der damit einhergehenden Schmelzbadvergrößerung erklären lässt. Damit trifft die Vorhersage über den Einfluss der Streckenenergie auf die Schmelzspurbreite im untersuchten Prozessfenster zu. Zur weiteren Absicherung der Ergebnisse wurden T-Test-Hypothesenanalysen durchgeführt, welche die aus den Diagrammen abgelesenen Schlussfolgerungen stützen. Die vollständigen Versuchsergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

#### Vorhersage weiterer Schmelzspurbreiten

Um die Vorhersage von Schmelzspurbreiten auch außerhalb der getesteten Parameter treffen zu können, werden die Gleichungen der in den Diagrammen eingeführten Trendlinien herangezogen.

Im allgemeinen Fall kann die folgende, auf der Logarithmusgleichung aus Diagramm 19 basierende, Gleichung genutzt werden.

$$S_B = 46,5 \ln\left[\frac{P_{LS}}{v_s}\right] - 116,65 \quad (5.1)$$

Es ist jedoch empfehlenswert nach Möglichkeit die Geradengleichungen der Diagramm 20 und Diagramm 21, aufgrund der besseren Bestimmtheitsmaße, zu verwenden. Dazu wurden die



relevanten Gleichungen in einem Excel-Sheet hinterlegt, um bei weiteren Versuchen einfacher genutzt zu werden.

### Dominierender Parameter

Zur Bestimmung der Einflussstärke wurden die absoluten Werte der Scangeschwindigkeit und Laserstrahlstärke in relative Werte umgewandelt. Dabei hat der höchste getestete Einstellwert jeweils die 100 % festgelegt, weshalb nur eine Aussage über das untersuchte Prozessfenster gemacht werden kann.

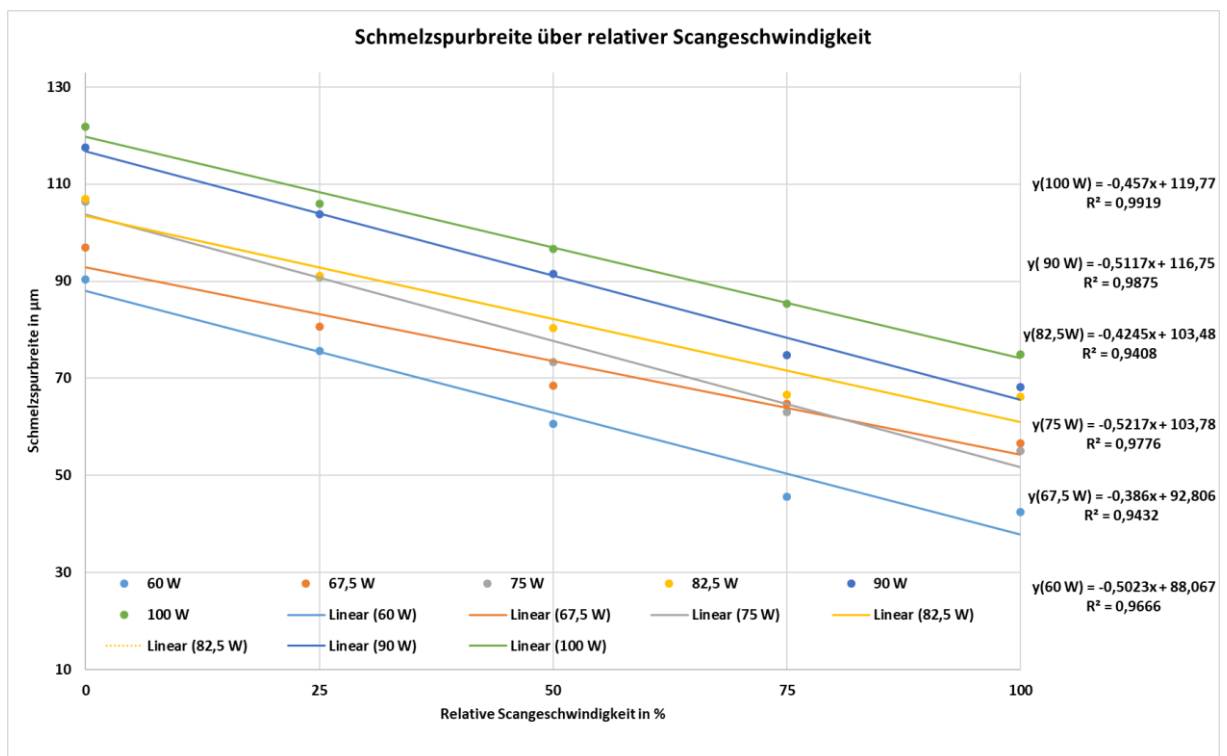


Diagramm 22: Schmelzspurbreite über die relative Scangeschwindigkeit aufgetragen mit den jeweiligen Trendliniengleichungen

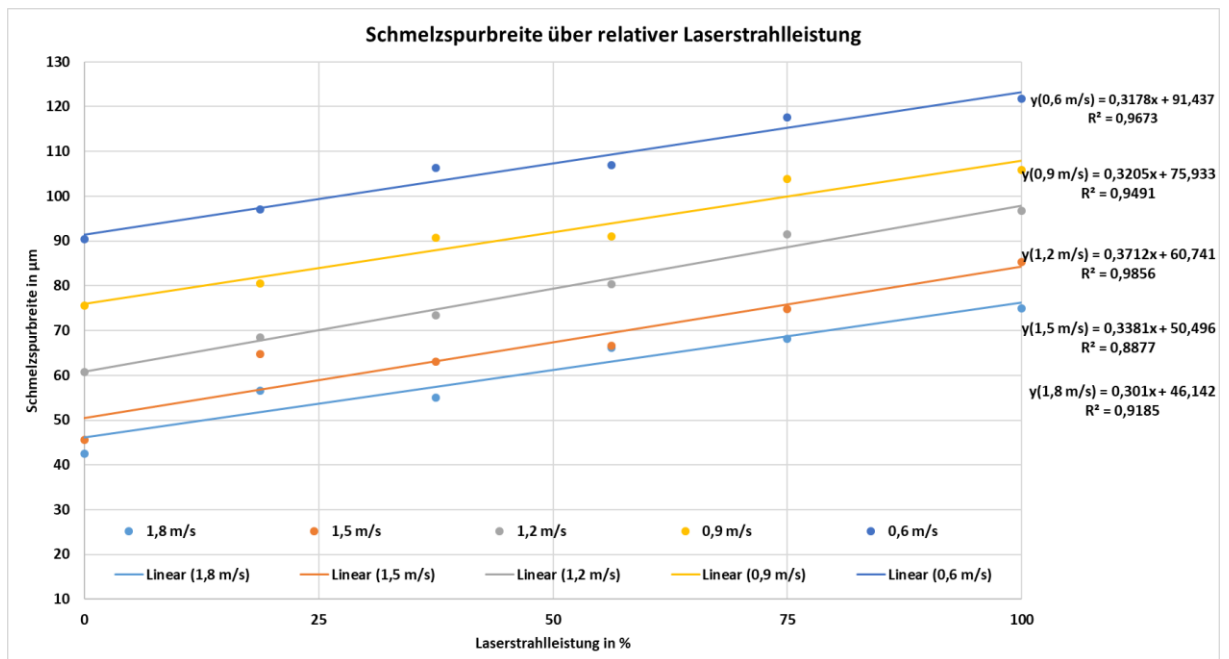


Diagramm 23: Schmelzspurbreite über die relative Laserstrahlleistung aufgetragen mit den jeweiligen Trendliniengleichungen

Das Diagramm 22 und Diagramm 23 zeigt die Trendlinien mit den zugehörigen Geradengleichungen der relativen Scangeschwindigkeit und relativen Laserstrahlleistung. Um einen etwaigen dominierenden Parameter zu ermitteln, werden die Geradensteigungen der beiden Diagramme in Tabelle 23 verglichen. Dazu wurden die Mittelwerte eines Diagramms ermittelt und verglichen. Dabei konnte die Scangeschwindigkeit als dominierende Stellgröße, mit einem 1,42fachen Einfluss, innerhalb des untersuchten Prozessfensters ermittelt werden.

Tabelle 23: Auswertung der ermittelten Trendliniengleichungen und ihr Verhältnis zueinander

Geradensteigung	Steigung 1	Steigung 2	Steigung 3	Steigung 4	Steigung 5	Steigung 6	Mittelwert	Standardabweichung	T.Test
Schmelzspurbreite aufgetragen auf die Scangeschwindigkeit	0,4570	0,5117	0,4245	0,5217	0,3860	0,5023	0,467	0,054	0,0007
Schmelzspurbreite aufgetragen auf die Laserstrahlleistung	0,3178	0,3205	0,3712	0,3381	0,3010	-	0,330	0,027	

$$\frac{\text{Schmelzspurbreite aufgetragen auf die Scangeschwindigkeit}}{\text{Schmelzspurbreite aufgetragen auf die Laserstrahlleistung}} = \frac{0,467}{0,330} = \underline{\underline{1,42}}$$

### 5.4.3 Zusammenfassung

Der Versuch konnte die Korrelation zwischen der Streckenenergie und der Schmelzspurbreite nachweisen. Insbesondere konnten die Einflüsse der Laserstrahlleistung und der

Scangeschwindigkeit auf die Spurbreite und damit auch auf die Größe des entstehenden Schmelzbades aufgezeigt werden.

Innerhalb des untersuchten Prozessfensters wurde die Scangeschwindigkeit als dominierender Parameter identifiziert, was die Einordnung der Versuchsergebnisse erleichtert.

Darüber hinaus wurde ein Excel-Sheet zur Berechnung von Spurbreiten, auf Basis der Versuchsergebnisse erstellt, um diese für weitere Parametersätze vorhersagen zu können.

## 5.5 Versuch zur Gefügedichte

Für die Auslegung eines Parametersatzes ist es notwendig, im Vorhinein eine Aussage über die resultierenden Werkstoffeigenschaften treffen zu können. Zur Untersuchung des Einflusses der Streckenenergie auf die Werkstoffeigenschaften werden Dichtequader mit verschiedenen Parametersätzen gefertigt und auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften und ihr Gefüge untersucht. Zusätzlich werden kritische Strukturen gefertigt, um die Anfälligkeit der Parametersätze für thermisch bedingte Prozessfehler abschätzen zu können.

### 5.5.1 Versuchsauslegung und Durchführung

Bei der Untersuchung der vorhandenen Parametersätze hat sich gezeigt, dass die auslesbaren „cusing-Parametersätze“ eine unzureichende Dichte aufweisen. Deshalb werden Laserstrahlleistung und Scangeschwindigkeit des Parametersatzes mit dem höchsten Energieeintrag (CL20\_cusing\_V2-1) als Ausgangspunkt gewählt.

Die Auslegung der Testparametersätze erfolgt wie in Abb. 56 veranschaulicht. Ausgehend von dem erwähnten Parametersatz (hier mit V2-1 abgekürzt) werden die Testparametersätze P01 bis P10 erstellt, in dem die Scangeschwindigkeit, schrittweise reduziert wird, wodurch der Energieeintrag steigt. Zur Erstellung der Testparametersätze P11 bis P20 werden die gewählten Scangeschwindigkeiten beibehalten und die Laserstrahlleistung auf 100 W erhöht.

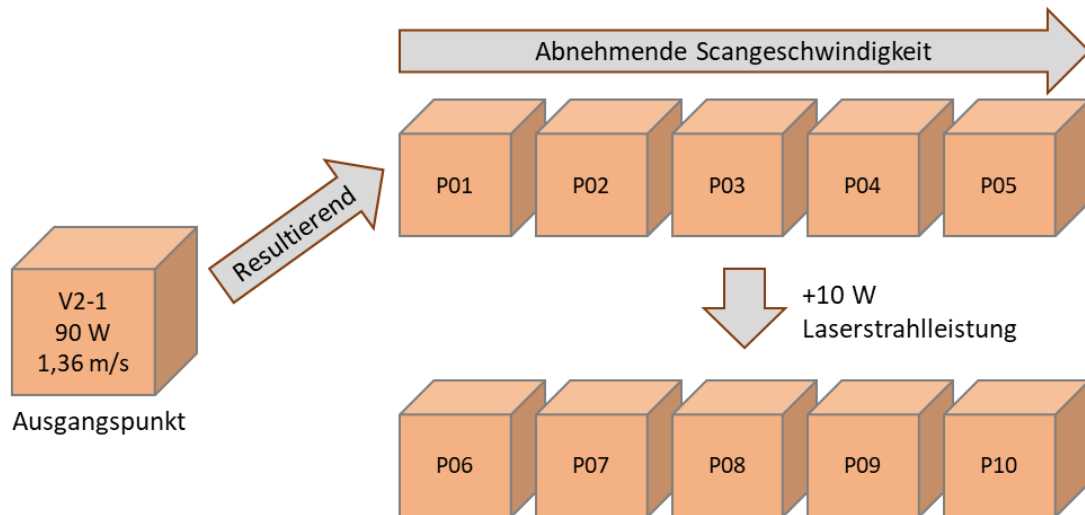


Abb. 56: Auslegung der Testparametersätze

Der Spurbstand wurden für die jeweiligen Schmelzspurbreiten durch die im Versuch zur Spurbreite ermittelten Gleichungen berechnet und der Abstandsfaktor unverändert beibehalten.

Die erstellten Testparameter sind der Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 24: Übersicht der erstellten Testparameter

Testparameter	Leiserstrahlleistung in W	Scangeschwindigkeit in m/s	Streckenenergie in J/m	Erwartete Schmelzspurbreite in mm
P01	90	1,215	74	0,091
P02	90	1,094	82	0,096
P03	90	0,984	91	0,100
P04	90	0,886	102	0,105
P05	90	0,800	113	0,108
P06	90	0,720	125	0,112
P07	90	0,648	139	0,115
P08	90	0,583	154	0,117
P09	90	0,467	193	0,122
P10	90	0,420	214	0,124
P11	100	1,215	82	0,096
P12	100	1,094	91	0,101
P13	100	0,984	102	0,105
P14	100	0,886	113	0,109
P15	100	0,800	125	0,112
P16	100	0,720	139	0,115
P17	100	0,648	154	0,118
P18	100	0,583	172	0,120
P19	100	0,467	214	0,125
P20	100	0,420	238	0,127

Für die jeweiligen Testparametersätze sollen Gefügedichte, Härte und die Anfälligkeit für thermisch bedingte Aufbaufehler untersucht werden. Darüber können dann Rückschlüsse auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften gezogen werden.

Bei dem Versuch werden Dichtequader als Probekörper eingesetzt. Da diese aber geometrisch bedingt unanfällig für Aufbaufehler sind, wird der in Abb. 57 gezeigte Segmentbogen als zusätzlicher Probekörper hinzugefügt. Die einzelnen Segmente reichen in 15°-Schritten von der Vertikalen in die Horizontale. Bedingt durch die Überhänge des Segmentbogens (Vergleiche Kapitel 3.1.1 Gestaltungsrestriktionen), werden thermisch bedingte Schäden am Bauteil erwartet, wodurch ein vollständiger Aufbau verhindert wird. Dabei ermöglichen es die einzelnen Segmente, den Beginn der Prozessstörung und damit die Anfälligkeit für Aufbaufehler abzulesen.

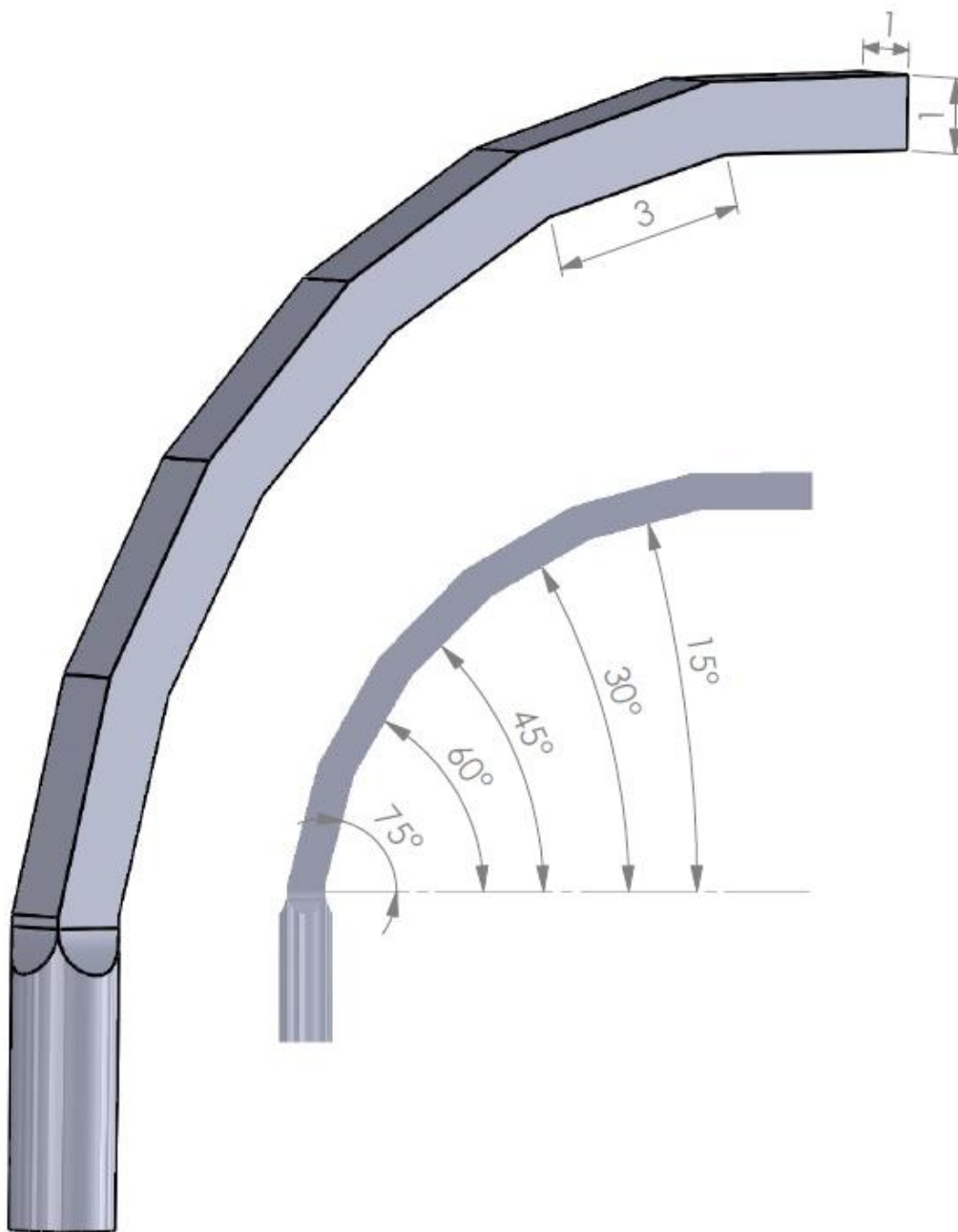


Abb. 57: Testgeometrie zur Untersuchung der Verbrennungsanfälligkeit

### Platzierung auf der Bauplatte

Bei dem Versuch wird mit Prozessstörungen gerechnet. Dabei kann es durch thermisch induzierten Spannungen zum sogenannten „Aufstellen“ einzelner Bauteilsegmente kommen. Aufgrund dessen muss die Platzierung auf der Bauplatte so gewählt werden, dass sich die Prozessfehler einzelner Probekörper nicht auf andere Bereiche auswirken.

Die Bauplatte und die darauf platzierten Probekörper sind in Abb. 58 dargestellt. Die Pulverbeschichtung erfolgt von links durch eine elastische Beschichterklinge. Die kritischen Segmentbögen, befinden sich auf der Überlaufseite und sind nach rechts orientiert, damit die Folgen eines „Hängenbleiben“ der Beschichterklinge gemindert werden. Durch die Platzierung hin zum Überlauf wird sichergestellt, dass sich von den Segmentbögen verursachte Beschichtungsfehler nicht auf andere Probekörper übertragen. Zusätzlich sind die Probekörper so angeordnet, dass sich eine Beschädigung der Beschichterklinge auf Höhe der Segmentbögen nicht auf die Dichtequader auswirkt, was durch die orangefarbene Verlängerung des oberen Bogens sichtbar wird.

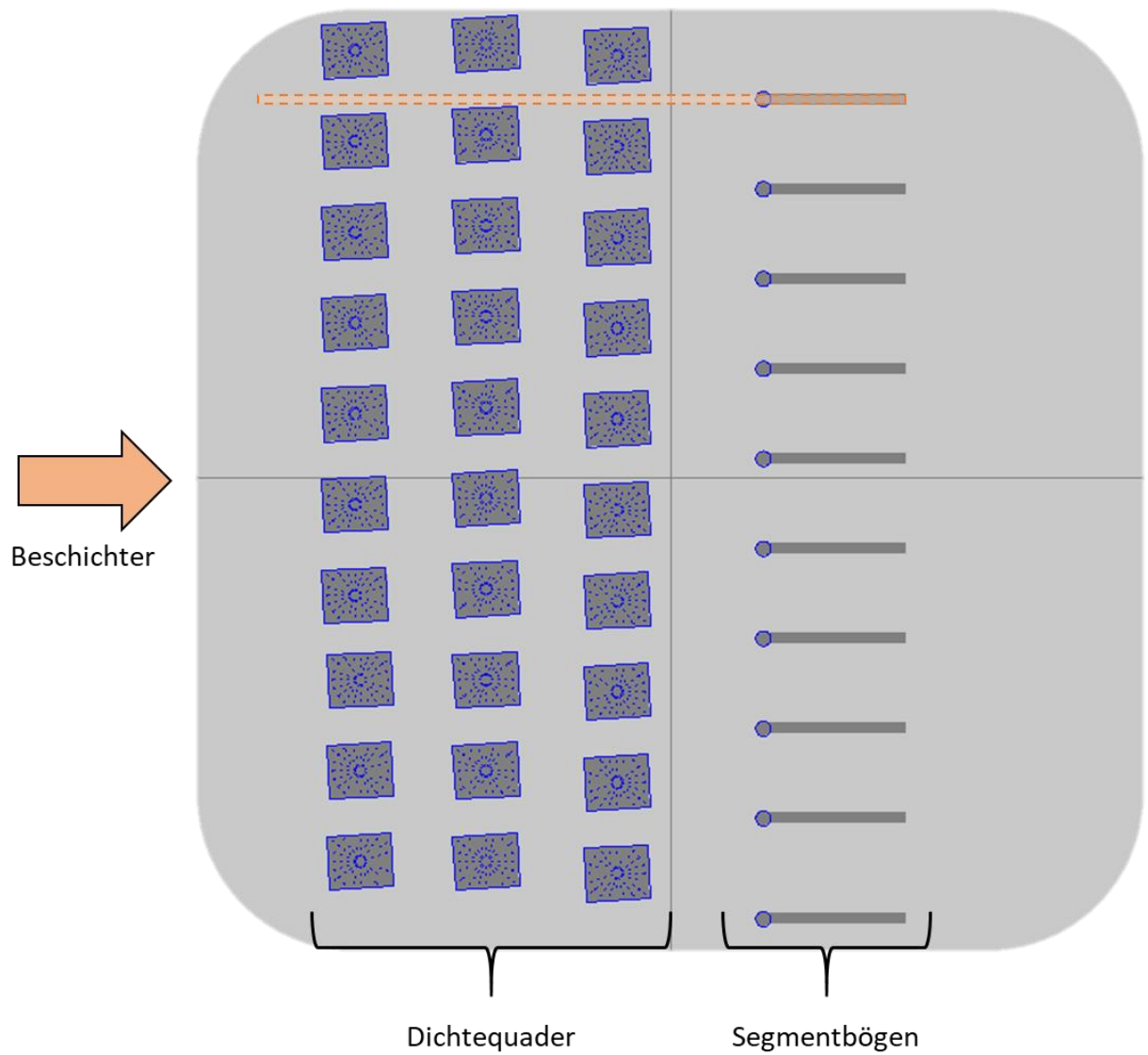


Abb. 58: Positionierung der Probekörper auf der Bauplatte

Die Probekörper wurden in zwei Baujobs gefertigt. Dabei kam es, wie in Abb. 59 zu erkennen, zu den erwartenden Aufbaufehlern an den Segmentbögen, welche im folgenden Kapitel behandelt werden. Darüber hinaus kam es zu keinen weiteren Prozessstörungen.

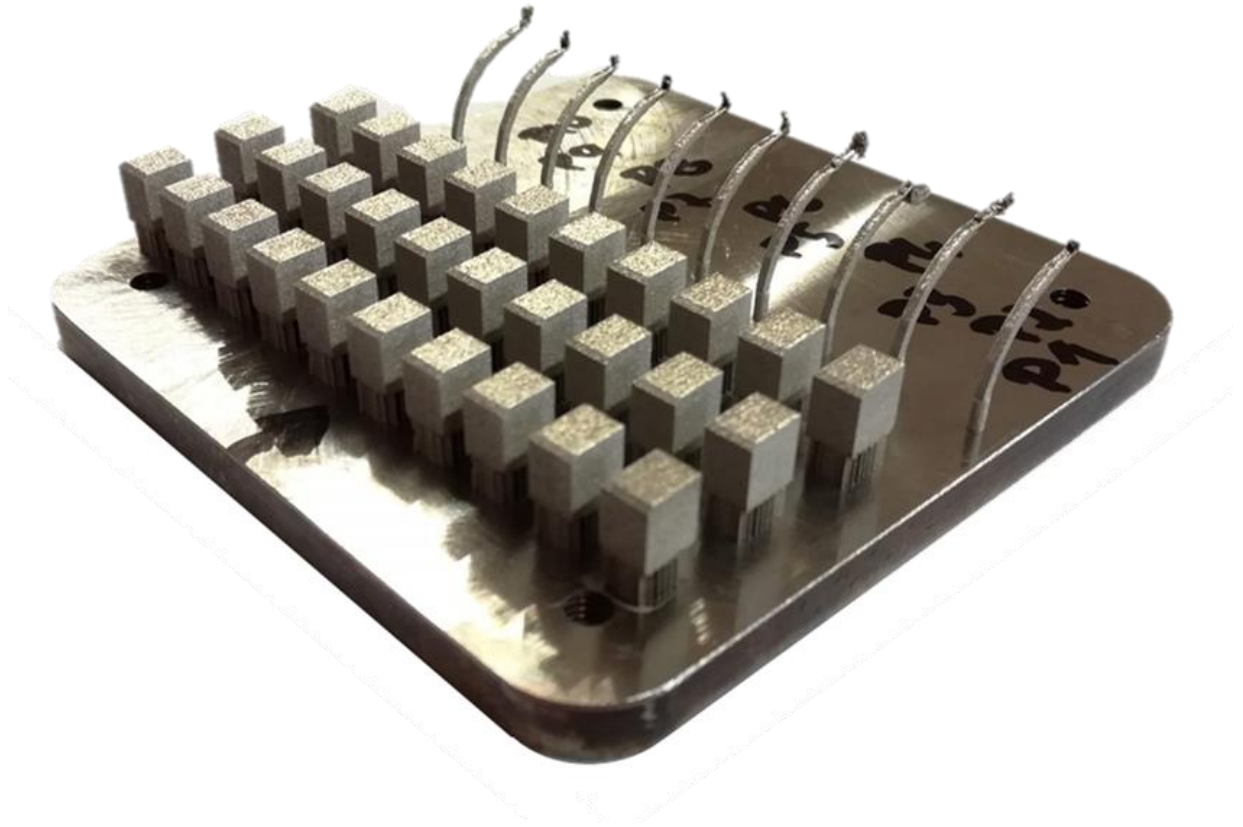


Abb. 59: Bauplatte mit gefertigten Probekörpern

### 5.5.2 Versuchsauswertung

Die an den Segmentbögen aufgetretenen Prozessstörungen sind in Abb. 60 zu erkennen. Die Segmentbögen haben sich aufgestellt und wurden bei jedem Beschichten hinunter gedrückt. Durch das Zurückfedern der Bögen unter der Beschichterklinge, entstehen die Vertiefungen im Pulverbett. Der anschließend einsetzende Laserstrahl belichtet nun ausschließlich bereits aufgeschmolzenes Material, was zu sogenannten „Verbrennungen“ und einem weiteren Aufstellen führt. Der aufgestellte Teil des Segmentbogens erhitzt sich dabei so weit, dass Verbrennungspuren an der Beschichterklinge (Abb. 61) zu sehen sind und es während der Beschichtung zur Rauchentwicklung kam.



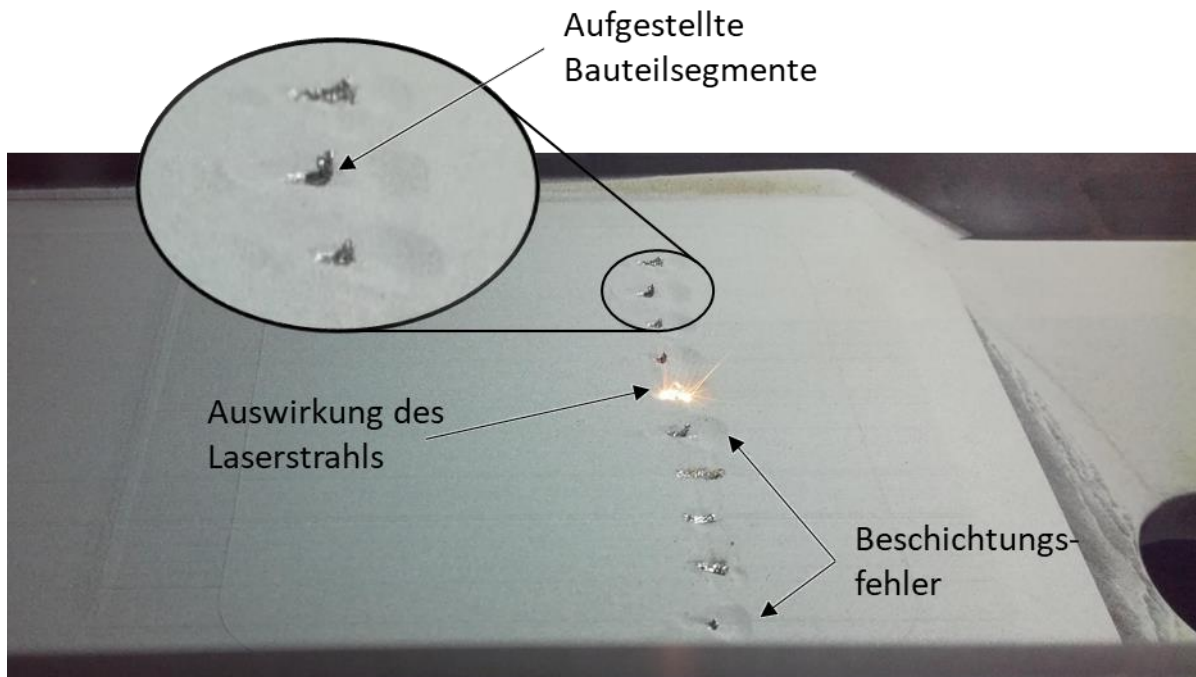


Abb. 60: Bauraum während der Probekörperfertigung

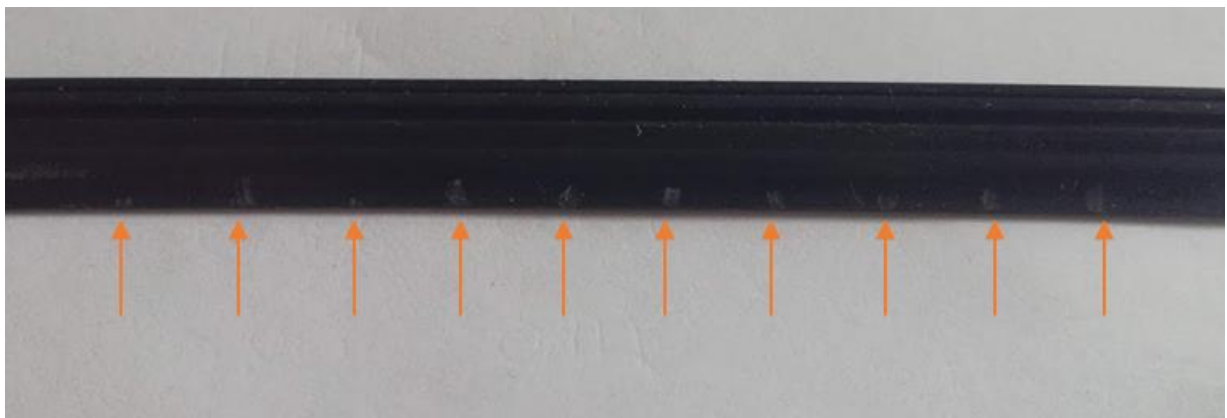


Abb. 61: Eingesetzte Beschickerklinge mit orange markierten Verbrennungen

Abb. 60 deutet darauf hin, dass der Einsatz der elastischen Beschickerklinge einen Prozessabbruch verhindert hat. Die alternative Stahlklinge bei aufgestellten Bauteilen nicht nachgibt, was zum Abbruch von Bauteilen führen kann.

### Theoretische Dichte

Zur Abschätzung der Gefügedichte wurde die theoretische Dichte ermittelt und in Tabelle 25 zusammengefasst. Zur besseren Übersicht sind die Ergebnisse im Diagramm 24 graphisch dargestellt.

Eine optische Ermittlung der Dichte war nicht möglich, da die geringe Porenanzahl nicht durch die Software ausgewertet werden konnte. Aufgrund der unzureichenden Messmittelfähigkeit wird hier nur der theoretische Dichtewert verwendet.

Tabelle 25: Ergebnis der Untersuchung zur theoretischen Dichte

Parameter	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10
Theoretische Dichte	0,9950	1,0030	1,0038	1,0129	1,0158	1,0152	1,0137	1,0171	0,9951	0,9779

Parameter	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
Theoretische Dichte	1,0007	1,0071	1,0096	1,0127	1,0157	1,0116	1,0123	1,0122	0,9966	0,9818

Im Diagramm sind die Kennwerte der 90 Watt Reihe blau und die der 100 Watt Reihe orange dargestellt. Der Energieeintrag nimmt von links nach rechts zu, wobei sich ein parabelförmiger Verlauf der Dichte abzeichnet. Auffallend ist dabei der starke Abfall der Dichte bei den Proben P09/P10 sowie P10/P20 im Säulendiagramm.

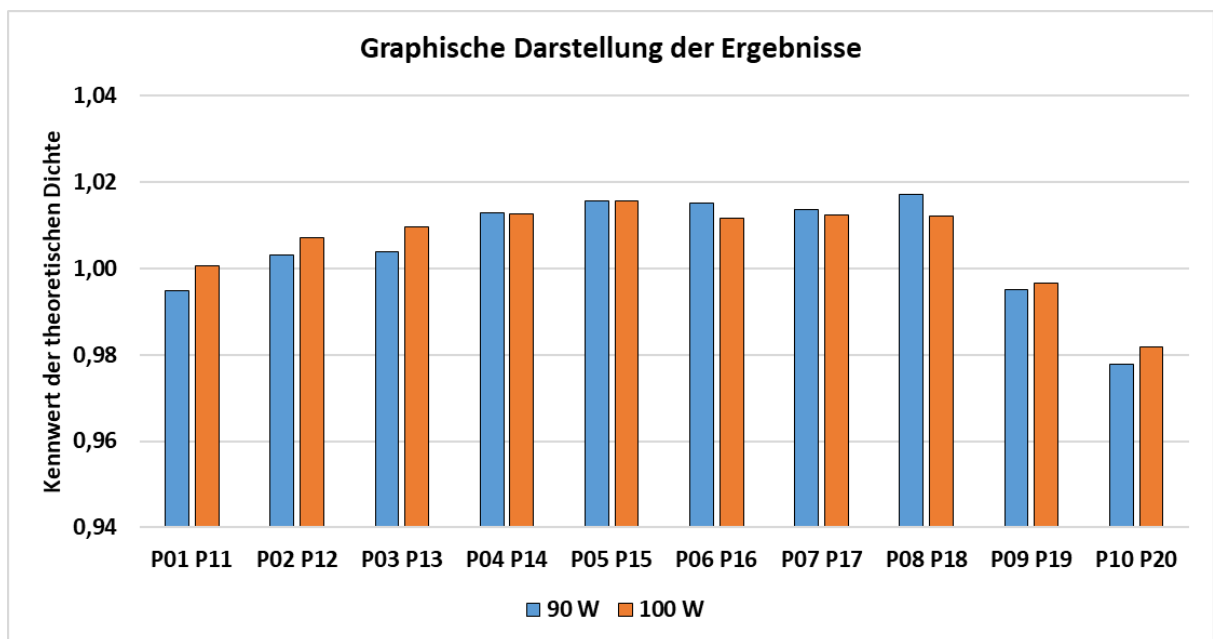


Diagramm 24: Graphische Darstellung der theoretischen Dichte

Zur weiteren Untersuchung des Dichteverlaufs werden die Kennwerte über die Streckenenergie aufgetragen. Dabei zeigt sich auch in Diagramm 25 der parabelförmige Verlauf, mit einem starken Abfall an den Proben P09/P10 sowie P10/P20.

Die ermittelten Werte deuten darauf hin, dass die unterschiedliche Laserstrahlleistung im betrachteten Prozessfenster keinen signifikanten Unterschied bewirkt.

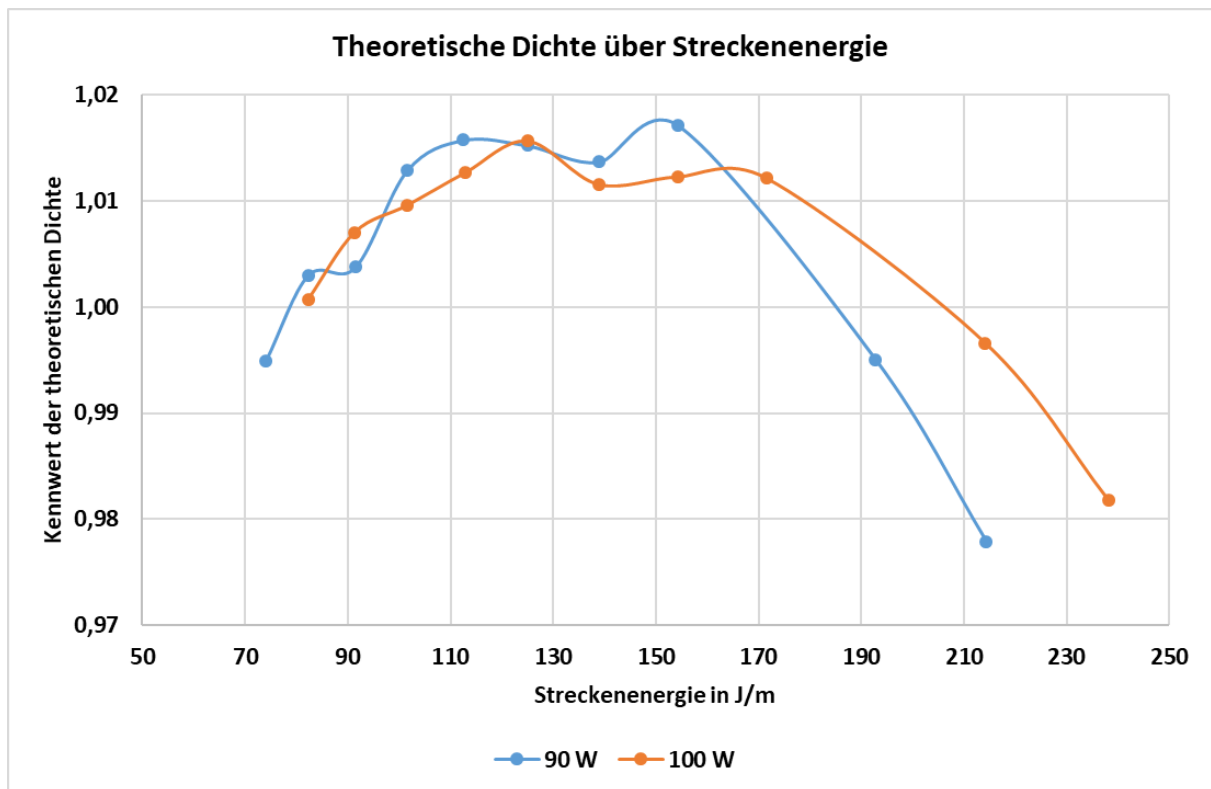


Diagramm 25: Theoretische Dichte über der Streckenenergie aufgetragen

Der Verlauf der Dichte kann durch das Verhalten des Schmelzbades erklärt werden. Wie in Kapitel „3.3.1 Energieeintrag“ und „

2.2.2 Gefügeentwicklung beim Selektiven **Metall-Laserschmelzen**“ beschrieben, führt ein zu niedriger Energieeintrag zu Porenbildung. Diese durch unzureichendes Aufschmelzen des Pulvers entstandenen Poren reduzieren die Dichte. Erreicht das Schmelzbad, bedingt durch einen zu hohen Energieeintrag, die Siedetemperatur kommt es zu Verdampfungen und Spritzern, wodurch das Schmelzbad an Material verliert. In Folge dessen sinkt die Dichte. Dabei deutet die Auswertung darauf hin, dass der Effekt abrupt und mit deutlichem Einfluss auftritt, was das starke Absinken der Dichte auf der rechten Seite erklärt. Das Auftreten des Dichteabfalls scheint aber nicht einzig vom Energieeintrag abzuhängen, da der Graph der 100 W Proben trotz höherem Energieeintrag erst später abfällt. Eine weitere Erklärung für das abrupte Abfallen der Dichte kann in der Messmethode liegen. Da der theoretische Dichtewert über die Masse der gefertigten Dichtequader ermittelt wird, führt die Materialabnahme der Quader durch Spritzer und Verdampfungen zu einer reduzierten theoretischen Dichte. Dabei kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass der Quader lediglich ein geringeres Volumen,

bei einer hohen Gefügedichte aufweist. Bedingt durch die ungleichmäßige Oberfläche der Oberseite der Probekörper konnte keine ausreichend präzise Vermessung zur Klärung durchgeführt werden.

Die Graphen im angeführten Diagramm unterliegen den beschriebenen Effekten. Die Dichte ist zuerst niedrig, da keine ausreichende Pulverbindung stattfindet. Mit steigendem Energieeintrag stabilisiert sich die Dichte, bis es zu einem abrupten Abfall kommt, da Material der Schmelze entzogen wird.

Die präparierten Schliffbilder der Proben sind im Folgenden abgebildet. Die 90 W Proben sind in Abb. 62 und die 100 W Proben in Abb. 63 zu erkennen. Bei Betrachtung zeigt sich, dass die Schliffbilder mit zunehmendem Energieeintrag ungleichmäßiger werden. Dabei reichen die einzelnen Schmelzspuren unterschiedlich weit ineinander. Unter Einbeziehung aller Schliffbilder zeigt sich, dass die Abstände der Schmelzspuren innerhalb eines Testparameters deutliche Unterschiede aufweisen, wodurch eine Abstandsvermessung nicht aussagekräftig ist. Die unregelmäßigen Abstände können durch das erneute Aufschmelzen bedingt durch die überliegenden Schichten entstehen. Darüber hinaus ist der Einfluss von Winkelfehlern bei der Probenpräparation nicht abschätzbar. Es empfehlen sich weitere Untersuchungen um die vermutete Korrelation zwischen Energieeintrag und Schmelzspuraufbau mit den dadurch einhergehenden mechanisch-technologischen Eigenschaften zu untersuchen.

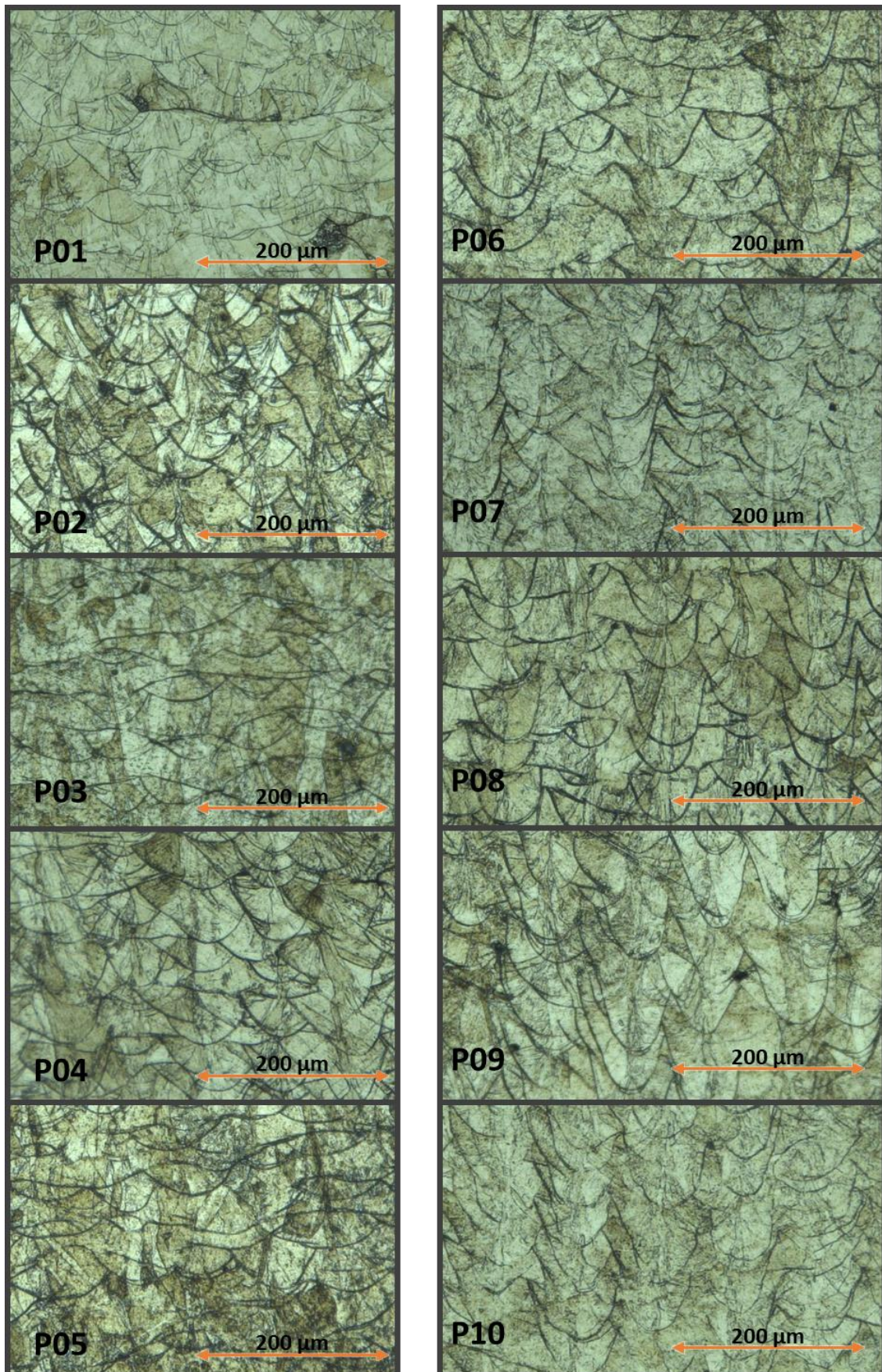


Abb. 62: Metallographisch aufbereitete Schliffbilder der Quaderseite der Testparameter P01 – P10 (300fache Vergrößerung)

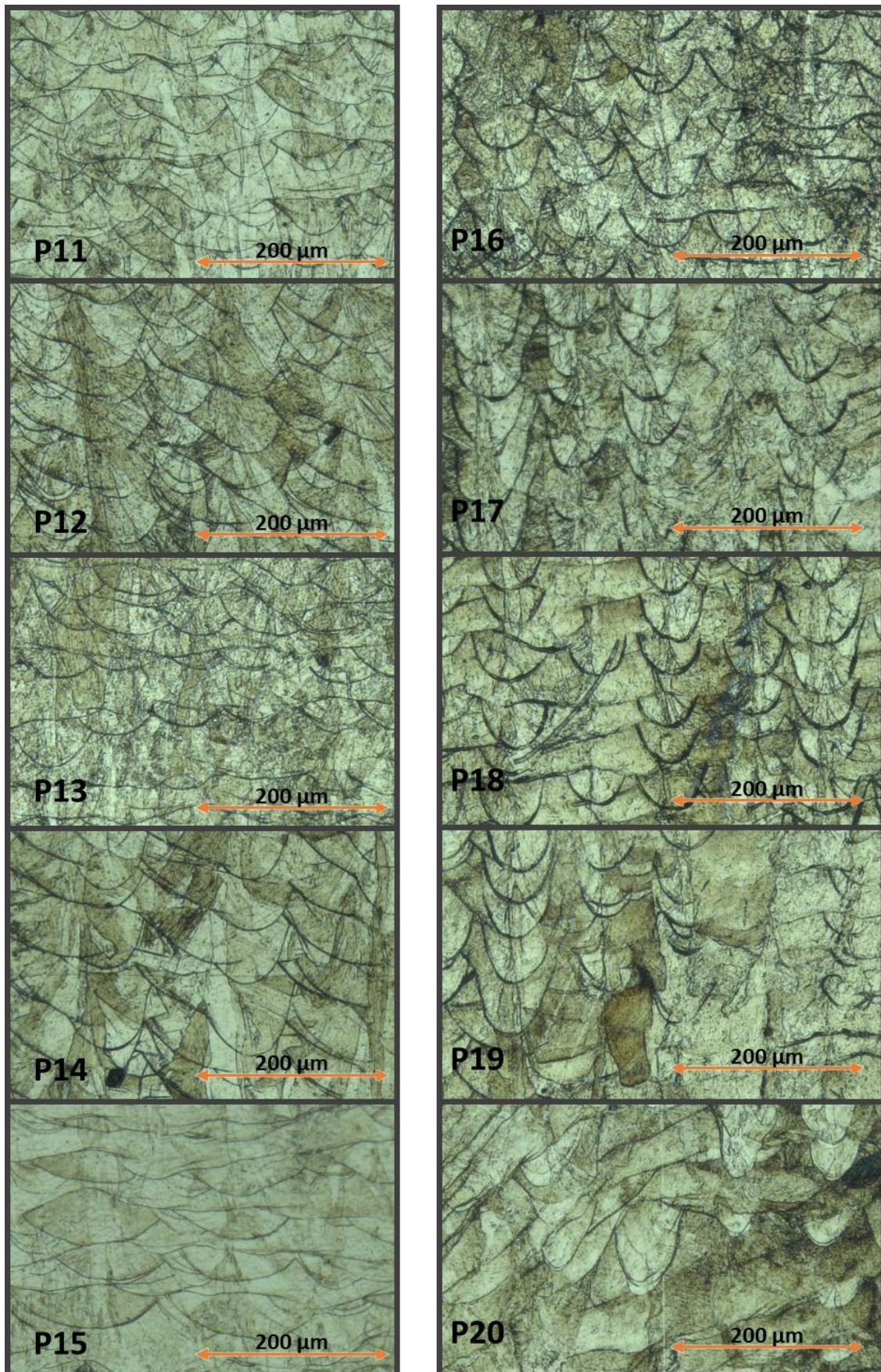


Abb. 63: Metallographisch aufbereitete Schliffbilder der Quaderseite der Testparameter P11 – P20 (300fache Vergrößerung)

## Mechanisch-technologische Eigenschaften

Die gemittelten Vickershärten (HV 30) der Probekörper sind in Tabelle 26 mit ihrer jeweiligen Standardabweichung aufgeführt. Die Ergebnisse sind zur besseren Übersicht in Diagramm 26 graphisch aufgetragen.

Tabelle 26: Zusammenfassung der Härtemessung nach Vickers

Parametersatz		P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10
HV 30	Mittelwert	185	193	199	208	208	216	220	220	220	208
	Stabw	4	12	11	7	4	7	4	3	9	14

Parametersatz		P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
HV 30	Mittelwert	194	195	209	212	209	216	215	216	214	211
	Stabw	4	4	5	4	8	6	2	4	0	8

In der graphischen Darstellung sind die 90 Watt Proben erneut blau und die 100 Watt Proben orange dargestellt. Dabei zeichnet sich für die einzelnen Laserstrahlleistungen ebenfalls ein parabelförmiger Verlauf ab.

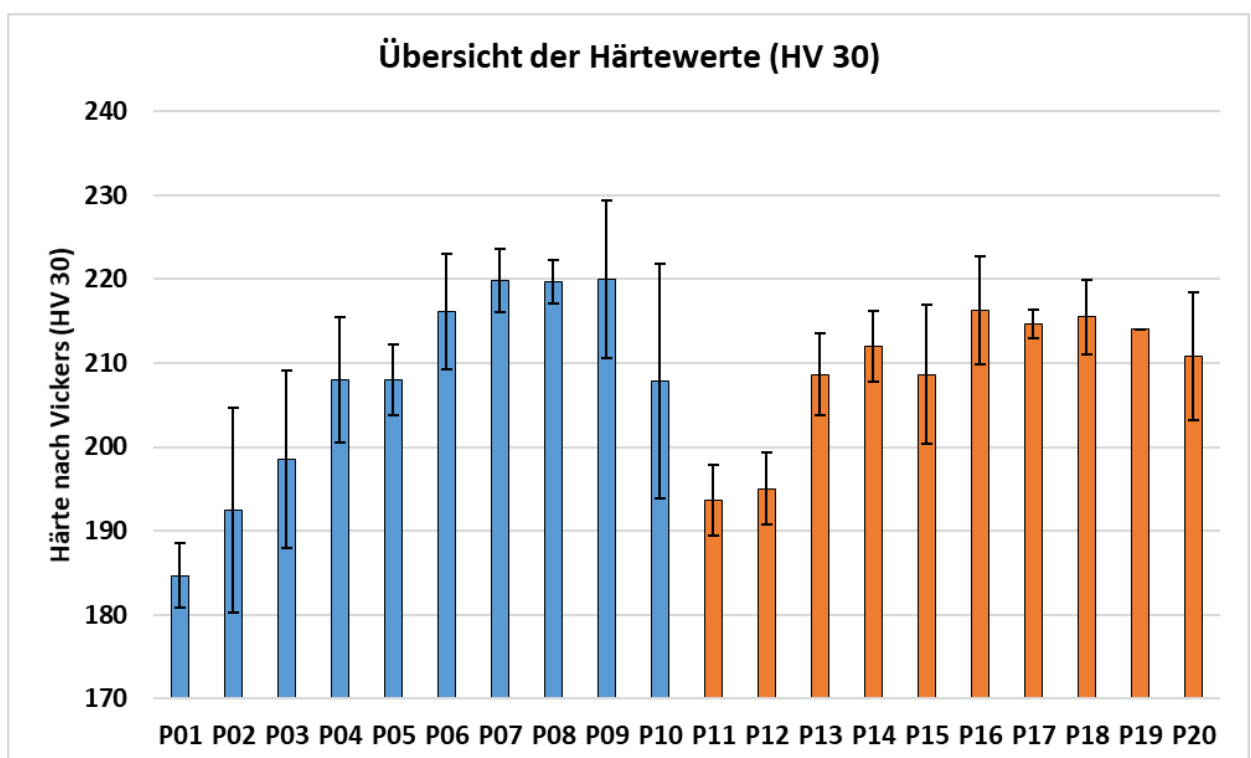


Diagramm 26: Graphische Darstellung der ermittelten Vickershärten mit Standardabweichung

Zur besseren Einordnung der Messwerte, wird die ermittelte Härte zuerst über der Streckenenergie und anschließend über der Scangeschwindigkeit aufgetragen. In den folgenden Diagrammen steht blau immer für die 90 Watt Proben, während orange die 100 Watt Proben wiedergibt.

Die gemittelten Härte­werte sind in Diagramm 27 über der Strecken­energie aufgetragen und als Punkte eingezeichnet. Zur Veranschaulichung wurde eine polynomi­sche Trendlinie eingefügt, wodurch der Verlauf der Härte­werte sichtbar wird.

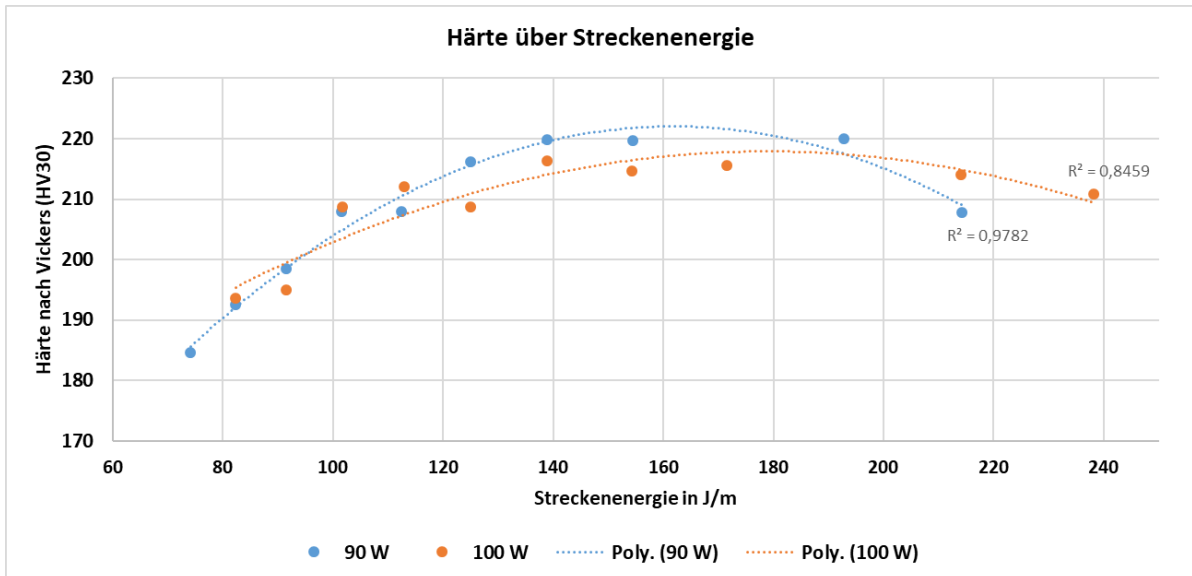


Diagramm 27: Härte­werte über die Strecken­energie aufgetragen

Durchgeführte T.Test Analysen ergaben keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Graphen. Das lässt sich auf den Einfluss der Standardabweichung zurückführen. Um die Signifikantsanalyse graphisch zu betrachten, werden die Streufelder der beiden Proben in Diagramm 28 übereinandergelegt. Die deutlichen Überschneidungen der Flächen, stützt die Ergebnisse des T.Test, wonach kein signifikanter Unterschied besteht.

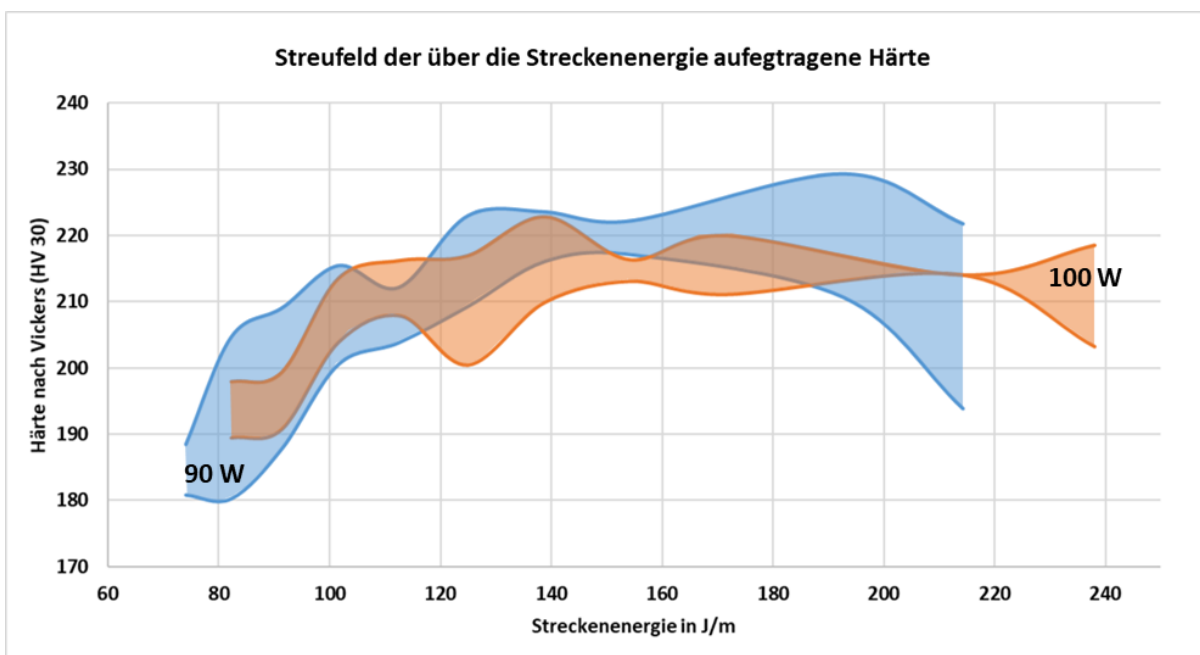


Diagramm 28: Streufelder der über die Strecken­energie aufgetragene Härte



Bei der Betrachtung der Härtewerte im Zusammenhang mit der Scangeschwindigkeit (Diagramm 29) zeigt sich ebenfalls ein parabelförmiger Verlauf. Auch hier konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Laserleistungsklassen ausgemacht werden, wie das Diagramm 30 und durchgeführte T-Test Analysen zeigen.

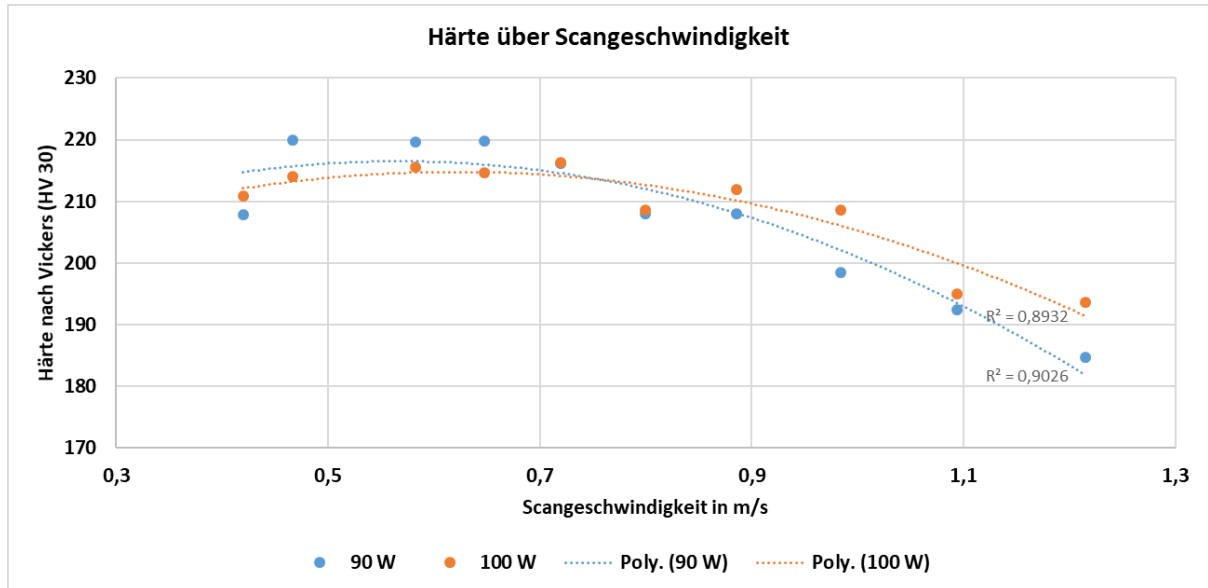


Diagramm 29: Härtewerte über die Scangeschwindigkeit aufgetragen

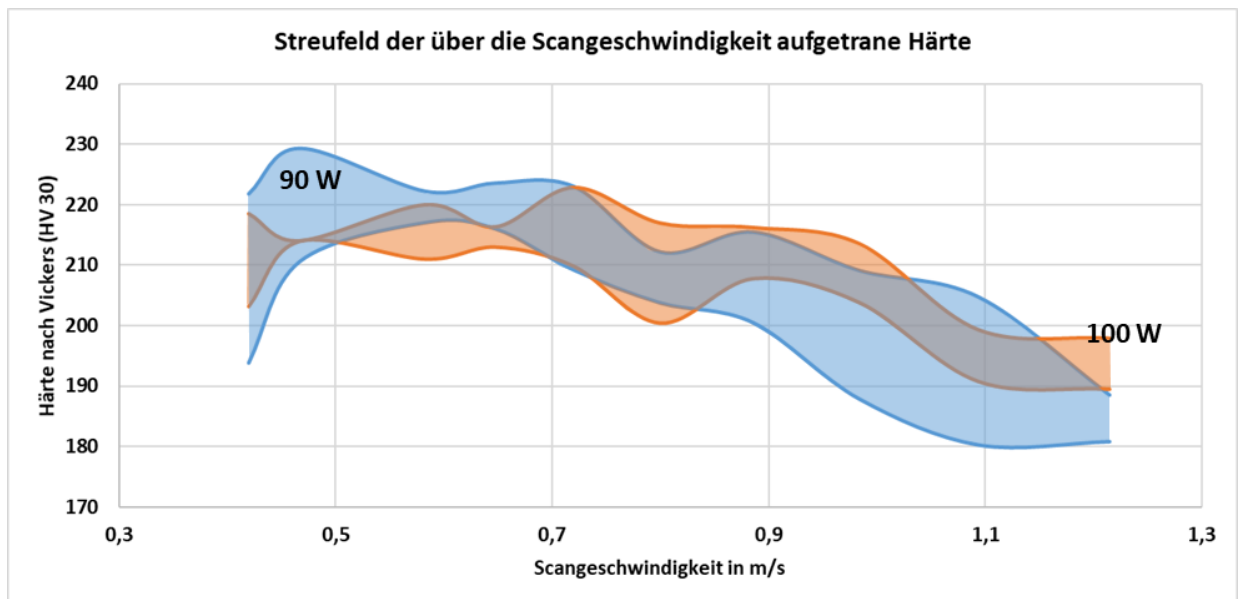


Diagramm 30: Streufelder der über die Scangeschwindigkeit aufgetragene Härte

Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der erreichten Härte und dem Energieeintrag. Dabei konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den 90 W und 100 W Proben festgestellt werden. Der parabelförmige Verlauf der Härtewerte ähnelt dem Verlauf der ermittelten theoretischen Dichte.

### Anfälligkeit für thermische Aufbaufehler

Die Segmentbögen wurden von der Grundplatte getrennt, präpariert und unter dem Lichtmikroskop ausgewertet. Zur besseren Einordnung wurden 30fache Vergrößerungen der Segmentbögen aufgenommen und über die Idealform der Segmentbögen gelegt, um Abweichungen besser erkennen zu können. Die Segmentbögen der 90 W Testparameter (P01 – P10) sind in Abb. 64 und die der 100 W Testparameter (P11 – P20) in Abb. 65 abgebildet. Für einen besseren Kontrast wurde der Hintergrund der Abbildungen eingefärbt. Bei der Präparation des Segmentbogens P09 kam es zu einer Beschädigung, welche die Auswertung jedoch nicht beeinflusst.

Bei der Betrachtung zeigt sich, dass die Segmentbögen bis zum Beginn des 15°-Segments aufgebaut werden konnten. Dabei sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Testparametersätzen auszumachen. Es kommt mit steigendem Energieeintrag zu einer Krümmung der Segmentbögen, welche jedoch nur eine verhältnismäßig geringe Ausprägung aufweist. Zwischen den beiden Laserleistungsklassen lässt sich kein signifikanter Unterschied feststellen.

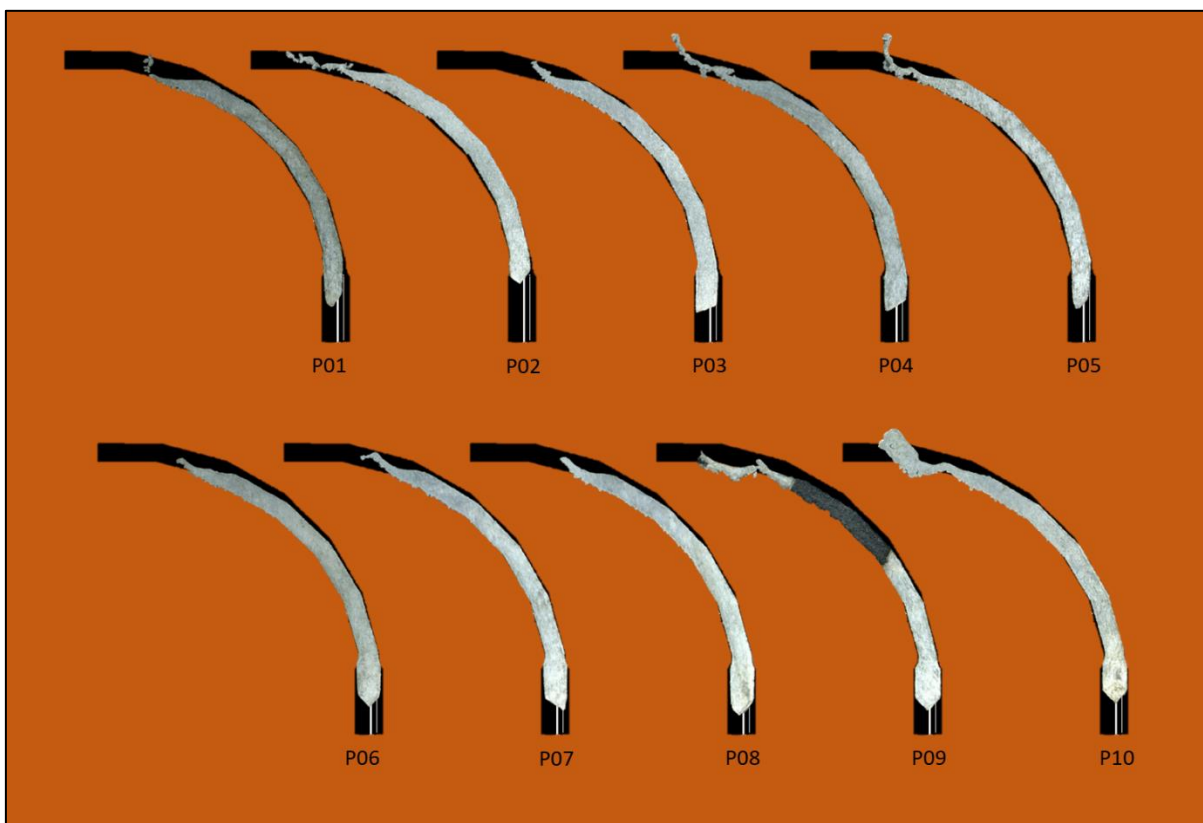


Abb. 64: Segmentbögen der 90 W Testparameter

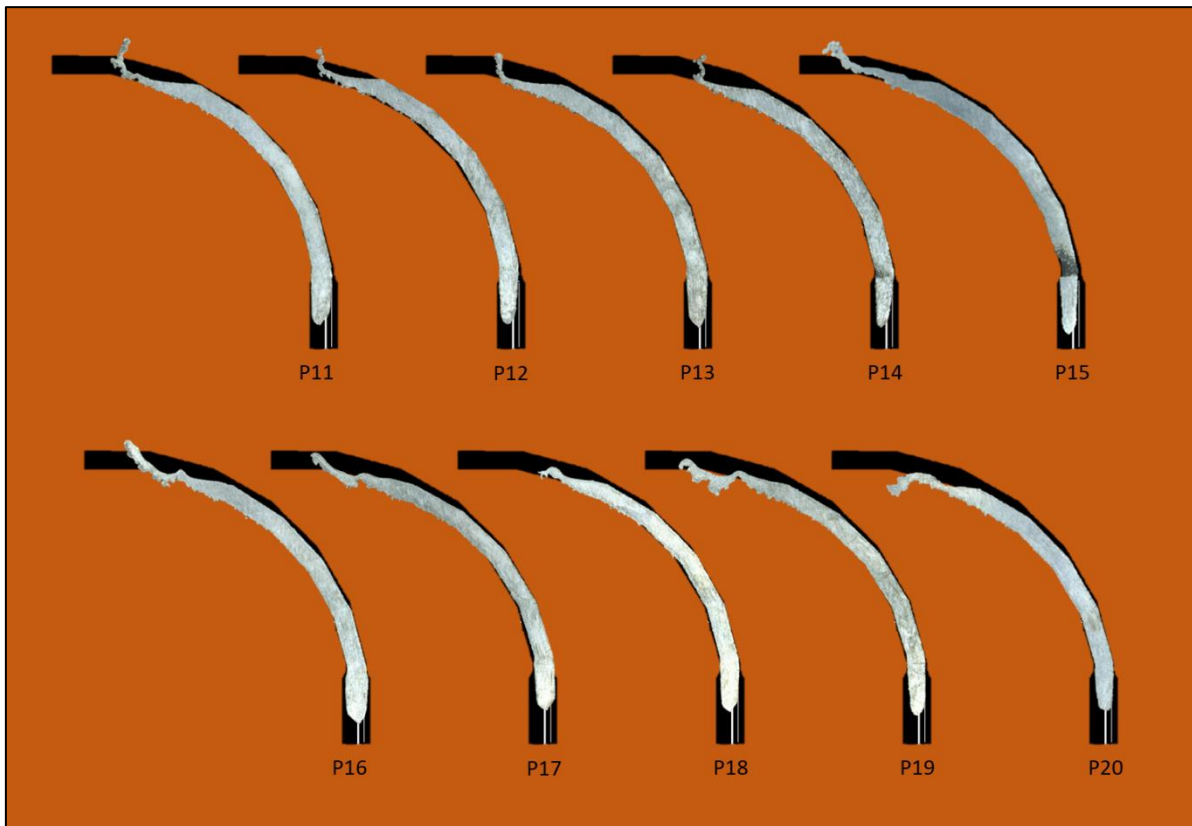


Abb. 65: Segmentbögen der 100 W Testparameter

Der Aufbau über die 45°-Restriktion hinaus und die verhältnismäßig geringe Krümmung kann durch die Abmessungen der Segmentbögen erklärt werden. Aufgrund des kleinen Querschnitts der Segmentbögen von  $1 \text{ mm}^2$ , weisen die Bögen ein relativ kleines Volumen bei verhältnismäßig großer Oberfläche auf. Dadurch kann auch über das Pulverbett, welches bedingt durch seine Struktur nur schlecht Wärme leitet, ausreichend Wärme abgeführt werden. So können geometrische Formen gefertigt werden, die unter Nichtbeachtung der Gestaltungsrestriktionen (Kapitel 3.1.1 Gestaltungsrestriktionen) konstruiert wurden. Es kann angenommen werden, dass der Effekt nur bis zu einem bestimmten Flächen-Volumen-Verhältnis auftritt, da bei einer Erhöhung der Kantenlänge die Oberfläche linear, das Volumen aber exponentiell zunimmt.

### 5.5.3 Zusammenfassung

Der Versuch konnte einen parabelförmigen Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Gefügedichte bestätigen. Es konnte gezeigt werden, dass die Gefügedichte bei zunehmenden Energieeintrag steigt und ab einem gewissen Punkt abrupt abfällt. Dabei scheint sich die

Gefügedichte entscheidend auf die Härte auszuwirken, da diese einen ähnlichen Verlauf wie die Dichte aufweist. Jedoch verläuft der Abfall weniger abrupt, was an der Messmethode zur Dichtermittlung liegen könnte.

Die Auswertung der Segmentbögen zeigt keine signifikanten Unterschiede zur Aufbaufähigkeit der Testparameter. Lediglich ein leichter Verzug konnte bei zunehmenden Energieeintrag festgestellt werden. Dieser kann auf thermisch induzierte Eigenspannungen zurückgeführt werden. Die Segmentbögen konnten bis zum Beginn des 15°-Segment aufgebaut werden, was die Richtwerte der Gestaltungsrestriktion deutlich überschreitet. Der geringe Verzug und das späte Einsetzen von thermisch bedingten Aufbaufehlern kann durch das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen der Testgeometrien erklärt werden. Da die Oberfläche der Bögen bei steigendem Querschnitt linear zunimmt, während das Volumen exponentiell ansteigt, kann die Prozesswärme bei kleinen Bauteilen besser über die Außenfläche abgegeben werden. Diese Wärmeabfuhr über die Außenfläche scheint, trotz der schlechten Wärmeleitfähigkeit des losen Pulvers auszureichen um kritische Strukturen aufzubauen. Durch diesen Effekt konnten dünne Strukturen mit einer hohen Härte, was auf eine hohe Festigkeit schließen lässt, trotz ungünstiger Geometrie aufgebaut werden. Diese Erkenntnis stützt die Empfehlungen wenige massive Geometrien in der Bauteilkonstruktion durch mehrere filigranere Strukturen zu ersetzen.

## 6. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die durchgeführten Versuche und die daraus resultierten Erkenntnisse zusammengefasst. Darauf folgt ein Ausblick auf mögliche weitere Versuche und Anpassungen des Fertigungsprozesses.

### 6.1 Zusammenfassung

In der wissenschaftlichen Arbeit wurden die Haupteinflussgrößen auf die Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften beim Selektiven Metall-Laserschmelzen identifiziert. Im Rahmen dessen konnte auch der Parametersatzaufbau für die genutzte SLM-Maschine „Mlab cusing R“ aufgeschlüsselt werden sowie die im Lieferumfang vorhandenen Parametersätze untersucht werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde eine zunehmende Versprödung der gefertigten Bauteile festgestellt, welche auf eine Alterung des Ausgangsmaterials hindeutet.

Bei der Untersuchung des CL20-performance Parametersatzes zeigte sich ein dichtes Gefüge, jedoch traten thermisch bedingte Aufbaufehler an den Proben auf. Während sich beim CL20-cusing\_V2 ein fehlerfreier Aufbau zeigte, entstand jedoch ein Gefüge mit deutlich geringerer Dichte. Zusätzlich wurden zwei weitere Parametersätze untersucht. Zum einen der CL20\_cusing\_V1 welcher aus einem Softwarefehler resultierte wodurch der Schmelzspurabstand deutlich erhöht ist und eine poröse Struktur zur Folge hatte. Zum anderem wurde ein Parametersatz erstellt und getestet um den Einfluss des Energieeintrages zu untersuchen. Bei der Untersuchung der Parametersätze konnten ausschließlich Übermaße mit geringer Standardabweichung für die SLM-Bauteile ermittelt werden, was auf eine hohe Genauigkeit im Fertigungsprozess hindeutet. Dabei konnte jedoch keine Aussage zur Korrelation zwischen einzelnen Parametern und der Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit getroffen werden. Die ermittelten mechanisch-technologischen Werte deuten auf eine Korrelation mit der Dichte hin.

Eine Untersuchung des Ausgangsmaterials, in der auch ein Vergleich zwischen neuem und aufbereitetem 1.4404 Pulver durchgeführt wurde, konnte die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials hinsichtlich des Chrom-, Nickel- und Mangangehalts bestätigen. Für die übrigen Legierungszusätze erwies sich die eingesetzte REM-EDX Untersuchungsmethode als unzureichend. Hinsichtlich der Kornfraktion konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Pulverarten festgestellt werden. Beide Pulver weisen eine durchschnittliche Körnung von 30 µm auf. Bei der lichtmikroskopischen Betrachtung der Pulver wurden am

aufbereiteten Material Hinweise auf oxidativ umgesetzten Sauerstoff entdeckt, wodurch der Verdacht des alternden Pulvers gestützt wird.

Im Rahmen experimenteller versuch konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag und der Schmelzspurbreite festgestellt werden. Bedingt durch diese Korrelation konnte ein Excel-Sheet zur Berechnung von Spurbreiten erstellt werden, was eine zukünftige Parametrisierung erleichtert. Darüber hinaus konnte ein proportionaler Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag und der Schmelzspurbreite, sowie ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen der Scangeschwindigkeit und der Schmelzspurbreite nachgewiesen werden. Woraus resultiert, dass die Schmelzspurbreite direkt von der Streckenenergie abhängt.

Des Weiteren konnte experimentell die Korrelation zwischen der Gefügedichte, der Härte und dem Energieeintrag aufgezeigt werden. Dabei ist es nicht gelungen eine Aussage zur Korrelation zwischen dem Energieeintrag und dem Auftreten von thermisch bedingten Aufbaufehlern zu treffen. Dafür konnte jedoch nachgewiesen werden, dass feine Strukturen mit geringem Querschnitt und hoher Härte auch bei kritischer Geometrie aufgebaut werden können.

Es konnte bei allen Versuchen ein direkter Zusammenhang zwischen der Gefügedichte und den mechanisch-technologischen Eigenschaften beobachtet werden.

Damit konnte der Versuchsplan, so weit wie erwartet umgesetzt werden.

## 6.2 Fazit

In der Arbeit ist es gelungen den Energieeintrag sowie seine einzelnen Parameter und die Gefügedichte in Korrelation zueinander zu setzen. Darüber hinaus konnte die Auswirkung der Dichte auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften aufgezeigt werden. Jedoch gelang es nicht die Parametereinflüsse auf die Oberflächenrauigkeit und Maßhaltigkeit zu nachzuweisen.

Bedingt durch die Erkenntnisse der wissenschaftlichen Arbeit können in Zukunft Parametersätze präziser und gezielter ausgelegt werden. Dies wird zusätzlich durch die Aufschlüsselung des Parametersatzaufbaues und dem erstellten Excel-Sheet zur Spurbreitenberechnung ermöglicht.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Grund für die zunehmende Versprödung der Bauteile nicht identifiziert werden. Durch das zeitliche Auftreten der Versprödung und dem Auffinden oxidativ umgesetzten Sauerstoffes an dem aufbereiteten Pulver kann die Versprödung auf eindiffundierten Sauerstoff und Wasserstoff zurückgeführt werden.

### 6.3 Ausblick

Bei der Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen sind neben den Erkenntnissen auch weitere Fragen sowie Anregungen für Versuche und Prozessanpassungen aufgekommen. Diese sind im Folgenden aufgeführt:

1. Messung des Sauerstoff- und Wasserstoffgehalts bei gefertigten Proben, um die Ursache für die Versprödungen zu untersuchen. Dabei sollten Vergleiche zwischen neuem und aufbereitetem Pulver erfolgen. Zusätzlich könnten die Lagerungsbedingungen des Ausgangsmaterials erfasst, beobachtet und gegebenenfalls angepasst werden.
2. Für ein besseres Prozessverständnis könnte eine Überwachung des SLM-Prozesses eingeführt werden. Dabei sollte der Bauraum optisch überwacht werden, um während des Prozesses auftretende Fehler und Effekte zu lokalisieren und auswerten zu können. Darüber hinaus ist die Überwachung der Umweltbedingungen denkbar, um eventuelle Einflüsse der Luftfeuchtigkeit aufspüren zu können.
3. Da es bei den durchgeführten Zugversuchen zu Unregelmäßigkeiten durch die Probenaufnahme der Zugmaschine kam, könnten für zukünftige Untersuchungen Rundproben gefertigt werden. Dabei würden endkonturnahe Zugproben additiv hergestellt und spanend weiterbearbeitet werden. Dadurch können auch Oberflächenabhängige Einflüsse verhindert werden.
4. Für ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Gefügebau und mechanisch-technologischen Eigenschaften sollte zum einen ein Versuch zur „sichtbarmachung“ einzelner Schichten durchgeführt werden. Zum anderen könnte der Einfluss des Winkelfehlers bei der Probenpräparation untersucht werden.

Zum vermessen einzelner nicht überlagerter Schmelzspuren könnten kleine Probekörper gefertigt werden. Dabei werden die Schichten ohne Wechselbelichtung generiert. Erst die letzte Schicht wird um 90° gedreht

aufgetragen. Diese Probekörper werden eingebettet und präpariert. Dabei sollten Proben wie in Abb. 66 entstehen. Die oberste Schicht kann dann mit den unbeeinflussten Schmelzspuren am Lichtmikroskop untersucht und vermessen werden.

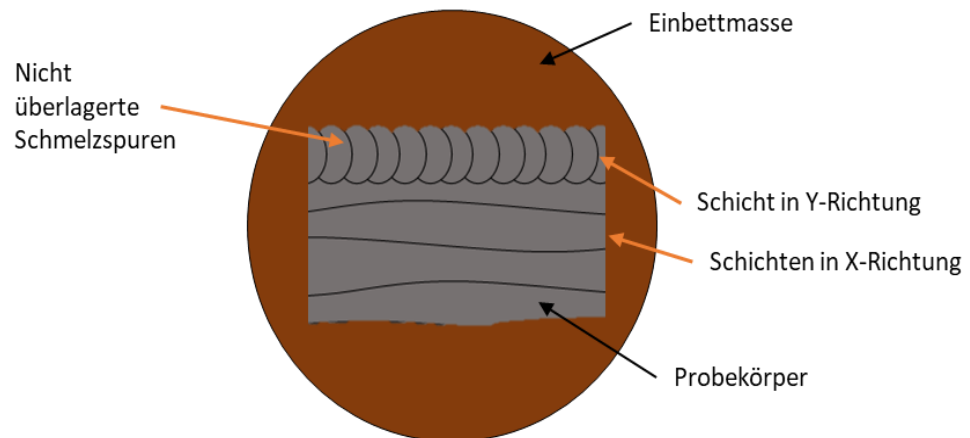


Abb. 66: Probekörper zur Vermessung einzelner Schichten und Schmelzspuren

Um den Einfluss des Winkelversatzes bei der Präparation zu untersuchen, können identischen Probekörper wie in Abb. 67 gekippt eingebettet und präpariert werden.

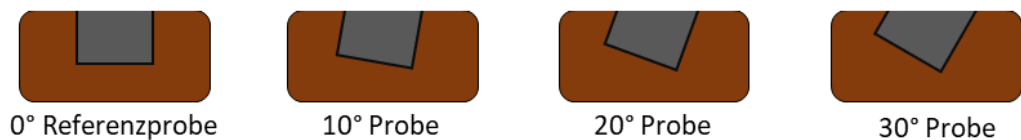


Abb. 67: Beispiel zum Versuch der Einflusses von Winkel Fehlern bei der Probenpräparation

Durch die Auswertung kann die Auswirkung von Winkel Fehlern bei der Probenpräparation abgeschätzt werden, wodurch ein besseres Verständnis des Gefügeaufbaus resultieren könnte.



## Literaturverzeichnis

1. **Gebhardt, Andreas.** *Additive Fertigungsverfahren.* München : Hanser, 2016. 978-3-446-44401-0.
2. **Lachmayer, Roland, Lippert, Rene Bastian und Fahlbusch, Thomas.** *3D-Druck beleuchtet.* Heidelberg : Springer Vieweg, 2016. 978-3-662-49055-6.
3. **Heckner, Heiko und Wirth, Marco.** *Vergleich von Dateiformaten für 3D-Modelle.* Würzburg : Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Systementwicklung der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2014.
4. **Zeyn, Helmut.** *Industrialisierung der Additiven Fertigung.* Berlin; Wien; Zürich : Beuth Verlag GmbH, 2017. 978-3-410-26919-9 .
5. **Faidel , D.** Untersuchung der Bauteileigenschaften aus X2 CrNiMo 17-13-2 beim SLM-Kleinserienprozess. [Buchverf.] D. Faidel, et al. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung, DVS-Studentenkongress, Fügen von faserverstärkten Kunststoffen, Anwendungsnahe Schweißsimulation, Vorträge der Veranstaltungen im Rahmen von DVS Congress und DVS.* Düsseldorf : DVS Media, 2015.
6. **Klahn, C.** *Laseradditiv gefertigte, luftdurchlässige Mesostrukturen.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2015. 9783662477601.
7. **Zeugner, Thomas.** *Materarbeit im Fach Physik - Thermografische Charakterisierung eines Laserstrahlschmelzprozesses bei Metallwerkstoffen.* Augsburg : Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 2017.
8. **DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT).** *DIN EN ISO 52911-1\_Additive Fertigung-Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion.* Berlin : Beuth Verlag, 12-2017. DIN EN ISO 52911-1.
9. **Zhang, Baicheng, Dembinski, Lucas und Coddet, Christian.** *The study of the laser parameters and environment variables effect on nechanical properties of high compact parts elaborates by selective laser melting 316L powder.* Belfort : Universite de Technologie de Belfort, 2013.
10. **Sander, Jan.** *Dissertation - Selektives Laserschmelzen hochfester Werkzeugstähle.* Dresden : Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2018.
11. **Kranz, Jannis.** *Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbastrukturen.* Berlin, Heidelberg : Imprint: Springer Vieweg, 2017.
12. **Greven, Emil.** *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für technische Berufe.* Hamburg : Verl. Handwerk und Technik, 2010. 978-3-582-02211-0 , 3-582-02211-0 .
13. **Buchbinder, Damien.** RTEjournal - Forum für Rapid Technologie. [Online] August 2011. [Zitat vom: 09. Januar 2018.] <https://www.rtejournal.de/ausgabe8/3158>. URN: urn:nbn:de:0009-2-31583.

14. **Wycisk, Eric.** *Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4.* Hamburg : Springer Vieweg, 2017. 978-3-662-56059-4.
15. **DIN-Normenausschuss Materialprüfung.** *DIN EN ISO 6892-1\_Metallische Werkstoffe - Zugversuch.* 2017-02. DIN EN ISO 6892-1.
16. **Schmidt, Tobias .** *Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile.* Heidelberg : Springer Vieweg, 2016. 978-3-662-52995-9.
17. **(ConceptLaser), Maximilian Görgen.** *Basic Training Mlab Cusing.* 12 - 14. März 2018.
18. **Buchbinder, D. und Meiners, W.** *Abschlussbericht - Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion.* Aachen : Fraunhofer Institut für Lasertechnik, 2010. AluGenertiv, Fkz.: 01RIO636A-D.
19. *Einführung in die Pulvermetallurgie.* **EPMA-european powder metallurgy association & FPM-Fachverband Pulvermetallurgie.** Shresbury (UK) : european powder metallurgy association, 20120.
20. **Richard, Hans Albert, Schramm, Britta und Zipsner, Thomas.** *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017. 978-3-658-17779-9.
21. **Kremer, Robert.** *Konstruktion eines Probekörpers für die Werkstoffprüfung zur Untersuchung der Parametereinflüsse beim Laserschmelzprozess - Ingenieurmäßige Arbeit.* Dortmund : s.n., 2018.
22. **CONCEPTLASER.** Angebot Nr. Mlab cusing . Lichtenfels : s.n., 2017.
23. **ConceptLaser GmbH.** material data - CL 20ES Edelstahl. *concept-laser.de.* [Online] 2017. [Zitat vom: 02. Juli 2018.] [https://www.concept-laser.de/fileadmin//user\\_upload/Materialdatenblatt\\_CL\\_20ES.pdf](https://www.concept-laser.de/fileadmin//user_upload/Materialdatenblatt_CL_20ES.pdf).
24. **Wegst, C. und Wegst, M.** *Stahlschlüssel - Taschenbuch.* Marbach : Stahlschlüssel Wegst GmbH, 2016. 3-922 599-31-1.
25. **DIN, Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im.** *DIN EN ISO 18265 - Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härtewerten.* Berli : DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 02/2014. DIN EN ISO 18265.
26. **Sartorius AG, Wägetechnik.** *Sartorius LC / AC - Waagen - Service-Handbuch.* Göttingen : Sartorius AG, 2002. Publication No.: W--5026-d02112.
27. **Bauch, Jürgen.** *Physikalische Werkstoffdiagnostik.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. 978-3-662-53952-1 .
28. **ceab.am.** [Online] [Zitat vom: 05. April 2018.] [ceab.am/en/facilities1.html](http://ceab.am/en/facilities1.html).
29. **DIN-Normenausschuss Materialprüfung.** *DIN EN ISO 6507-1\_Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers.* 2016-7. DIN EN ISO 6507-1.
30. **Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften - Fachgruppe Mechanik & Industrie.** zhaw.ch. [Online] 30. September 2014. [Zitat vom: 04. 04 2018.]

<https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zentren/zpp/04-advanced-production-technologies/referate-vortraege/zhaw-zpp-20140930-additive-fertigung-mit-1.4404-ethz.pdf>.

**31. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. VDI/VDE**

*2602\_Oberflächenprüfung - Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten*. 2008-10. VDI/VDE 2602.

**32. Fachbereich Maschinenbau - Fachgruppe Fertigungstechnik.** Gerätekarte für

Messmittel - Perthen Perthometer PRK - Oberflächenmessgerät. [Online] [Zitat vom: 02. März 2018.] <https://www.fh-dortmund.de/de/fb/5/einricht/labore/103020100000083970.php>.

**33. Normenausschuß Technische Grundlagen (NATG) - Geometrische**

**Produktspezifikation und -prüfung- im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN**

*683-3 - Bügelmeûschrauben, Sonderausführungen, Konstruktionsmerkmale, Anforderungen, Prüfung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 04-1999. DIN 863-3.

**34. Brockhaus.** brockhaus. [Online] [Zitat vom: 28. 03 2018.]

<http://brockhaus.de/ecs/enzy/article/messschraube>.

**35. Salbert, Georg.** *Metallographie - Grundlagen und Anwendung*. Stuttgart : Gebrüder

Borntraeger, 20120. 978-3-443-23017-3.

**36. feber.se.** feber.se. [Online] [Zitat vom: 16. Kuli 2018.]

[http://feber.se/vetenskap/art/343442/forskare\\_stller\\_sig\\_tveksamma/](http://feber.se/vetenskap/art/343442/forskare_stller_sig_tveksamma/).

**37. Waschull, Horst.** *Präperative Metallographie : Präperation für die Lichtmikroskopie*.

Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.

**38. Fischer, Ulrich, et al.** *Tebellenbuch Metall*. Haan-Gruiten : Europa Lehrmittel, 2011. 978-3-

8085-1725-3.

**39. Bonnet, Martin.** *Kunststofftechnik - Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und*

*Fallbeispiele*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. 978-3-658-13828-8.

## Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Diagramme

Abb. 1: Schematische Darstellung der additiven Fertigung.....	9
Abb. 2: Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach ihrem Ausgangsmaterial und Bindungsmechanismus (2 S. 8), (1 S. 77).....	10
Abb. 3: Marktverteilung der metallverarbeitenden additiven Fertigungsverfahren im Jahre 2014 (4 S. 40) .....	12
Abb. 4: Einsatzgebiete der additiven Fertigung (2 S. 7).....	13
Abb. 5: Aufbau einer Anlage zum Selektiven Laserschmelzen .....	14
Abb. 6: Verfahrensablauf beim Selektiven Laserschmelzen .....	15
Abb. 7: Schlibfbilder beim selektiven Laserschmelzen; a) Seitenansicht bei 300facher Vergrößerung; b) Ansicht von Oben bei 300facher Vergrößerung; c) Seitenansicht bei 1000facher Vergrößerung; d) Ansicht von Oben bei 100facher Vergrößerung.....	17
Abb. 8: Entstehung thermisch induzierter Eigenspannungen durch unterbundene Kontraktion (11) .....	20
Abb. 9: Durch Eigenspannungen verursachte Krümmung führte zur Bauteilablösung .....	20
Abb. 10: Einfluss der Schichtdicke auf die Geometrieapproximation.....	22
Abb. 11: Einfluss der Geometrieauflösung auf einer Bohrung orthogonal zur Aufbaurichtung (links). Zum Vergleich eine Bohrung mit Aufbaurichtung orientiert (rechts).....	22
Abb. 12: Vereinfachte Darstellung des Treppenstufeneffekts; $d_s$ = Schichtdicke.....	23
Abb. 13: Beispiel für den Einsatz von Supportstrukturen an einem Koffein Molekül .....	25
Abb. 14: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften beim SLM-Prozess.....	27
Abb. 15: Schematische Darstellung vom Bauteilverzug durch Materialanhäufung (11).....	29
Abb. 16: Beispiel zur Anpassung eines Frästeils für das Selektive Metall-Laserschmelzen (16 S. 59).....	29
Abb. 17: Überhang mit der Länge $a$ .....	30
Abb. 18: Winkeleinfluss bei SLM-Bauteilen.....	31
Abb. 19: Aufbaufehler durch überstehende ungestützte Flächen.....	32
Abb. 20: Einfluss der Bauteilorientierung auf die benötigte Supportmenge.....	34
Abb. 21: Schematische Darstellung der dominierenden Parameter beim SLM-Prozess .....	36
Abb. 22: Veranschaulichung der Scanstrategie .....	38
Abb. 23: Die gängigsten Belichtungsstrategien im Überblick.....	40
Abb. 24: Aufbau eines Parametersatzes .....	43
Abb. 25: Aufbau des Flächenbelichtungsparametersatzes.....	44
Abb. 26: Versuchsplan.....	45
Abb. 27: Digitales Lichtmikroskop „VHX-2000“ vom Hersteller Keyence.....	49
Abb. 28: Desktop Rasterelektronenmikroskop mit integrierter EDX-Analyse „Phenom ProX“ (eee).....	50
Abb. 29: Oberflächenmessgerät „Perthen Perthometer PRK“ vom Hersteller „Mahr Perthan“; Baujahr 1996 .....	51
Abb. 30: Bügelmessschraube nach DIN 683-3 (32) .....	52
Abb. 31: Angeschliffener Meteorit (35).....	53
Abb. 32: 3D-Skizze des Dichtequaders.....	58
Abb. 33: 3D-Skizze der Zugprobe.....	59

Abb. 34: Auswirkung der Islands-Strategie bei kleinen zu belichtenden Flächen .....	59
Abb. 35: Gefertigte Zugproben und Dichtequader .....	60
Abb. 36: Probekörperhalter mit aufgetragener Pulverschicht .....	61
Abb. 37: Gegenüberstellung des neuen und aufbereiteten Pulvers.....	65
Abb. 38: Geometrie für die spanend zu fertigen Referenzproben.....	67
Abb. 39: In einem Vorversuch gefertigte Probekörper mit dem Parametersatz CL20_performance .....	71
Abb. 40: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20_performance (30fache Vergrößerung).....	71
Abb. 41: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. ...	72
Abb. 42: Schliffbild der Seitenansicht eines Dichtequaders (1000fache Vergrößerung) .....	73
Abb. 43: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20_cusing_V1 (30fache Vergrößerung).....	76
Abb. 44: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. ...	77
Abb. 45: Schliffbild der Seitenansicht eines Dichtequaders (1000fache Vergrößerung) .....	78
Abb. 46: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20_cusing_V2 (30fache Vergrößerung).....	81
Abb. 47: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. (300fach vergrößert) .....	82
Abb. 48: Seitenansicht eines präparierten Dichtequaders bei 1000facher Vergrößerung .....	82
Abb. 49: Eingebetter, geschliffener und polierter Dichtequader des Parametersatzes CL20_cusing_V2-1 (30fache Vergrößerung).....	86
Abb. 50: Schliffbilder der Dichtequader. Links ist die Ansicht von oben und rechts die Seitenansicht abgebildet. (300fach vergrößert) .....	87
Abb. 51: Vergleich der Gefüge .....	91
Abb. 52: Entstehung einer Schmelzspur.....	98
Abb. 53: Versuchsgeometrie für den Spurbreitenversuch.....	99
Abb. 54: Versuchsaufbau zur Schmelzspurbreitenermittlung .....	100
Abb. 55: Bauplatte mit 20 Probekörpern für die Schmelzspurbreite .....	101
Abb. 56: Auslegung der Testparametersätze .....	108
Abb. 57: Testgeometrie zur Untersuchung der Verbrennungsanfälligkeit .....	109
Abb. 58: Positionierung der Probekörper auf der Bauplatte .....	111
Abb. 59: Bauplatte mit gefertigten Probekörpern .....	112
Abb. 60: Bauraum während der Probekörperfertigung .....	113
Abb. 61: Eingesetzte Beschichter Klinge mit orange markierten Verbrennungen .....	113
Abb. 62: Metallographisch aufbereitete Schliffbilder der Quaderseite der Testparameter P01 – P10 (300fache Vergrößerung).....	117
Abb. 63: Metallographisch aufbereitete Schliffbilder der Quaderseite der Testparameter P11 – P20 (300fache Vergrößerung).....	118
Abb. 64: Segmentbögen der 90 W Testparameter .....	122

Abb. 65: Segmentbögen der 100 W Testparameter .....	123
Abb. 66: Probekörper zur Vermessung einzelner Schichten und Schmelzspuren.....	128
Abb. 67: Beispiel zum Versuch der Einflusses von Winkelfehlern bei der Probenpräparation .....	128
Abb. 68: EDX-Spektrum der Langzeitmessung (Pos. 11) des Probe 11 des „neuen“ Pulvers .....	141
Abb. 69: EDX-Spektrum der Langzeitmessung (Pos. 11) des Probe 11 des aufbereiteten Pulvers.....	142
Tabelle 1: Kennwerte des genutzten Werkstoffes (24 S. 98-101), (23), (20 S. 181-183), (25) .....	48
Tabelle 2: Übersicht der Versuchsergebnisse der EDX-Analyse.....	63
Tabelle 3: Übersicht der im Zugversuch ermittelten Kennwerte.....	68
Tabelle 4: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „performance“-Proben .....	73
Tabelle 5: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20_performance.....	75
Tabelle 6: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20_performance .....	75
Tabelle 7: Parametersatz CL20_cusing_V1 (vereinfacht) .....	76
Tabelle 8: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusing_V1“-Proben.....	79
Tabelle 9: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20_cusing_V1 .....	80
Tabelle 10: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchungen des Parametersatzes CL20_cusing_V1.....	80
Tabelle 11: Parametersatz CL20_cusing_V2 (vereinfacht) .....	81
Tabelle 12: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusning_V2“-Proben.....	83
Tabelle 13: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20_cusing_V2.....	85
Tabelle 14: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20_cusing_V2 .....	85
Tabelle 15: Parametersatz CL20_cusing_V2-1 (vereinfacht) .....	86
Tabelle 16: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte der „cusning_V2-1“-Proben .....	87
Tabelle 17: Zusammenfassung der Abmaßuntersuchung des Parametersatzes CL20_cusing_V2-1 .....	88
Tabelle 18: Zusammenfassung der Rauheitsuntersuchung des Parametersatzes CL20_cusing_V2-1 .....	89
Tabelle 19: Theoretische und optisch ermittelte Dichte im Überblick .....	89
Tabelle 20: Zusammenfassung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften .....	92
Tabelle 21: Übersicht der ermittelten Rauheiten.....	94
Tabelle 22: Übersicht der ermittelten relativen Abmaße.....	96
Tabelle 23: Auswertung der ermittelten Trendliniengleichungen und ihr Verhältnis zueinander .....	106
Tabelle 24: Übersicht der erstellten Testparameter.....	108
Tabelle 25: Ergebnis der Untersuchung zur theoretischen Dichte.....	114
Tabelle 26: Zusammenfassung der Härtemessung nach Vickers.....	119
Tabelle 27: Unaufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des „neuen“ Pulvers.....	141
Tabelle 28: Aufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des „neuen“ Pulvers.....	141
Tabelle 29: Unaufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des aufbereiteten Pulvers .....	142
Tabelle 30: Aufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des aufbereiteten Pulvers.....	142

Diagramm 1: Grafische Darstellung der Legierungszusätze des 1.4404 Pulvers. (Die Grafik wurde anhand von Mittelwerten erstellt) (23) .....	48
Diagramm 2: Diagramm zur Umwertung von Härtewerten nach Vickers in Zugfestigkeit (25) .....	55
Diagramm 3: Graphische Darstellung der Hauptlegierungselemente.....	63
Diagramm 4: Histogramme zur Größenverteilung der beiden Pulverarten .....	64
Diagramm 5: Verteilungskurven der Kornfraktionsklassen .....	64
Diagramm 6: Optische Darstellung der im Zugversuch ermittelten Kennwerte .....	68
Diagramm 7: Gemeinsames Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	69
Diagramm 8: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „performance“-Proben.....	74
Diagramm 9: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing_V1“-Proben .....	79
Diagramm 10: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing_V2“-Proben.....	84
Diagramm 11: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten „cusing_V2-1“-Proben .....	88
Diagramm 12: Graphische Darstellung der theoretischen und optisch ermittelten Dichtewerte.....	90
Diagramm 13: Graphische Darstellung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften I.....	93
Diagramm 14: Graphische Darstellung der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften II.....	93
Diagramm 15: Graphische Darstellung der Mittenrauwerte mit der Standardabweichung.....	95
Diagramm 16: Graphische Darstellung der gemittelten Rautiefen mit der Standardabweichung.....	95
Diagramm 17: Graphische Darstellung der ermittelten relativen Abmaße .....	97
Diagramm 18: Ermittelte Schmelzspurbreite mit der jeweiligen Standardabweichung.....	102
Diagramm 19: Die Schmelzspurbreite über die Streckenenergie aufgetragen mit logarithmischer Trendlinie .....	102
Diagramm 20: Schmelzspurbreite auf Scangeschwindigkeit.....	103
Diagramm 21: Schmelzspurbreite auf Laserstrahlleitung .....	104
Diagramm 22: Schmelzspurbreite über die relative Scangeschwindigkeit aufgetragen mit den jeweiligen Trendliniengleichungen.....	105
Diagramm 23: Schmelzspurbreite über die relative Laserstrahlleistung aufgetragen mit den jeweiligen Trendliniengleichungen.....	106
Diagramm 24: Graphische Darstellung der theoretischen Dichte.....	114
Diagramm 25: Theoretische Dichte über der Streckenenergie aufgetragen .....	115
Diagramm 26: Graphische Darstellung der ermittelten Vickershärtem mit Standardabweichung .....	119
Diagramm 27: Härtewerte über die Streckenenergie aufgetragen.....	120
Diagramm 28: Streufelder der über die Streckenenergie aufgetragene Härte .....	120
Diagramm 29: Härtewerte über die Scangeschwindigkeit aufgetragen.....	121
Diagramm 30: Streufelder der über die Scangeschwindigkeit aufgetragene Härte.....	121

## 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 17.07.2018



---

Robert Kremer



## Anhang

## A1: Werkstoffdatenblatt CL 20ES

.material data

**CONCEPTLASER**

a GE Additive company

**CL 20ES** Edelstahl

*Edelstahl in Pulverform, chemische Zusammensetzung  
entsprechend 1.4404, X 2 CrNiMo 17 13 2, 316L.*

CL 20ES ist ein austenitischer nichtrostender Stahl, welcher mit entsprechender Zulassung\* zur Herstellung von Funktionsbauteilen oder Werkzeugkomponenten für Vorserienwerkzeuge verwendet werden kann.

26  
**Fe**  
55,847

**CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG**

Bestandteil	Richtwert (%)
Cr	16,5 - 18,5
Ni	10,0 - 13,0
Mo	2,0 - 2,5
Mn	0 - 2,0
Si	0 - 1,0
P	0 - 0,045
C	0 - 0,030
S	0 - 0,030
Fe	Rest

LaserCUSING® | Quelle: MBFZ-toolcraft GmbH



[www.concept-laser.de](http://www.concept-laser.de)

09/2017 | Technische Änderungen vorbehalten.  
 Titelfoto: jung 2.com  
 Schlibfbilder: Concept Laser GmbH  
 Artwork: brandnew-design.de

## ANWENDUNGSBEREICHE

Mit entsprechender Zulassung\* eignet sich der Werkstoff CL 20ES zur Herstellung von säurebeständigen und rostfreien Prototypen-, Unikat- oder Serienteilen für die Bereiche Anlagenbau, Automobil, Medizintechnik, Schmuck oder Werkzeugkomponenten.

## TECHNISCHE DATEN NACH EMPFOHLENER WÄRMEBEHANDLUNG

	90° (liegend)	45° (Polarwinkel)	0° (stehend)
Dehngrenze $R_{p0,2}^1$	374 ± 5 N/mm <sup>2</sup>	385 ± 6 N/mm <sup>2</sup>	330 ± 8 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit $R_m^1$	650 ± 5 N/mm <sup>2</sup>	640 ± 7 N/mm <sup>2</sup>	529 ± 8 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung $A^{1,2}$	65 ± 4 %	63 ± 5 %	63 ± 5 %
E-Modul <sup>3</sup>	ca. 200 · 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	ca. 200 · 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	ca. 200 · 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda^3$	ca. 15 W/mK	ca. 15 W/mK	ca. 15 W/mK
Härte <sup>4</sup>	20 HRC	20 HRC	20 HRC

<sup>1</sup> Zugversuch bei 20°C nach DIN EN 50125  
<sup>2</sup> Durch spezielle Wärmebehandlung kann eine höhere Bruchdehnung eingestellt werden  
<sup>3</sup> Spezifikation gemäß Datenblatt des Werkstoffherstellers  
<sup>4</sup> Härteprüfung nach DIN EN ISO 6508

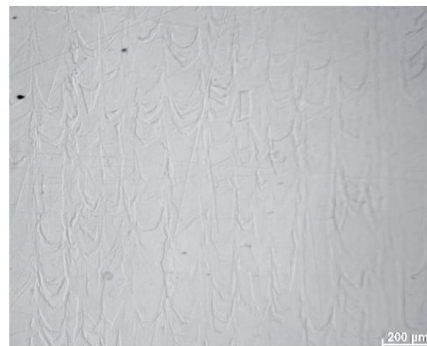
## CL 20ES Edelstahl

## SCHLIFFBILDER

Probekörper (20-fache Vergrößerung)



Probekörper (100-fache Vergrößerung)



## WÄRMEBEHANDLUNG

Optional für verzugskritische Bauteile:  
 In 3 Stunden aufheizen bis 550°C. Temperatur halten für 6 Stunden. Bauteile anschließend im Ofen oder an der Luft abkühlen lassen.

## MIKROSTRUKTUR

Bauteile aus Edelstahl CL 20ES weisen nach dem Aufbau mit dem Metall-Laserschmelzverfahren LaserCUSING® ein homogenes, dichtes Gefüge auf.

Alle angegebenen Werte sind Näherungswerte. Die getoffenen Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Erkenntnisse und sind abhängig von Prozess- und Anlagenparametern. Die Angaben auf diesem Materialdatenblatt sind deshalb unverbindlich und gelten als nicht zugesagt.  
 \* Die Zulassung ist branchen- und/oder anwendungsbezogen und somit vom Verbraucher/Anwender durchzuführen. Eine Zulassung des Materials ist seitens der Concept Laser GmbH nicht vorhanden.

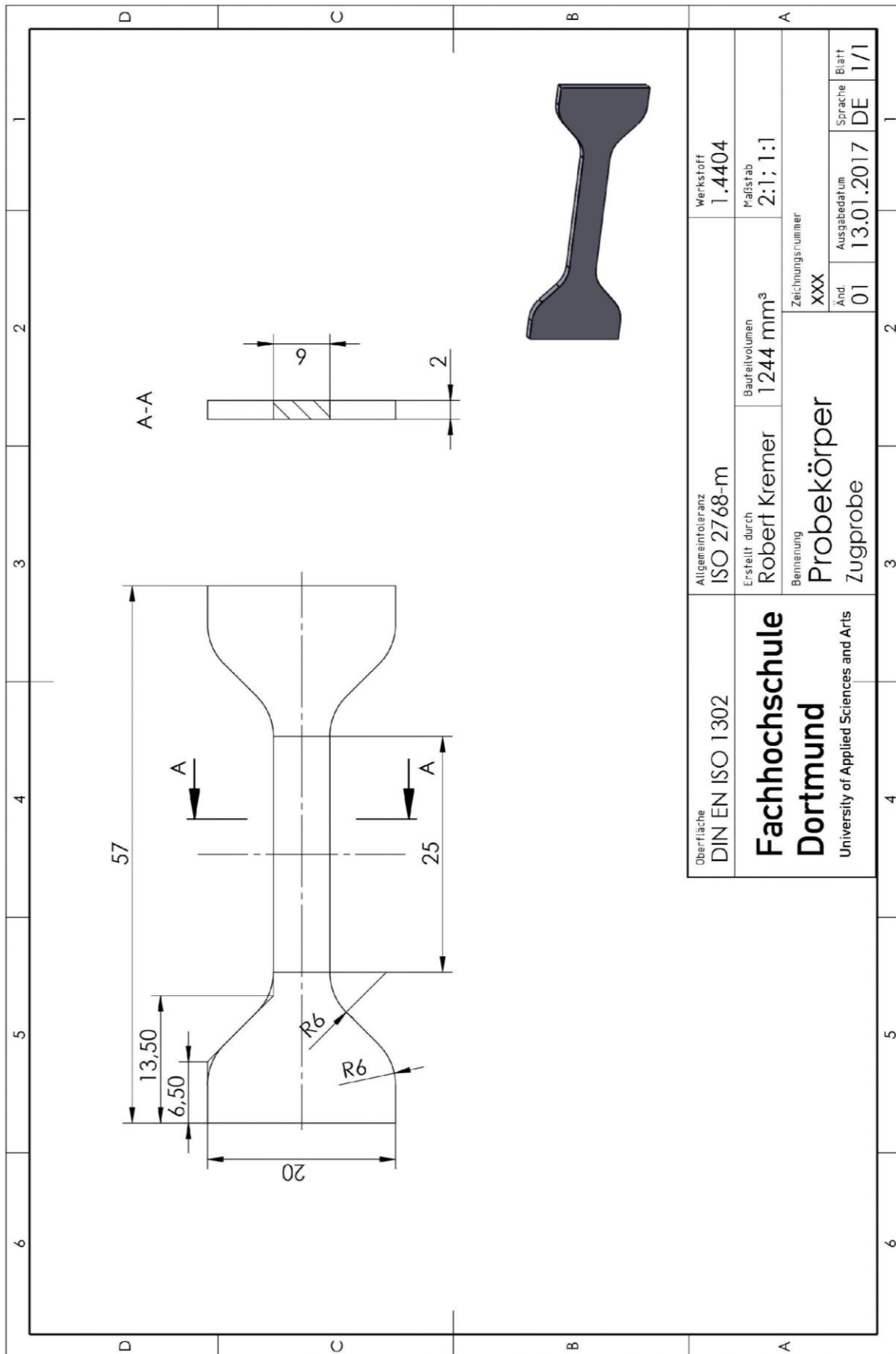
Concept Laser GmbH  
 An der Zeil 8  
 D 96215 Lichtenfels

T: +49 (0) 95 71.1679 200  
 F: +49 (0) 95 71.1679 299  
 info@concept-laser.de

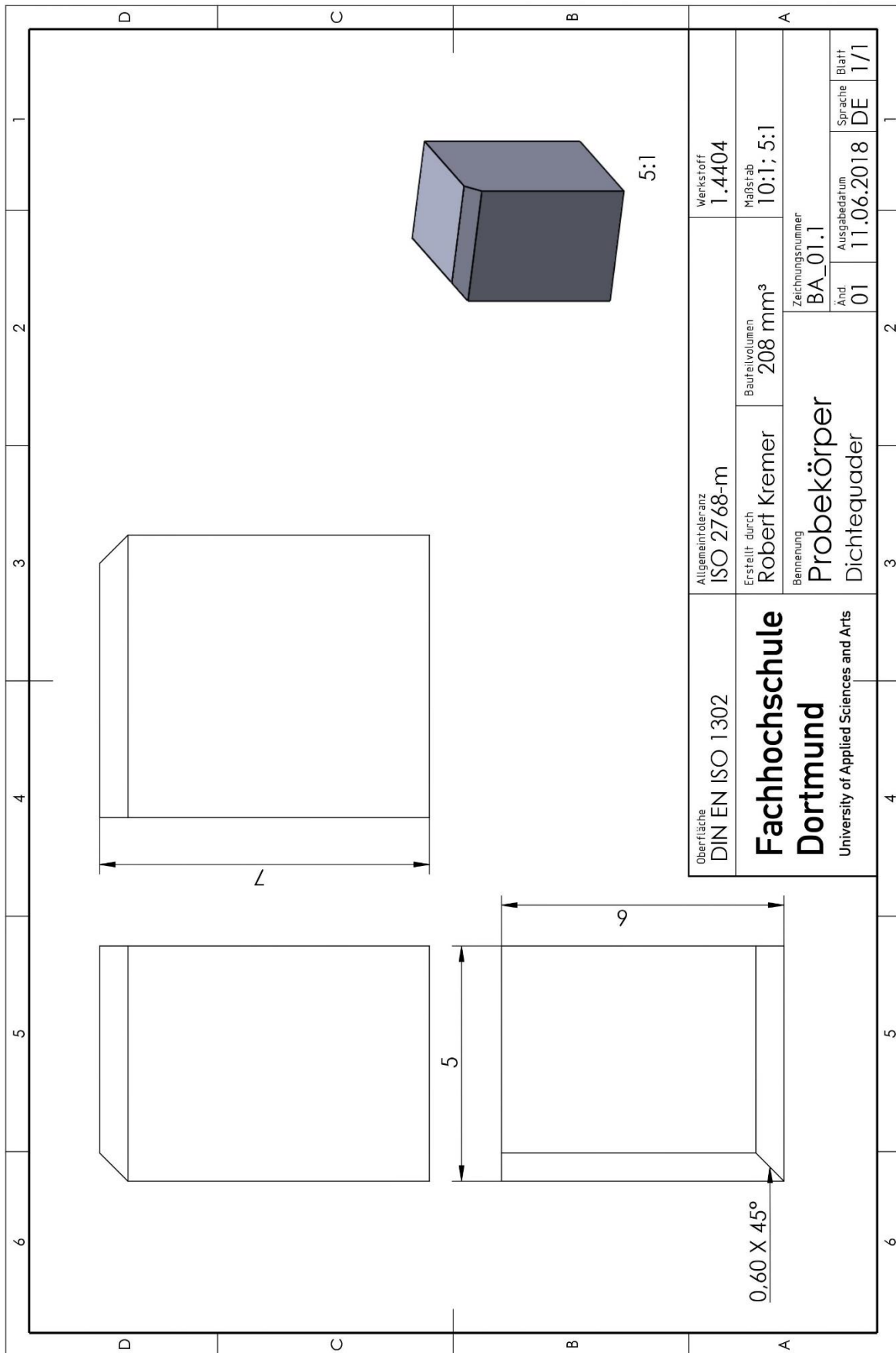


[www.concept-laser.de](http://www.concept-laser.de)

## A2: Technische Zeichnung zur Zugprobe



### A3: Technische Zeichnung zum Dichtequader



## A4: Experimentale Untersuchung des Ausgangsmaterials

Tabelle 27: Unaufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des „neuen“ Pulvers

EDX_Neues Pulver_Rohdaten															
Element	Lieferant		120sek oder 200.000 Counts										2E+06 Counts	Mittel	Stabw
	Min	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Fe	Rest		43,60	44,31	52,50	40,11	40,10	46,06	43,95	59,67	51,00	42,69	39,17	45,74	6,27
Cr	16,50	18,50	12,82	13,77	15,86	12,65	12,20	13,79	13,55	19,41	15,51	12,99	12,78	14,12	2,10
Ni	10,00	13,00	7,36	8,48	9,61	8,73	7,77	7,73	7,16	11,86	10,01	7,54	7,22	8,50	1,47
Mo	2,00	2,50	0,78	0,66	0,66	0,76	1,04	0,86	0,71	1,55	0,73	0,00	0,60	0,76	0,37
Mn	0,00	2,00	0,39	0,83	0,45	0,58	0,68	0,72	0,63	1,45	0,86	0,59	0,74	0,72	0,28
Si	0,00	1,00	1,39	1,43	2,41	1,92	1,94	1,56	1,40	3,28	2,43	2,19	2,16		
P	0,00	0,05	0,28	0,55	0,46	0,00	0,38	0,29	0,20	0,32	0,41	0,44	0,40		
C	0,00	0,03	1,78	1,77	0,48	1,76	1,58	1,69	1,68	2,46	0,13	1,84	4,45		
S	0,00	0,03	0,21	0,53	1,20	0,35	0,18	0,36	0,35	0,00	0,93	1,75	1,06		
O	-		31,39	27,67	16,37	33,15	34,14	26,92	30,37		17,99	29,96	31,42	27,94	5,78

Tabelle 28: Aufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des „neuen“ Pulvers

EDX_Neues Pulver_Aufbereitet (Ohne Sauerstoff)															
Element	Lieferant		120sek oder 200.000 Counts										2E+06 Counts	Mittel	Stabw
	Min	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Fe	Rest		63,55	61,26	62,78	59,99	60,88	63,04	63,12	59,67	62,19	60,96	57,12	61,32	1,82
Cr	16,50	18,50	18,69	19,04	18,96	18,92	18,52	18,87	19,46	19,41	18,91	18,55	18,64	18,91	0,30
Ni	10,00	13,00	10,73	11,72	11,49	13,06	11,80	10,58	10,28	11,86	12,21	10,77	10,53	11,37	0,82
Mo	2,00	2,50	1,14	0,91	0,79	1,14	1,58	1,18	1,02	1,55	0,89	0,00	0,87	1,01	0,40
Mn	0,00	2,00	0,57	1,15	0,54	0,87	1,03	0,99	0,90	1,45	1,05	0,84	1,08	0,95	0,24
Si	0,00	1,00	2,03	1,98	2,88	2,87	2,95	2,14	2,01	3,28	2,96	3,13	3,15		
P	0,00	0,05	0,41	0,76	0,55	0,00	0,58	0,40	0,29	0,32	0,50	0,63	0,58		
C	0,00	0,03	2,59	2,45	0,57	2,63	2,40	2,31	2,41	2,46	0,16	2,63	6,49		
S	0,00	0,03	0,31	0,73	1,43	0,52	0,27	0,49	0,50	0,00	1,13	2,50	1,55		

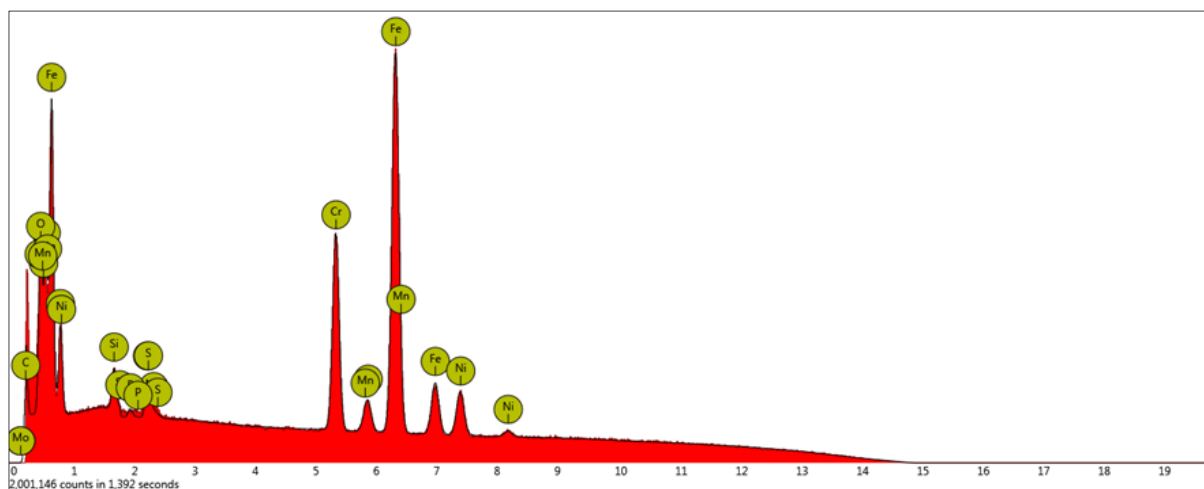


Abb. 68: EDX-Spektrum der Langzeitmessung (Pos. 11) des Probe 11 des „neuen“ Pulvers

Tabelle 29: Unaufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des aufbereiteten Pulvers

EDX_Aufbereitetes Pulver_Rohdaten															
Element	Lieferant		120sek oder 200.000 Counts										2E+06 Counts		
	Min	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel	Stabw
Fe	Rest		49,29	45,14	61,34	42,13	39,03	40,9	45,83	45,79	41,53	41,78	43,01	45,07	6,11
Cr	16,50	18,50	14,89	13,63	18,64	12,06	11,98	12,36	13,85	13,96	12,55	12,29	13,39	13,60	1,91
Ni	10,00	13,00	10,28	7,17	12,48	6,77	7,63	7,09	7,35	8,64	7,68	7,04	7,85	8,18	1,73
Mo	2,00	2,50	0,72	1,1	1,21	0,41	1,15	0,97	0,81	0,82	0,67	0,85	0,69	0,85	0,24
Mn	0,00	2,00	0,92	0,71	1,09	0,78	0,81	0,96	0,8	0,7	0,85	0,8	0,98	0,85	0,12
Si	0,00	1,00	2,1	2,04	1,68	1,67	2,29	1,72	1,75	1,65	1,86	1,55	1,65		
P	0,00	0,05	0,61	0,31	0,23	0,34	0,47	0,47	0,68	0,28	0,26	0,46	0,35		
C	0,00	0,03	0,19	1,42	2,46	1,65	2,02	1,82	1,89	1,79	2,19	1,25	2,37		
S	0,00	0,03	1,11	0,19	0,86	0,85	0,09	0,4	0,52	0,43	0,53	0,36	0,69		
O	-		19,89	28,29		33,33	34,52	33,33	26,54	25,96	31,88	33,62	29,01	29,64	4,39

Tabelle 30: Aufbereitete Ergebnisse der EDX-Analyse des aufbereiteten Pulvers

EDX_Aufbereitetes Pulver_Aufbereitet (Ohne Sauerstoff)															
Element	Lieferant		120sek oder 200.000 Counts										2E+06 Counts		
	Min	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel	Stabw
Fe	Rest		71,84	62,41	73,35	63,01	59,25	55,98	65,82	45,79	50,64	59,66	62,72	60,95	7,81
Cr	16,50	18,50	21,70	18,84	22,29	18,04	18,19	16,92	19,89	13,96	15,30	17,55	19,52	18,38	2,38
Ni	10,00	13,00	14,98	9,91	14,92	10,13	11,58	9,70	10,56	8,64	9,36	10,05	11,45	11,03	2,02
Mo	2,00	2,50	1,05	1,52	1,45	0,61	1,75	1,33	1,16	0,82	0,82	1,21	1,01	1,16	0,32
Mn	0,00	2,00	1,34	0,98	1,30	1,17	1,23	1,31	1,15	0,70	1,04	1,14	1,43	1,16	0,19
Si	0,00	1,00	3,06	2,82	2,01	2,50	3,48	2,35	2,51	1,65	2,27	2,21	2,41		
P	0,00	0,05	0,89	0,43	0,28	0,51	0,71	0,64	0,98	0,28	0,32	0,66	0,51		
C	0,00	0,03	2,22	2,47	0,48	2,64	2,41	2,53	2,29	3,32	0,19	2,77	6,27		
S	0,00	0,03	5,78	6,66	1,24	7,17	5,98	6,55	6,08	8,70	0,49	7,48	15,91		

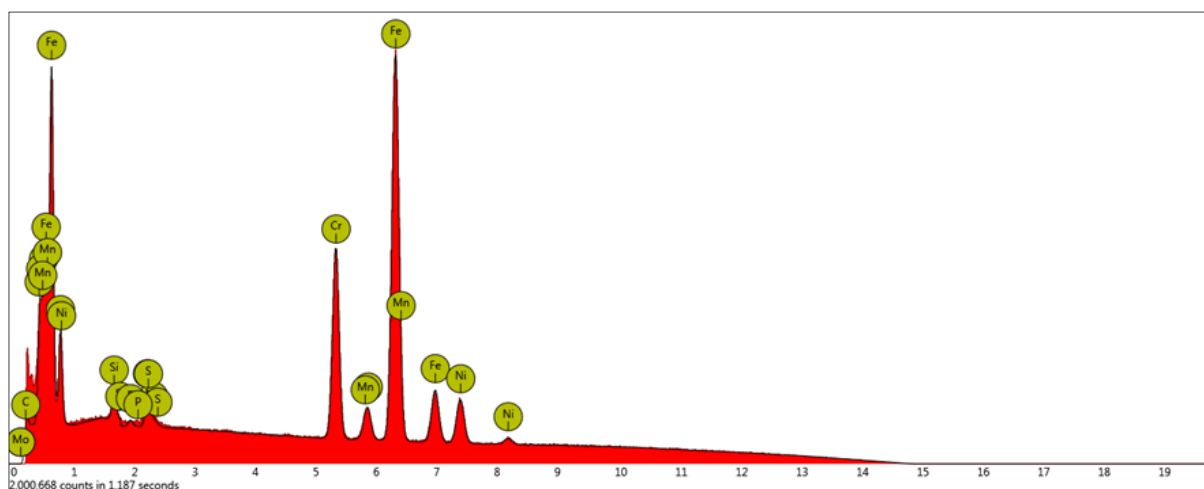


Abb. 69: EDX-Spektrum der Langzeitmessung (Pos. 11) des Probe 11 des aufbereiteten Pulvers

## A5: Datenträger

Die beiliegende CR-ROM enthält die vorliegende Arbeit im PDF-Format sowie das Excel-Sheet zur Spurbreitenberechnung. Zusätzlich sind alle relevanten Ergebnisse und Auswertungen enthalten.