



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*



## Bachelor Thesis

Experimentelle Untersuchung der mechanischen Festigkeit  
von lasergenerativ hergestellten Stützstrukturen aus Edelstahl

von

Nestorius Wiegandt  
Matrikelnummer 1881886

mit freundlicher Unterstützung von



Institut: iLAS – Laser and System Technologies,  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Chr. Hornberger  
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann  
Wissenschaftlicher Betreuer: M.Sc. Maximilian Munsch  
vorgelegt am: 27.07.2010



# Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
Formelzeichen.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Kurzreferat.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Selective Laser Melting.....	3
2.1.1 Einordnung.....	3
2.1.2 Verfahrensprinzip.....	4
2.1.3 Prozesskette.....	5
2.1.4 Auswirkung der Prozessparameter.....	7
2.1.5 Thermisch-induzierte Spannungen.....	7
2.1.6 Abstützungsbedürftige Geometrien.....	8
2.2 Stützstrukturen.....	10
2.2.1 Definition Supportstrukturen.....	10
2.2.2 Strategien zur Abstützung.....	10
2.2.3 Modellierung von Supportstrukturen.....	13
3 Aufgabenstellung.....	14
4 Randbedingungen der experimentellen Untersuchung.....	16
4.1 Anlagenkonfiguration.....	16
4.2 Werkstoff.....	18
4.3 Prozessparameter.....	19
4.4 Messeinrichtungen.....	19
4.4.1 Optisches Messgerät.....	19
4.4.2 Zugprüfmaschine.....	19
4.5 Hilfsmittel.....	20
5 Experimentelle Untersuchungen.....	21
5.1 Geometrische Untersuchungen.....	21
5.1.1 Grundlagen.....	21
5.1.2 Vorbereitung.....	23
5.1.3 Durchführung.....	25
5.1.4 Auswertung.....	28
5.1.5 Zusammenfassung der geometrischen Untersuchung.....	42
5.2 Mechanische Untersuchungen.....	44
5.2.1 Grundlagen.....	44
5.2.2 Vorbereitung.....	46
5.2.3 Durchführung.....	49
5.2.4 Auswertung.....	56
5.2.5 Korrektur der Festigkeitsberechnung.....	69
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	75
Quellenverzeichnis.....	78
Anhang.....	80

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau der Prozesskammer beim SLM [6].....	4
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Bauteilen mittels Selective Laser Melting [16].....	6
Abbildung 2.3: Schematisches Verhalten zwei belichteter Schichten [12].....	8
Abbildung 2.4: Auswirkung der Schichtbildung auf Überhänge [12].....	9
Abbildung 2.5: Zu unterstützendes Bauteil [21].....	11
Abbildung 2.6: Massive Abstützung von Überhängen [21].....	12
Abbildung 2.7: Mittels Supportgenerator erstellte Abstützung von Überhängen [21]....	12
Abbildung 3.1: Vorgehensweise zur Untersuchung von Supportstrukturen.....	15
Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau der M3-linear [17].....	16
Abbildung 4.2: M3-linear während eines Auf-/Abrüstvorgangs [21].....	17
Abbildung 5.1: Schmelzbadausdehnung um den Belichtungsvektor.....	22
Abbildung 5.2: Probengeometrie zur Ermittlung der Schmelzspurbreite.....	23
Abbildung 5.3: Probenstet 1 nach dem Generieren und Abrüsten.....	26
Abbildung 5.4: Probenstet 3 während der Aufbereitung auf der Drahterodiermaschine.	27
Abbildung 5.5: Stege mit 100 W und 400 mm/s.....	30
Abbildung 5.6: Stege mit 200 W und 400 mm/s.....	31
Abbildung 5.7: Kreuze mit 125 W und 1400 mm/s.....	31
Abbildung 5.8: Stege mit 100 W und 1000 mm/s.....	32
Abbildung 5.9: Kreuze mit 175 W und 600 mm/s.....	32
Abbildung 5.10: Aufbaustabilität und makroskopische Merkmale über Energieeintrag	33
Abbildung 5.11: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 600 mm/s.....	35
Abbildung 5.12: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 800 mm/s.....	36
Abbildung 5.13: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1000 mm/s.....	37
Abbildung 5.14: Stabile Schmelzspur bei einer Laserleistung von 200 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1200 mm/s .....	37
Abbildung 5.15: Instabile Schmelzspur bei einer Laserleistung von 200 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1200 mm/s .....	38
Abbildung 5.16: Entstehende Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten.....	39
Abbildung 5.17: Entstehende Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen.....	40
Abbildung 5.18: Schmelzspurbreiten in Abhängigkeit des Energieeintrags.....	41
Abbildung 5.19: Probekörpergeometrie zur Zugprüfung.....	46
Abbildung 5.20: Adaption der Probekörper an die Zugprüfmaschine.....	47
Abbildung 5.21: Anordnung der Zugproben.....	49
Abbildung 5.22: 396 generierte Zugproben in der SLM-Anlage.....	51
Abbildung 5.23: Zugproben während des Abtrennens.....	52
Abbildung 5.24: Montage der Zugproben in den Adaptern.....	52
Abbildung 5.25: Im Prüfstand montierte Zugprobe.....	53
Abbildung 5.26: Spannungs/Dehnungs-Diagramm zur Ermittlung der Dehngrenze.....	55
Abbildung 5.27: Erwartete Zusammenhänge zwischen Probenparameter und Ausgangsgrößen.....	56
Abbildung 5.28: Absolute Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags bei Kreuzgeometrien gestaffelt nach Ausrichtungen.....	57

Abbildung 5.29: Absolute Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags bei Stegeometrien gestaffelt nach Ausrichtungen.....	58
Abbildung 5.30: Spezifische Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags gestaffelt nach Geometrietyten.....	60
Abbildung 5.31: Spezifische Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen.....	61
Abbildung 5.32: Spezifische Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten .....	62
Abbildung 5.33: Theoretische und tatsächliche Supportfestigkeit in Abhängigkeit des Energieeintrags.....	62
Abbildung 5.34: Abhängigkeit der Zugfestigkeit und Dehngrenze vom Energieeintrag	64
Abbildung 5.35: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen.....	65
Abbildung 5.36: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten.....	66
Abbildung 5.37: Steigung des elastischen Bereichs in Abhängigkeit des Energieeintrags .....	67
Abbildung 5.38: Dehnung bei Erreichen der Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags.....	68
Abbildung 5.39: Dehnung bei Maximalkraft in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen.....	68
Abbildung 5.40: Korrekturfaktor über Energieeintrag.....	70
Abbildung 5.41: spezifische Kraftaufnahme mittels Korrektur berechnet im Vergleich zur tatsächlichen Kraftaufnahme.....	71
Abbildung 5.42: Mittels Gleichung (5.10) korrigierte Zugfestigkeit über Energieeintrag .....	72
Abbildung 5.43: Korrigierte Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistung.....	73
Abbildung 5.44: Spezifische Kraftaufnahme nach Gleichung (5.13) korrigiert.....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Mechanische Daten 1.4404 nach [27].....	18
Tabelle 5.1: Belichtungsparameter zur Ermittlung der Schmelzspurbreite.....	24
Tabelle 5.2: Energieeintrag in mJ bei verschiedenen Belichtungsparametern.....	24
Tabelle 5.3: Aufteilung der Baujobs.....	24
Tabelle 5.4: Anteil erfolgreich aufgebauter Kreuzgeometrien.....	28
Tabelle 5.5: Anteil erfolgreich aufgebauter Steggeometrien.....	29
Tabelle 5.6: Erfolgreich aufgebaute Supportgeometrien.....	29
Tabelle 5.7: Kriterien zur Beurteilung.....	30
Tabelle 5.8: Kreuzgeometrien nach optischen Kriterien beurteilt.....	33
Tabelle 5.9: Steggeometrien nach optischen Kriterien beurteilt.....	33
Tabelle 5.10: Geeignete Belichtungsparameter nach Abschnitt 5.1.....	43

## Formelzeichen

$A_s$	$mm^2$	Querschnittsfläche eines Supports
$A_{wirk}$	$mm^2$	Wirksame Querschnittsfläche eines Supports
$b_s$	$mm$	Schmelzspurbreite
$d_f$	$mm$	Fokusbildungsdurchmesser
$\epsilon$	%	Dehnung
$E$	$\frac{N}{mm^2}$	Steigung des elastischen Bereichs (E-Modul)
$E_m$	$J$	eingebraachte Energie
$F_s$	$N$	Kraftaufnahme eines Supports
$F_{s(E)}$	$N$	Kraftaufnahme ausgehend vom Energieeintrag
$F_{s(V)}$	$N$	Kraftaufnahme ausgehend von der Vektorlänge
$F_{s(spez)}$	$\frac{N}{mm}$	spezifische Kraftaufnahme von Supportstrukturen
$k_A$	1	Korrekturfaktor wirksame Querschnittsfläche
$k_O$	1	Korrekturfaktor Oberflächenrauigkeit
$l_s$	$mm$	Schmelzspurlänge
$P_l$	$W$	Laserleistung
$R^2$	1	Bestimmtheitsmaß bei Regressionsgleichung
$R_m$	$\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$\frac{N}{mm^2}$	Dehngrenze
$R_z$	$\mu m$	gemittelte Rautiefe
$v_l$	$mm$	Länge des Belichtungsvektors
$v_s$	$\frac{m}{s}$	Belichtungsgeschwindigkeit

# Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
2,5D	zweieinhalb-dimensional (Schichtinformationen mit Abstand)
3D	dreidimensional
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
cls	Concept Laser Slice
clo	Concept Laser Order
cw	Continuous Wave Operation/Dauerstrichbetrieb
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
LC	Laser Cusing
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SLM	Selective Laser Melting
STL	Surface Tessellation Language
spez	spezifisch
TGM	temperature gradient mechanism
theo	theoretisch
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Yb	Ytterbium

## Kurzreferat

In dieser Arbeit werden lasergenerativ hergestellte Stützstrukturen (Supports) aus Edelstahl untersucht. Diese sind notwendig, um beim Selective Laser Melting (SLM) entstehende Spannungen aufzunehmen, welche die Herstellbarkeit von überhängenden Geometrien einschränken.

Um die bauteilbedingten Spannungen aufnehmen zu können, ist die Festigkeit von Supportstrukturen zu untersuchen. Dies wird in zwei Versuchsreihen behandelt. In der ersten Versuchsreihe wird die Geometrie von Supportstrukturen in Abhängigkeit der beim SLM beeinflussbaren Prozessparameter untersucht. Hierzu werden Probekörper hergestellt und diese auf Prozessstabilität untersucht und vermessen, sodass die Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Belichtungsparameter berechnet werden kann. Die zweite Versuchsreihe soll die berechneten Festigkeiten validieren. Hierzu werden erneut Probekörper hergestellt und diese anschließend im Zugversuch geprüft.

Es werden Prozessparameter ermittelt, welche eine Variation der Strukturweiten von 0,076 mm bis 0,155 mm prozessstabil zulassen. Die Zugversuche spiegeln jedoch die zuvor berechnete Kraftaufnahme der Strukturen nur qualitativ, aber nicht quantitativ wieder. Die Ursache der Abweichungen wird in der Porosität der Strukturen, welche in Abhängigkeit der eingebrachten Energie auftritt, gefunden. Es wird eine Methode erarbeitet, die Porosität zu bestimmen und sie in die Kraftberechnung einfließen zu lassen. Dies ermöglicht eine exaktere Berechnung der Kraftaufnahme. Eine weitere Korrektur aufgrund der Oberflächenrauigkeit lässt die Kraftaufnahme der Supports für die hier untersuchten Randbedingungen mathematisch in Abhängigkeit der Belichtungsparameter nahezu exakt abbilden.



# 1 Einleitung

Selektives Laserstrahlschmelzen, im folgenden Selective Laser Melting (SLM) genannt, ist den urformenden Fertigungsverfahren zuzuordnen [19]. SLM verarbeitet einkomponentige Metallpulver zu festen Bauteilen, wobei das Metallpulver schichtweise aufgebracht und selektiv mit Hilfe eines Laserstrahls verschmolzen wird [28]. Es ist ein generatives Fertigungsverfahren, welches sich in allen Bereichen, von der Herstellung von Anschauungsmodellen bis hin zur Herstellung von Serienbauteilen, das heißt im Bereich des Rapid Manufacturing (RM), einsetzen lässt [9]. Wie alle Rapid-Technologieverfahren setzt sich dieses Verfahren im Gegensatz zu anderen Fertigungsverfahren durch die konstruktiven Freiheiten in der Bauteilgestaltung ab [8]. SLM unterscheidet sich von anderen generativen Verfahren insbesondere durch die erreichbaren Werkstoffeigenschaften, welche mit denen der entsprechenden Serienwerkstoffen vergleichbar sind [27], wobei es in der gestalterischen Freiheit anderen Schichtbauverfahren unterliegt [28].

Die gestalterischen Einschränkungen dieses Verfahrens sind dadurch bedingt, dass bei diesem additivem Schweißprozess Spannungen thermisch in das Bauteil induziert werden [5,12,13,16]. Diese müssen aufgenommen werden, um verzugsfreie Bauteile zu generieren [12]. Das Pulverbett, in dem der Generierprozess stattfindet, kann dem Bauteil weder mechanische Stützwirkung bieten, noch die beim Prozess entstehende Wärme ableiten [7,10,12]. Wenn in Aufbaurichtung lokal keine hinreichende Anbindung zur Bauplattform oder zur bereits generierten Bauteilgeometrie besteht, sind somit Stützgeometrien (Supports) zu realisieren, welche sowohl die eingebrachte Wärme hinreichend ableiten als auch die entstehenden Kräfte aufnehmen [12]. Diese Supports müssen zusätzlich generiert werden, was zusätzlichen Materialverbrauch und Bauzeit in Anspruch nimmt. Außerdem sind diese anschließend zu entfernen, da sie nicht Teil der gewünschten Bauteilgeometrie sind [28]. Da Supportgeometrien folglich zusätzliche Kosten verursachen, sind sie so gering wie möglich zu halten. Die Güte der unterstützten Oberfläche ist jedoch abhängig von den Abständen der Supportgeometrien zueinander. Je geringer der Abstand zwischen den Stützen ist, desto besser wird die entstehende Oberfläche [12]. Es ist somit ein optimaler Kompromiss zwischen der Anzahl und der Festigkeit der Supports zu erzielen, damit sowohl eine gute Oberfläche entsteht, als auch eine möglichst geringe Nacharbeit erforderlich ist. Kommerzielle Softwarelösungen bieten Module zur Supportgenerierung

an. Diese Softwarelösungen sind in der Lage, unterstützungsbedürftige Elemente zu erkennen und verschiedene vordefinierte Geometrien zur Unterstützung zu generieren [22,23], jedoch nicht, diese optimal auszulegen. Dadurch wird eine Anpassung nach Erfahrungswerten notwendig, was die Wirtschaftlichkeit zusätzlich herabsetzt, da weder eine möglichst einfache Entfernung der Supports, noch ein erfolgreicher Bauprozess garantiert werden kann [1,16,17,21].

Soll die Supportgenerierung optimal und ohne individuelle Erfahrungswerte durchgeführt werden, ist diese gezielt an die im Bauteil entstehenden Spannungen anzupassen. Zur Ermittlung der Bauteilspannungen und -verzüge wurden bereits diverse theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt [2,4,5,13,16,34]. Die Eigenschaften von Supportstrukturen sind jedoch bislang noch nicht untersucht wurden, obwohl diese die entstehenden Spannungen kompensieren müssen. Im Rahmen dieser Arbeit werden aus diesem Grund Supportstrukturen, hinsichtlich der Bauteilabstützung, näher betrachtet. Um entstehende Kräfte gezielt aufnehmen zu können, müssen die Geometrie und die Festigkeit der Supportstrukturen in Abhängigkeit der Prozessparameter, beziehungsweise ein geeigneter Bereich der Prozessparameter, ermittelt werden. Hierzu werden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Eine zur geometrischen Untersuchung der Strukturen und eine um die jeweiligen Festigkeit zu ermitteln. In der ersten Versuchsreihe wird sowohl die Geometrie, als auch die Prozessstabilität ermittelt. Hier ist die Querschnittsfläche zu ermitteln, welche auch gleichzeitig die Anbindungsfläche zum Bauteil bildet, da die Supports in Aufbaurichtung auf Zug beansprucht werden. Aus den Querschnittsflächen und den Werkstoffkenndaten wird anschließend die Kraftaufnahme berechnet. Die berechnete Kraftaufnahme wird anschließend in der zweiten Versuchsreihe validiert. Hierzu werden Proben mit prozessstabilen Parametern gefertigt und im Zugversuch geprüft. Zusätzlich ist die Abhängigkeit der Geometrien und Festigkeiten von den Prozessparametern zu untersuchen und nach Möglichkeit mathematisch abzubilden, sodass die gewonnenen Erkenntnisse zu einer optimierten und automatisierten Supportgenerierung beitragen können.

## **2 Stand der Technik**

### ***2.1 Selective Laser Melting***

#### **2.1.1 Einordnung**

Selective Laser Melting (SLM) ist ein generatives Fertigungsverfahren, welches einkomponentige, metallische Werkstoffe mittels Lasereinstrahlung selektiv vollständig verschmilzt und auf diese Art Bauteile pulverbettbasierend generieren [29]. Wie alle generativen Fertigungsverfahren zeichnet sich das SLM-Verfahren durch den schichtweisen Aufbau und den damit verbundenen, nahezu unbegrenzten Freiheiten in der Konstruktion der Bauteile aus [8,28]. Die Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass es direkt einsatzfähige, metallische Bauteile liefert [28], deren mechanische Eigenschaften denen des Ausgangswerkstoffes gleichen [27]. Somit ist es grundsätzlich möglich, mit diesem Verfahren alle Prototypenarten sowie Serienbauteile zu bedienen [9,28].

Angeboten wird diese Technologie zum Beispiel von MTT Technologies GmbH unter der Bezeichnung SLM [24], EOS GmbH unter Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [20] und Concept Laser GmbH unter Laser Cusing (LC) [17]. SLM wird als Synonym gewählt, weil es sowohl in vielen Veröffentlichungen verwendet wird als auch das Verfahren am besten beschreibt (vgl.[28]).

Angewendet wird dieses Verfahren vor allem in der Medizintechnik und dem Werkzeugbau, aber auch in der Luft- und Raumfahrt und in der Automobilindustrie [17, 20, 24]. Hierbei ist zu unterscheiden, für welche Bauteilarten das Verfahren im jeweiligen Bereich geeignet ist. Produkte herzustellen eignet sich für Anwendungsfälle, bei denen eine extrem hohe Flexibilität bei geringer Stückzahl gefordert wird, wie z.B. bei der Herstellung von Zahnkronen oder um Geometrien zu erzeugen, die anders nicht herstellbar sind. Dies ist zum Beispiel zur Herstellung von konturnahen Kühlkanälen in Spritzgussformen der Fall [21].

## 2.1.2 Verfahrensprinzip

Das Prinzip innerhalb der Generieranlage grenzt die verschiedenen Schichtbauverfahren am stärksten voneinander ab. Der spezifische Verfahrensablauf des SLM-Verfahrens wird nun erläutert.

Die Prozesskammer besteht im Wesentlichen aus einer Bauplattform, einer Beschichtungseinrichtung, einem Vorratsbehälter für den Werkstoff und einem Laserstrahl als Werkzeug, welcher über eine Ablenkeinrichtung an die gewünschte Wirkungsstelle gebracht wird. Wie die jeweiligen Elemente umgesetzt werden, variiert je nach Anlagenhersteller. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau der Prozesskammer mit den grundsätzlichen Komponenten.

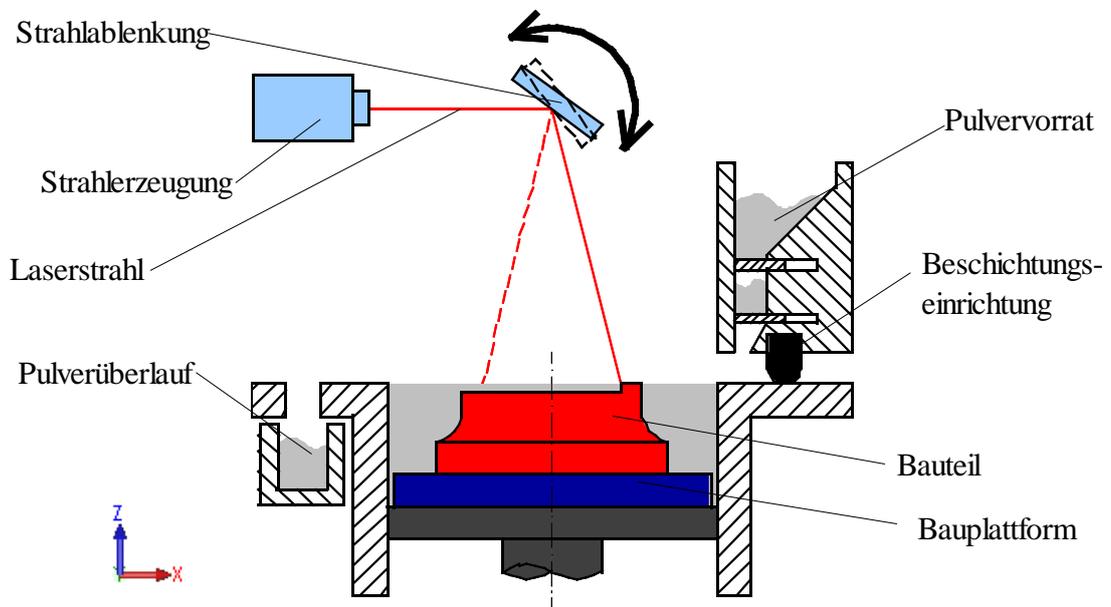


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau der Prozesskammer beim SLM [6]

Das Koordinatensystem wird im weiteren Verlauf wie in Abbildung 2.2 zu erkennen angenommen. Auf der Bauplattform wird eine der Schichtdicke entsprechende Pulverschicht aufgetragen und selektiv durch Einwirkung eines Laserstrahls verschmolzen. Der Generierprozess besteht aus drei Prozessschritten. Im ersten Schritt senkt sich die Bauplattform um die zuvor festgelegte Schichtdicke ab. Im zweiten Schritt wird mit der Beschichtungseinrichtung Pulver aus dem Vorratsbehälter parallel zur Arbeitsebene auf die Bauplattform, beziehungsweise die vorherige Schicht aufgetragen. Im letzten Schritt kommt ein Laserstrahl zum Einsatz, der das Pulver selektiv, der jeweiligen Schicht entsprechend, verschmilzt. Dieser Ablauf wiederholt

sich Schicht für Schicht, bis das Bauteil fertig gestellt ist [29].

Zur erfolgreichen Prozessführung sind jedoch zusätzliche Komponenten erforderlich [17]. Da mit Hilfe des Lasers Metall aufgeschmolzen werden muss, handelt es sich bei diesem Verfahren um einen additiven Schweißprozess. Um Oxidation zu vermeiden, findet der SLM-Prozess in einer nahezu sauerstofffreien Atmosphäre statt [35]. Somit ist in der Prozesskammer eine Schutzgasführung umzusetzen. Um die Linse vor einer Verunreinigung durch entstehende Schweißspratzer zu schützen, wird das Schutzgas entsprechend geleitet. Als Laserstrahlquelle wird ein Yb-Faserlaser mit einer Laserleistung von bis zu 400 W [17,20,24] aufgrund seiner hohen Strahlqualität eingesetzt [17]. Selbstverständlich muss der Strahl, wie bei anderen Laseranwendungen auch geformt und fokussiert werden [18]. Die Strahlablenkung, auch Scankopf genannt, verfügt über zwei Spiegel, mit denen er den Laserstrahl mit bis zu 3 m/s in der x/y- Ebene platzieren kann. Eine sogenannte F-Theta-Linse sorgt dafür, dass der Laserstrahl unabhängig von seiner Auslenkung durch die Spiegel rund und nicht elliptisch auf die zu bearbeitende Ebene trifft.

### **2.1.3 Prozesskette**

Der Weg vom CAD-Modell bis zum mittels SLM generierten Bauteile erfordert mehrere Prozessschritte. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Zunächst ist ein dreidimensionales Modell des herzustellenden Bauteils notwendig. Üblicherweise wird das Modell über das STL-Datenformat, welches die Bauteiloberfläche in Form von Dreiecken beschreibt, an die Aufbereitungssoftware, welche den Maschinendatensatz berechnet, übergeben. Über die Anzahl der verwendeten Dreiecke kann die Abbildungsgenauigkeit des Modells beeinflusst werden. Je höher die Anzahl der Dreiecke ist, desto genauer wird das Modell abgebildet und desto größer wird die erzeugte Datenmenge [8,28].

Um das Modell schichtweise fertigen zu können, muss es zunächst im Bauraum

orientiert werden. Anschließend können verfahrensbedingt notwendige Stützstrukturen (Supports) angebracht werden. Aus welchem Grund diese notwendig sind und wie sie erzeugt werden, wird später näher erläutert. Somit ist das auf der SLM-Anlage zu generierende Modell vollständig dreidimensional beschrieben. Diese dreidimensionale Geometrie muss in Aufbaurichtung in Schichten zerschnitten (gesliced) werden, damit sie schichtweise hergestellt werden kann. Die entstandene 2,5D Darstellung bildet die Konturen des Bauteils orthogonal zur Aufbaurichtung in einem definierten Abstand ab, jedoch nur in einer Ausrichtung des Bauteils im Bauraum. Der Abstand spiegelt die Schichtdicke wieder [28]. Sind die Konturen für jede Schicht erzeugt, muss eine Strategie ausgewählt werden, um diese auszufüllen, da der Laserstrahl nur punktförmig zum Einsatz kommen kann. Es müssen einzelne Vektoren erzeugt werden, welche die Belichtungsbahnen definieren (hatching). Somit sind alle Daten vorbereitet und das Bauteil kann generiert werden. Da es sich um einen direkten Prozess handelt, ist durch den Generierprozess ein einsatzfähiges Bauteil entstanden [28], wobei alle Endbearbeitungen als optional und dem Anwendungsfall entsprechend anzusehen sind. In Abbildung 2.1 ist diese Prozesskette schematisch dargestellt.

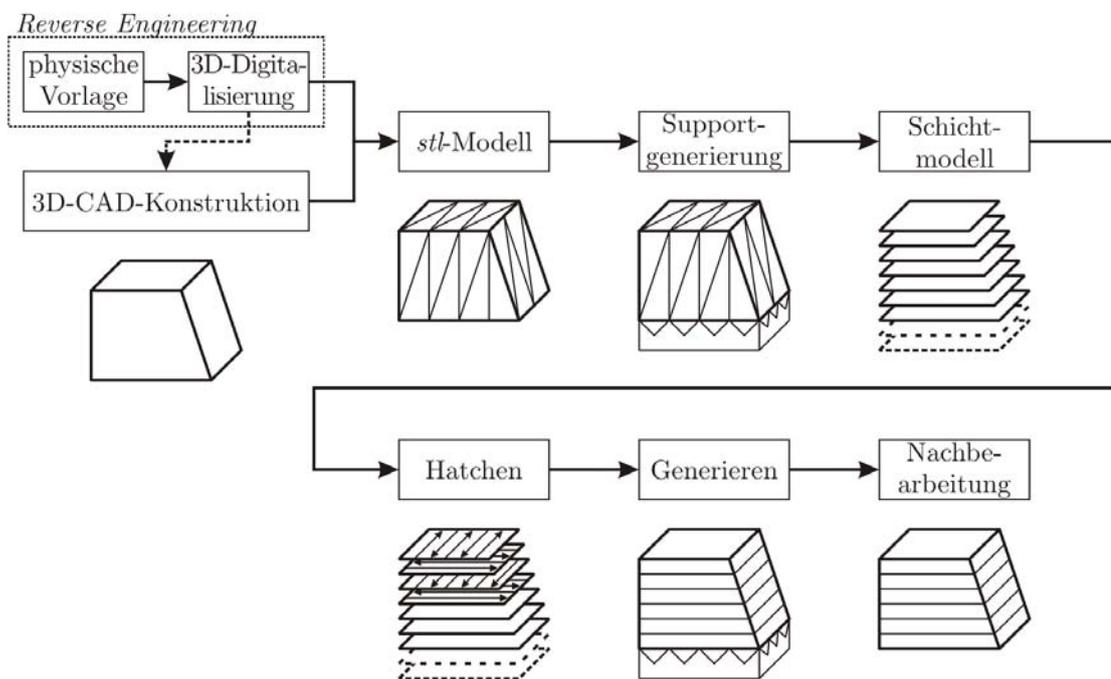


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Bauteilen mittels Selective Laser Melting [16]

## **2.1.4 Auswirkung der Prozessparameter**

Bei diesem Verfahren ist eine Bauteildichte von nahezu 100% zu realisieren, wobei die Belichtungsstrategie einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Neben der eingebrachten Energie, bestehend aus Laserleistung und Belichtungsgeschwindigkeit, gehören Vektorabstand, Anordnung sowie die Schichtdicke zu den Steuerparametern, mit welchen die Bauteilqualität beeinflusst werden kann [5,12,16,30,31,33,36].

Durch den schichtweisen Aufbau ergeben sich richtungsabhängige Bauteileigenschaften, je nachdem, wie das Bauteil im Bauraum orientiert wird [31,36]. Zusätzlich beeinflusst die Ausrichtung die Bauzeit und somit die Kosten [28]. Wäre ein Bauteil mit einer höheren Schichtanzahl als notwendig aufgebaut, müsste zum Einen die Beschichtungseinrichtung öfter und somit länger verfahren und zum Anderen eine größere Menge an Werkstoff bereitgestellt und aufbereitet werden. Die Genauigkeit orthogonal zur Aufbaurichtung ist vom Werkzeug abhängig, dass die Kontur der jeweiligen Schicht abbildet, wobei die Genauigkeit in Aufbaurichtung von der Schichtdicke abhängig ist. Häufig verwendet werden Schichtdicken von 0,02 mm bis 0,05 mm verwendet [3,5]. Beim SLM-Verfahren hängen die mechanischen Eigenschaften von der Aufbaurichtung ab [32]. Die erreichbaren Oberflächen sind ebenfalls richtungsabhängig [14], da diese je nach Ausrichtung unterschiedliche Schmelzbilder aufweisen und sich aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Treppenstufeneffekt ausbildet. Allgemein sind die erreichbaren Oberflächen abhängig vom verwendeten Werkstoff [27], von der Pulverkorngroße, der Schichtdicke und den Belichtungsparametern [12]. Sie sind deutlich schlechter als zum Beispiel durch spannende Verfahren erzeugte Oberflächen [12,16,35].

## **2.1.5 Thermisch-induzierte Spannungen**

Da beim SLM Schicht für Schicht Schmelzspuren auf einer bereits erstarrten Schicht erzeugt werden, entstehen erhebliche Spannungen im Bauteil [13]. Durch geeignete Wahl der Belichtungsparameter und -strategie lassen sich entstehende Spannungen im Bauteil verringern. Es lässt sich jedoch nicht vollständig verhindern, dass diese thermisch-induziert werden [5,12,13]. Die Schicht, welche gerade belichtet wurde, hat

eine höhere Temperatur als die zuvor belichtete Schicht. Die Wirkung des sogenannten *temperature gradient mechanism* wird nach [12] schematisch in folgender Abbildung dargestellt.

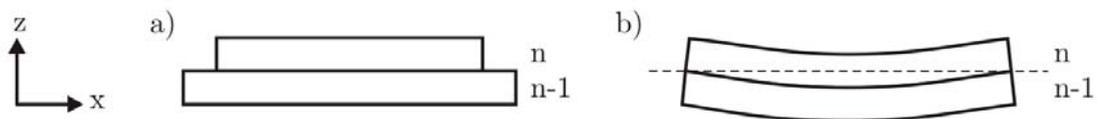


Abbildung 2.3: Schematisches Verhalten zwei belichteter Schichten [12]

Nach einer gewissen Abkühlungszeit erreichen beide Schichten die Umgebungstemperatur. Die zuletzt belichtete Schicht neigt zu einer größeren Kontraktion als die vorherige, welche aber durch den festen Werkstoffverbund behindert wird. Somit wird eine Zugspannung eingebracht, welche das Bestreben hat, das Bauteil wie in Abbildung 2.1 dargestellt, zu deformieren. Diesem Verhalten kann lediglich ein genügend steifer Untergrund zur Aufnahme der Spannungen entgegenwirken [12]. Die Deformation durch thermisch-induzierte Spannung ist somit bei Geometrien kritisch, welche in Richtung der Bauplattform keine flächige Abstützung besitzen. Dies bedeutet, dass Schichten, welche über keine ausreichende Anbindung verfügen, sich ungehindert aufgrund ihrer Kontraktion deformieren können. Somit bewirkt eine unzureichende Abstützung, dass das Bauteil geometrisch nicht korrekt aufgebaut wird. Wenn die Abweichung von der gewünschten Geometrie größer als eine Schichtdicke in z-Richtung wird, kollidiert der Beschichter mit dem Bauteil bei der nächsten Beschichtung. Dies kann sowohl das Bauteil, als auch Anlagenkomponenten beschädigen und erzwingt in der Regel einen Abbruch des Bauprozesses (vgl.[12]).

### 2.1.6 Abstützungsbedürftige Geometrien

Eine kritische Abstützung hinsichtlich der thermisch-induzierten Spannungen ist gegeben, wenn das Bauteil überhängende Geometrien besitzt oder wenn es zwecks späterer Entfernung nicht direkt mit der Bauplattform verbunden werden soll. Das Pulverbett kann den entstehenden Kräften keine Stützwirkung bieten [12]. Zusätzlich ist zu beachten, dass das Pulverbett das entstehende Bauteil thermisch isoliert und die eingebrachte Wärme im Gegensatz zum Feststoff nur sehr schlecht ableiten kann

[7,10]. Folgende Abbildung verdeutlicht, wie sich überkragende Geometrien am CAD-Modell auf die miteinander zu verschweißenden Schichten im SLM-Prozess auswirken.

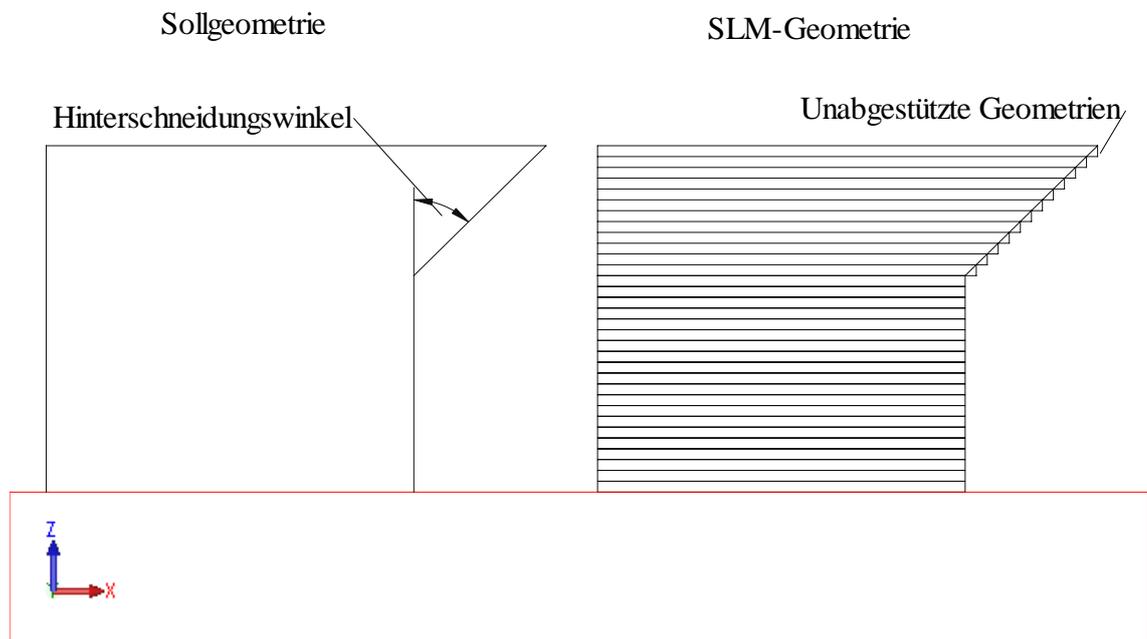


Abbildung 2.4: Auswirkung der Schichtbildung auf Überhänge [12]

Eine Hinterschneidung bringt im SLM-Prozess, aufgrund des schichtweisen Aufbaus, im Pulverbett frei hängende Abschnitte mit sich. Wie weit diese Elemente frei in das Pulverbett hineinragen ist vor allem vom Hinterschneidungswinkel abhängig. Bestehende Untersuchungen haben ergeben, dass Überhänge bis zu einem Hinterschneidungswinkel von ca.  $50^\circ$  eine hinreichende Abstützung erfahren und problemlos herzustellen sind [12]. Diese Untersuchungen wurden jedoch mit einer Schichtdicke von 0,3 mm durchgeführt. Da der Überhang einer Schicht bei identischem Neigungswinkel proportional zur Schichtdicke ist, können mit der üblicherweise verwendeten Schichtdicke von 0,03 mm Hinterschneidungswinkel von bis zu  $60^\circ$  hergestellt und Innendurchmesser von 8 mm realisiert werden [17].

Somit ergeben sich beim SLM Einschränkungen in der umzusetzenden Geometrievielfalt, wenn Überhänge gefertigt werden. Wie trotz dieser Einschränkungen Bauteile mit nahezu beliebiger Geometrie gefertigt werden können, wird in folgendem Abschnitt erläutert.

## **2.2 Stützstrukturen**

Geometrien mittels SLM zu erzeugen hat wie erläutert anderen Verfahren gegenüber auf Grund des schichtweisen Aufbaus Vorteile. Um diese jedoch vollkommen nutzen zu können, müssen Geometrien, welche den thermisch-induzierten Spannungen nicht standhalten können, unterstützt werden. Außerdem muss dafür gesorgt werden, dass die entstehende Wärme hinreichend abgeleitet wird. Wie dies umgesetzt werden kann, wird in diesem Abschnitt behandelt.

### **2.2.1 Definition Supportstrukturen**

Supportstrukturen sind Elemente, die zur Abstützung auskragender Elemente in Richtung der Bauplattform dienen. Diese gehören nicht zum gewünschten Bauteil, und sind daher nach dem Bauprozess zu entfernen, wobei sie die abgestützte Oberfläche beeinträchtigen können [28]. Mittels Softwaretools modellierte Supportstrukturen für das SLM-Verfahren sind Geometrien, welche im Gegensatz zu den Bauteilen nur aus einzelnen Belichtungsvektoren und nicht aus ausgefüllten Flächen bestehen.

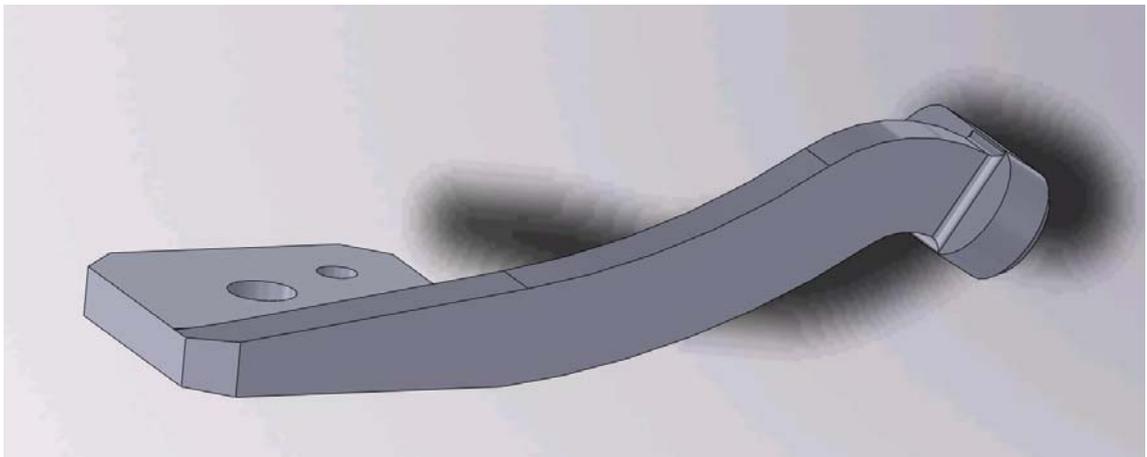
### **2.2.2 Strategien zur Abstützung**

Soll das Potential des schichtweisen Aufbaus und die damit verbundenen geometrischen Freiheiten am Bauteil vollständig ausgeschöpft werden, muss eine hinreichende Abstützung in Richtung der Bauplattform sicher gestellt werden. Hierzu müssen Hinterschneidungen unterstützt werden, wenn das Bauteil nicht so im Bauraum orientiert werden kann, dass keine Hinterschneidungswinkel von über 50° entstehen.

Die Abstützung dieser Überhänge kann massiv über eine konstruktive Änderung des Bauteils erzielt werden, wobei das Bauteil an den Überhängen in Richtung der Bauplattform verlängert wird [17]. Somit werden die Überhänge eliminiert und es entsteht zusätzlicher Materialverbrauch. Das Bauteil muss anschließend mechanisch nachbearbeitet werden, sodass die gewünschte Bauteilgeometrie entsteht.

Eine andere Variante ist es, Überhänge mit dünnen Strukturen zu unterstützen, welche zum Einen weniger Material und Bauzeit als massive Elemente in Anspruch nehmen und zum Anderen nach dem Bauprozess manuell zu entfernen sind. Solche Supportstrukturen sollten der Scherkraft, beziehungsweise dem Biegemoment beim Entfernen nur wenig Widerstand leisten können. Somit werden diese Strukturen aus einzelnen Belichtungsvektoren hergestellt, da auf diese Weise beim SLM die schlankesten Geometrien erzeugt werden können. Um großflächige Überhänge zu unterstützen werden mehrerer solcher Supports zueinander angeordnet, sodass in jeder Schicht ein grobes Gitter aus Vektoren entsteht. Werden Supportstrukturen verwendet, ist neben der Aufnahme der Kräfte durch thermisch-induzierte Spannungen ein zusätzlicher Aspekt zu beachten. Bereiche, welche nicht direkt mit den Stützen verbunden sind, unterliegen unterschiedlichen Wärmeleitbedingungen, da dort die Wärme zunehmend über das Pulverbett abgeleitet werden muss. Somit ergibt sich bei zu großem Abstand der Supportstrukturen zueinander eine schlechte Qualität der Anbindungsoberfläche [12].

In folgenden Abbildungen sind die beiden verschiedenen Vorgehensweisen zur Unterstützung von Überhängen dargestellt. Ein beispielhaftes Bauteil ist mittels SLM herzustellen und soll zunächst so im Bauraum orientiert werden, dass möglichst wenig Überhänge entstehen.



*Abbildung 2.5: Zu unterstützendes Bauteil [21]*

Dieses Bauteil ist in keiner Orientierung ohne überhängende Geometrien zu realisieren. Um die überhängenden Bereiche und die Bauzeit so gering wie möglich zu halten, muss das Bauteil so orientiert werden, dass es an seinen Funktionsflächen zu unterstützen ist.

Sind die Anforderungen an diese Flächen hinsichtlich der Oberflächengüte und Maßhaltigkeit so hoch, dass sie mittels SLM nicht erreicht werden können, müssen diese unabhängig von der Unterstützung nachbearbeitet werden. In diesem Fall bietet sich eine wie in Abbildung 2.6 dargestellte massive Unterstützung der Überhänge an.

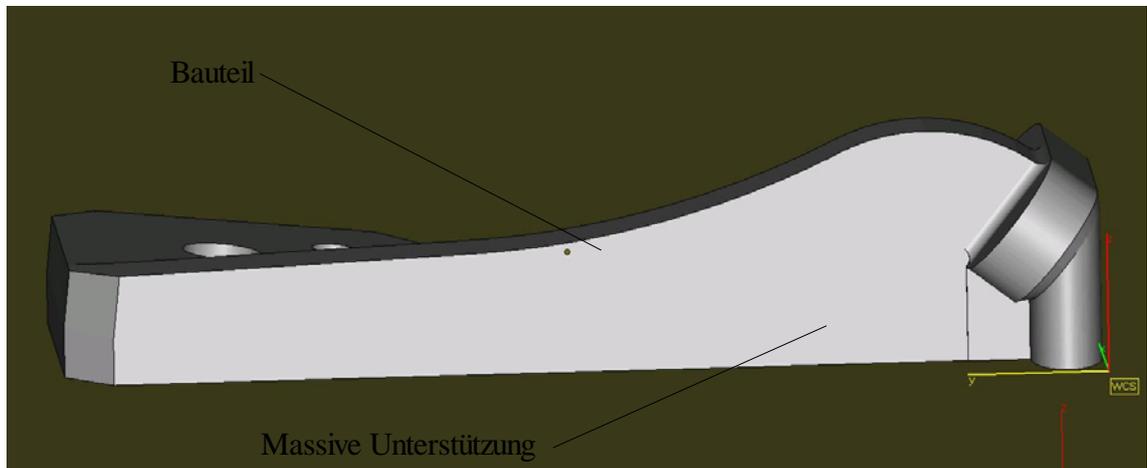


Abbildung 2.6: Massive Abstützung von Überhängen [21]

Soll nur ein manuelles Finishing und keine maschinelle Nacharbeit realisiert werden, können die Überhänge, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, mittels Supportstrukturen abgestützt werden.

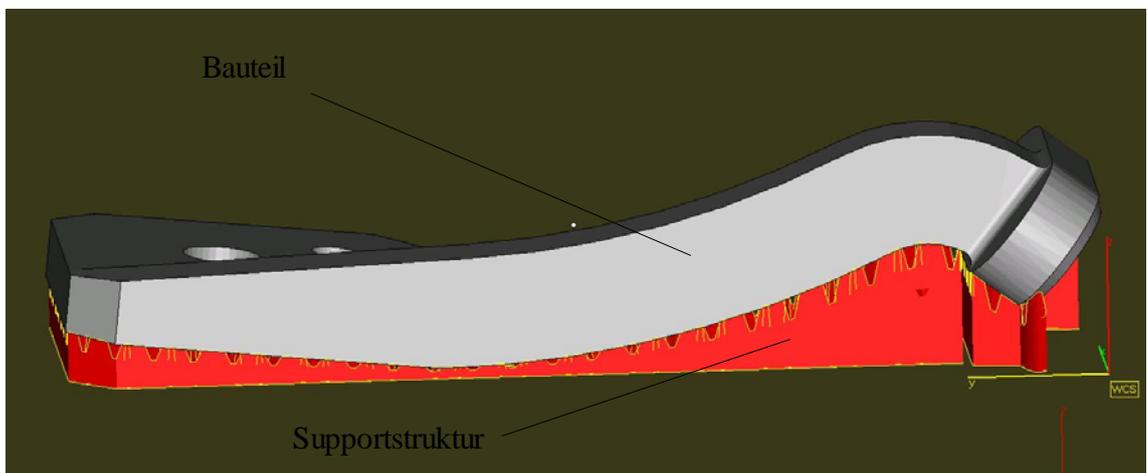


Abbildung 2.7: Mittels Supportgenerator erstellte Abstützung von Überhängen [21]

Die rot eingefärbten, perforierten Elemente bilden hier eine wabenförmige Struktur bestehend aus einzelnen Stegen. Sie lassen sich manuell vom Bauteil entfernen, sodass das Bauteil ohne den Einsatz von zusätzlichen Werkzeugmaschinen fertiggestellt werden kann.

### 2.2.3 Modellierung von Supportstrukturen

Softwarelösungen, um Supportstrukturen automatisiert am Bauteil zu realisieren, sind zum Beispiel Magics von Materialise oder Autofab von Marcam Engineering [22,23]. Diese Tools können Überhänge automatisch erkennen und diese je nach Geometrie mit unterschiedlichen Konzepten unterstützen. Die Supportgenerierung mit Hilfe von Magics wird im folgenden beschrieben.

Die Supportgenerierung erfolgt auf der Basis der STL-Daten nachdem das Bauteil im Bauraum orientiert und platziert wurde. Überhängende Flächen werden vom Supportgenerator anhand des Winkels automatisch erkannt und unterstützt. Eine andere Möglichkeit ist, die zu unterstützenden Flächen manuell auszuwählen. Je nachdem, welche Geometrie die zu unterstützende Fläche hat, werden standardmäßig unterschiedliche Raster angeboten, beziehungsweise automatisch generiert. Es können beispielsweise Punkte, Linien oder Flächen abgestützt werden, wobei Flächen in Abhängigkeit ihrer Kontur ein entsprechendes Raster zugewiesen wird. Wesentliche Parameter zur Anpassung der Supportgeometrie sind der Abstand der Supports zueinander und die Perforation der Bauteilanbindung zur leichteren Entfernung.

Sind die Supportstrukturen definiert, kann das Bauteil sowie die Supportstruktur gesliced werden, wobei die Supportstruktur in einer separaten Datei abgelegt wird. Im SLM Prozess können den Supports vom Bauteil abweichende Belichtungsparameter zugewiesen werden.

Der Anwender hat diverse Möglichkeiten, die Supportgeometrien nach seinen Wünschen zu konfigurieren. Es wird somit nur ein Grundgerüst zur Verfügung gestellt, welches vom Anwender in der Regel nach Erfahrungswerten angepasst werden muss [17]. Dies hat zur Folge, dass die Anwendung einer solchen Software zur Supportgenerierung weder einen prozessstabilen Aufbau des Bauteils noch die möglichst einfache und rückstandslose Entfernung der Supports garantiert. Somit ist es nicht unüblich, unterstützungsbedürftige Bauteile aufgrund suboptimaler Supportanbringung mehrmals mit iterativ angepassten Supports herstellen zu müssen, um ein fehlerfreies Bauteil zu erhalten [1].

### 3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, die Anbringung von Supportstrukturen an mittels SLM hergestellten Bauteilen nach Festigkeitskriterien auszulegen, sodass bauteilbedingte Kräfte gezielt aufgenommen werden können. Ziel der Untersuchung ist es, die Festigkeit von Supportstrukturen experimentell zu ermitteln.

Im ersten Teil wird dafür untersucht, wie sich verschiedene Prozessparameter auf die Geometrie und Prozessstabilität der Strukturen auswirken. Dies geschieht indem Supports verschiedener Geometrien und Ausrichtungen zur Beschichtungsrichtung mit unterschiedlichen Belichtungsparametern aufgebaut und anschließend ausgewertet werden. Es soll festgestellt werden, welche Parameter prozessstabil Supportstrukturen erzeugen. Auf diese Weise wird eingegrenzt, welcher Bereich des Energieeintrags oder gegebenenfalls der Belichtungsparameter einzeln betrachtet als geeignet zur Erzeugung von Stützgeometrien einzustufen ist. Hauptsächlich soll jedoch die Breite der Schmelzspuren in Abhängigkeit des Energieeintrags ermittelt werden, sodass berechnet werden kann, welche Stützwirkung von diesen Geometrien zu erwarten ist.

Im zweiten Teil wird die errechneten Festigkeiten in Abhängigkeit der Belichtungsparameter validiert. Hierzu werden mittels der zuvor als stabil eingestuftem Belichtungsparameter Zugproben hergestellt und geprüft. Somit wird der Bezug zwischen den berechneten Werten und den tatsächlichen Zugfestigkeiten der Supports hergestellt. Neben der Zugfestigkeit, welche für die Abstützung der Bauteile verantwortlich ist, werden in diesem Schritt auch andere Werkstoffkennwerte ermittelt und mit den allgemeinen Werkstoffkennwerten verglichen.

Nach Möglichkeit sollen durch diese Vorgehensweise Berechnungsgrundlagen zur Beschreibung der Schmelzspurbreite sowie der Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Belichtungsparameter erarbeitet werden.

In Abbildung 3.1 ist die beschriebene Vorgehensweise schematisch dargestellt.

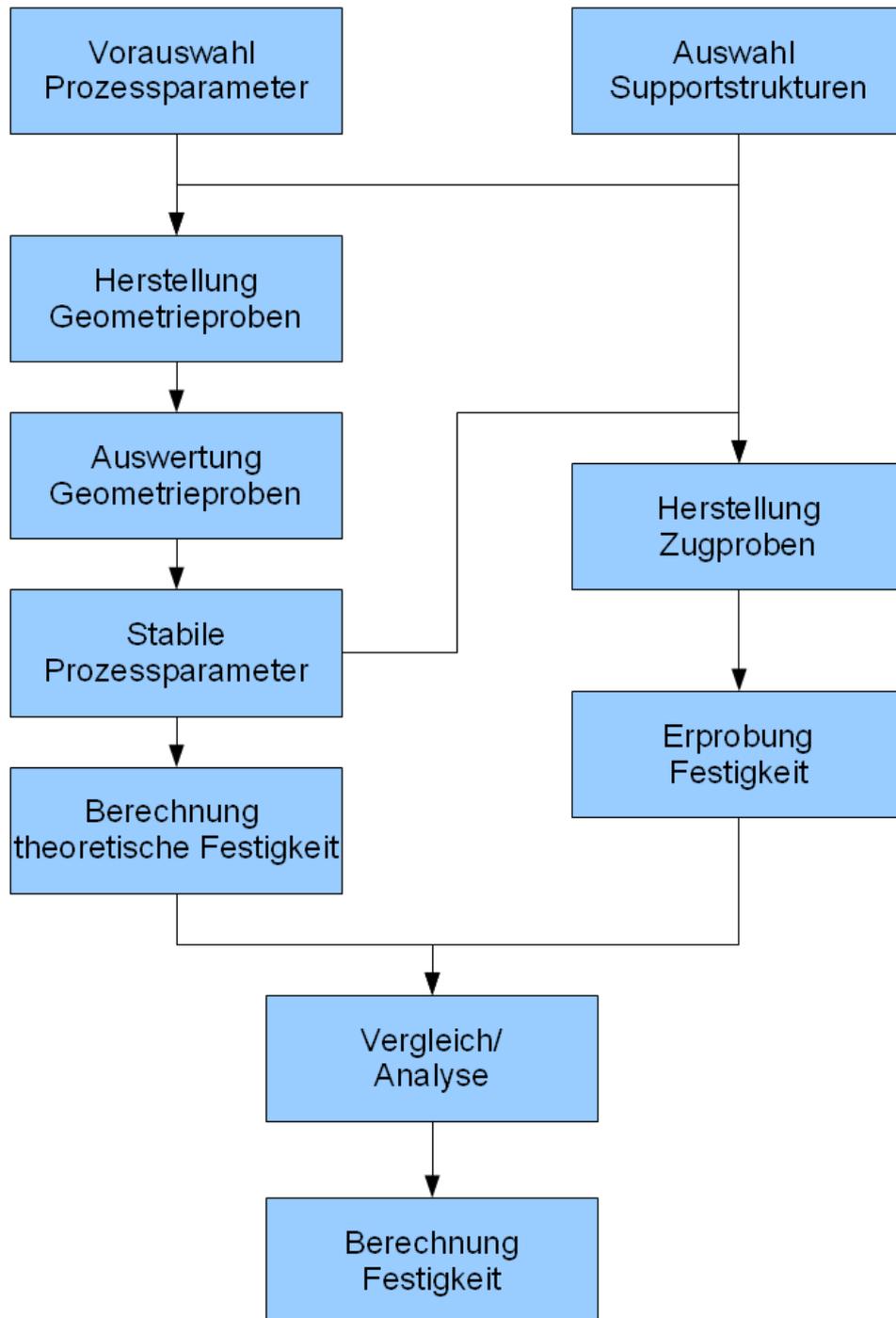


Abbildung 3.1: Vorgehensweise zur Untersuchung von Supportstrukturen

## 4 Randbedingungen der experimentellen Untersuchung

Um die gewonnenen Erkenntnisse einordnen und sie miteinander vergleichen zu können, werden in den folgenden Versuchen alle bis auf die zu untersuchenden Einflussgrößen konstant gehalten. Hier werden alle verwendeten Komponenten, Einflussgrößen und Parameter, welche sich in den Versuche unverändert auswirken, festgehalten.

### 4.1 Anlagenkonfiguration

Die Probekörper werden auf einer SLM-Anlage des Herstellers Concept-Laser GmbH gefertigt. Es handelt sich um das Modell M3-linear, Baujahr 2008. Diese Anlage ist bei der Firma IES GmbH aufgestellt und kann genutzt werden. Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Aufbau dieser Anlage.

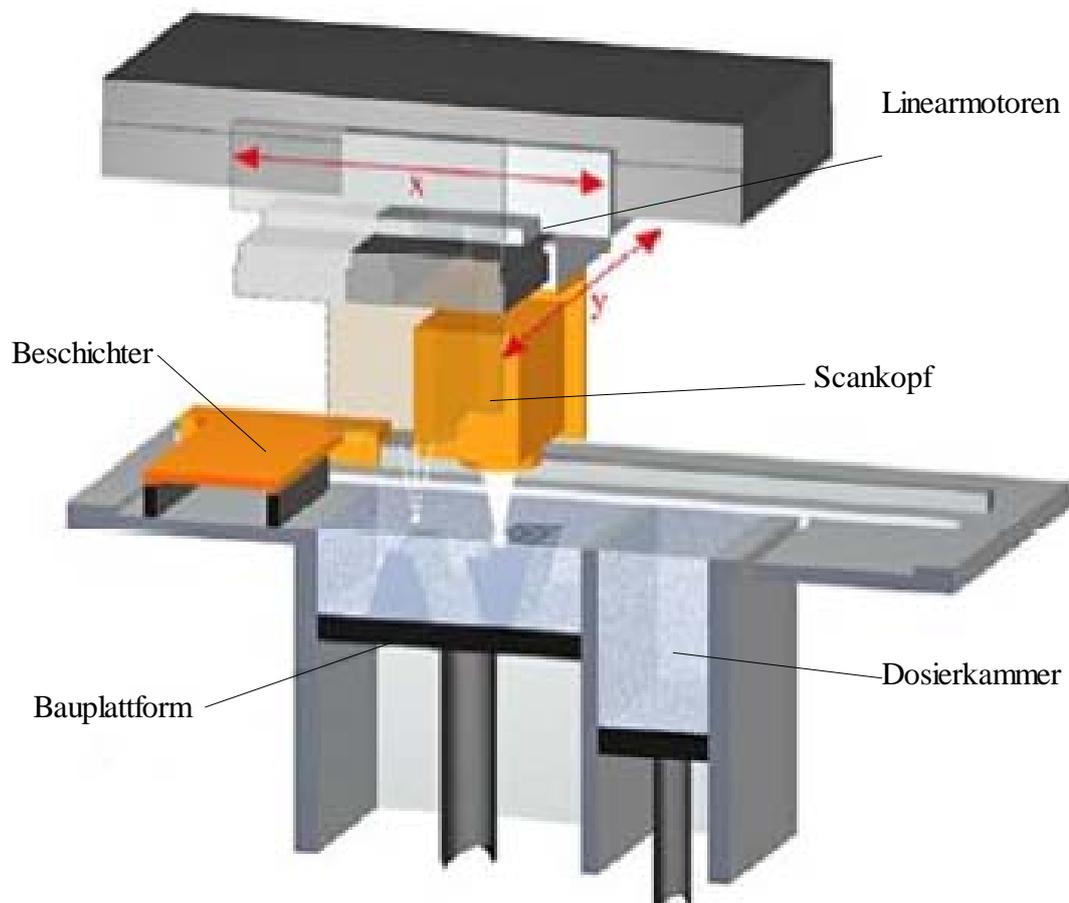


Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau der M3-linear [17]

Die Anlage verfügt über eine Bauraumgröße von ca. 250x250x250 mm [x/y/z]. Es ist ein 200 W Yb-Faserlaser des Herstellers Rofin verbaut. Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass der Scankopf auf Linearmotoren gelagert ist und somit die Optik immer bestmöglich über der zu belichtenden Fläche positioniert wird. Die Fläche, welche aus einer Position belichtet wird (Quadrant), kann nach Benutzerwunsch angepasst werden. Die Strahlführung wird bis hin zum Scankopf mittels einem Lichtleitkabel umgesetzt, wodurch eine Verlustleistungen und die Störanfälligkeit durch Verschmutzung reduziert werden kann. Die Pulverbevorratung wird hier mit Hilfe einer zusätzlichen, in z-Richtung verfahrbaren Plattform umgesetzt, welche neben der Bauplattform angeordnet ist. Diese bewegt sich im Bauprozess entgegengesetzt der Bauplattform, damit der Beschichter Pulver aufnehmen und auf der Bauplattform ablegen kann. Als Inertgas dient Stickstoff, welcher durch einen Stickstoffgenerator erzeugt wird. Dieser wird über einen Anschluss in die Prozesskammer eingekoppelt. Eine Absaugeinrichtung, welche am Scankopf befestigt ist, sorgt dafür, dass das Inertgas definiert zirkuliert.

Die Bauplattform, die Dosierkammer und der Beschichter sind in einem auskoppelbaren Modul untergebracht. Abbildung 4.2 zeigt die Anlage mit ausgekoppeltem Modul.



Abbildung 4.2: M3-linear während eines Auf-/Abrüstvorgangs [21]

Somit ist der Bauraum zum Auf- und Abrüsten sehr gut zugänglich. Durch diese Konfiguration ist die Anlage durch einen Modultausch auf einen Bauraum von 350x350x250 mm [x/y/z] für das Lasergenerieren aufrüstbar oder auf ca. 450x450 mm [x/y] um Lasergravuren vorzunehmen oder dreidimensional abzutragen. Abtragen ist jedoch mit der verwendeten Laserkonfiguration nicht möglich, da dieser nur im cw-Modus betrieben werden kann.

Zur Positionierung der generierten Bauteile ist das Modul mit einem Nullpunktspannsystem des Herstellers EROWA ausgerüstet. Dies begünstigt das Einmessen von Grundkörpern sowie die Folgebearbeitungen der mittels SLM aufgebauten Bauteilen auf anderen Werkzeugmaschinen.

## 4.2 Werkstoff

Bei dem verwendeten Werkstoff handelt es sich um den für Funktionsbauteile gängigen 1.4404 Edelstahl. Die Charge, welche für die Versuche verwendet wird, wurde über den Anlagehersteller MTT Technologies GmbH bezogen, wo er unter der amerikanischen Bezeichnung 316L gehandelt wird. Es stehen ca. 15 kg mit einem Korngrößenverteilung von 25 µm bis 60 µm zur Verfügung. Tabelle 4.1 zeigt die angegebenen Werkstoffkenndaten.

Tabelle 4.1: Mechanische Daten 1.4404 nach [27]

Zugfestigkeit $R_m$	625 (+/-30) MPa
Dehngrenze $R_{p0,2}$	525 (+/-30) MPa
Härte	237 HV (+/-4)
(Kerb) Schlagarbeit	75 (+/-4) J
Wärmeleitfähigkeit	15 W/mK
Rauigkeit x/y $R_z$	16 (+/-2) µm
Rauigkeit z $R_z$	38 (+/-4) µm

### **4.3 Prozessparameter**

Der Werkstoff wird vor jedem Bauprozess mit einem Handsieb der Maschenweite 100  $\mu\text{m}$  aufbereitet. Die Beschichtung wird mit einer flexiblen Beschichter Klinge vorgenommen, um die filigranen Strukturen bei der Beschichtung nicht zu beschädigen. Der Restsauerstoffgehalt wird konstant unter 0,2% gehalten. Alle Probekörper werden mit einer Schichtdicke von 30  $\mu\text{m}$  hergestellt. Die Quadrantengröße wird auf 50x50 mm gesetzt. Somit ist die Fläche, welche in einer Position der Linearmotoren belichtet wird, niemals größer als 50x50 mm. Dies bewirkt einerseits, dass die Auslenkung des Laserstrahls nicht mehr als 5,6° von der lotrechten Einstrahlung beträgt und andererseits, dass das Absauggebläse optimal über der Belichtungsfläche positioniert wird. Diese Parameter werden üblicherweise gewählt um bestmögliche Bauteilergebnisse zu erzielen [17].

### **4.4 Messeinrichtungen**

#### **4.4.1 Optisches Messgerät**

Zur optischen Vermessung steht ein optisches Messgerät des Herstellers Leitz mit einer variablen Vergrößerung im Hause der HAW Bergedorf in der Abteilung für Metallographie von Herrn Dr. Bober zur Verfügung. Zur Vermessung der Proben wird eine 25-fache Vergrößerung eingestellt. Die Achsanzeigen haben eine Auflösung von 0,001 mm. Außerdem ist das Messgerät mit einer Kamera ausgestattet, sodass computergestützt Fotos erstellt werden können.

#### **4.4.2 Zugprüfmaschine**

Zur Zugprüfung steht im Institut für Zuverlässigkeitstechnik an der TUHH eine Zugprüfmaschine des Herstellers Zwick Roell AG zur Verfügung. Es handelt sich um das Modell Z010, eine Tischprüfmaschine mit zwei Säulen und elektromechanischem Antrieb. Sie ist für eine maximale Prüfkraft von 10 kN ausgelegt und arbeitet mit einer Traversenauflösung von 0,095  $\mu\text{m}$ . Die Messungen können computergestützt über die Software testXpert2 vorgenommen werden. Die Aufzeichnung eines Kraft/Weg-

Diagramms und Ausgabe zur Weiterverarbeitung wird unterstützt. Die Kraftmessung wird mittels Kraftaufnehmer vorgenommen und die Wegmessung wird über den Traversenweg realisiert [26].

#### **4.5 Hilfsmittel**

Zur Aufbereitung der Probekörper nach dem Generieren ist aufgrund des festen Verbundes mit der Bauplattform das Verfahren Drahterodieren geeignet. Neben der SLM-Anlage zur Probenherstellung wird auch eine Drahterodiermaschine von der Firma IES GmbH zur Verfügung gestellt. Diese verfügt ebenfalls über das Nullpunktspannsystem und lässt somit eine optimale Aufbereitung der Proben zu.

Zum Heißeinbettversuche stehen im Hause der HAW Bergedorf in der Abteilung für Metallographie von Herrn Dr. Bober Möglichkeiten zur Verfügung, sodass Proben aufbereitet werden können.

Kalteinbetten kann im Hause der TUHH im iLAS durchgeführt werden, sodass alternativ auch Proben auf diesem Wege aufbereitet werden können.

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Der Verzug der Bauteile, verursacht eine kritische Zugkraft in Aufbaurichtung. Somit ist von den Supports eine Zugkraft aufzunehmen. Folgende Untersuchungen zielen darauf ab festzustellen, wie groß die Kraftaufnahme der Supports in Aufbaurichtung angenommen werden kann.

### 5.1 Geometrische Untersuchungen

Um auf die mögliche Kraftaufnahme von Supportstrukturen schließen zu können, muss zunächst die Geometrie untersucht werden. In diesem Abschnitt wird für die getroffenen Randbedingungen ermittelt, wie sich die manipulierbaren Prozessparameter auf die Geometrie von repräsentativen Strukturen auswirken.

#### 5.1.1 Grundlagen

Im Gegensatz zu kompletten Bauteilen ist die Geometrie von Supportstrukturen nur bedingt durch die vorher erzeugten Schichtdaten beeinflussbar. Die Position im Bauraum, an der der Laserstrahl einwirkt, ist fest definiert. Auch die Aufbauhöhe ist durch die Schichtdicke und die Anzahl der Schichten festgelegt. Zur Aufnahme der entstehenden Zugkräfte ist jedoch die Querschnittsfläche der Supports in der x/y-Ebene ausschlaggebend. Diese ist durch die im Vorfeld erzeugten Schichtdaten nur eindimensional definierbar, da lediglich ein Vektor mit Länge und Position festgelegt werden kann.

Die Querschnittsfläche eines Supports  $A_s$  setzt sich zusammen aus der Länge des Belichtungsvektors  $v_l$  und der Schmelzspurbreite  $b_s$ . Endet der Belichtungsvektor im Freien, bildet sich dort die Schmelzspur aufgrund des runden Laserstrahls ebenso aus. Abbildung 5.1 stellt dies schematisch dar.

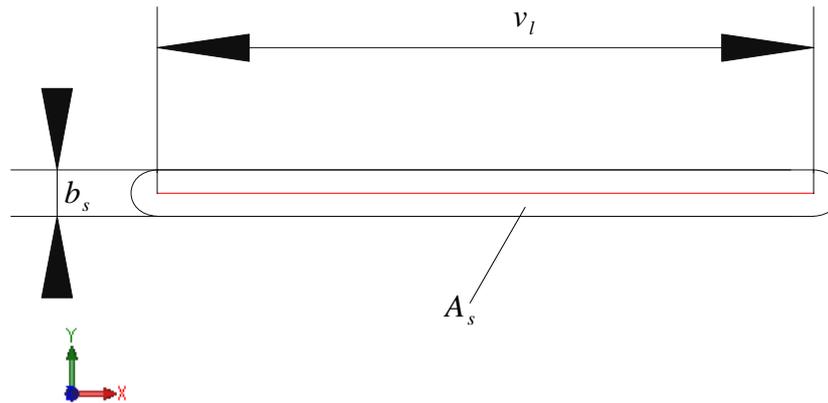


Abbildung 5.1: Schmelzbadausdehnung um den Belichtungsvektor

Die Querschnittsfläche setzt sich somit wie folgt aus zwei Komponenten zusammen.

$$A_s = v_l \cdot b_s + b_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (5.1)$$

Die Breite  $b_s$  der Schmelzspur ist hauptsächlich von der eingebrachten Energie des Werkstoffes und seiner Korngröße abhängig. Da die Werkstoffcharge sowie die verwendete Anlage für alle Untersuchungen konstant gehalten werden, ergeben sich die Laserleistung  $P_l$  und die Belichtungsgeschwindigkeit  $v_s$  zu den maßgebenden und somit zu den zu untersuchenden Parametern. Die eingebrachte Energie berechnet sich zu

$$E_m = \frac{P_l \cdot d_f}{v_s} \quad (5.2)$$

(vgl. [16,32]) wobei der Fokussdurchmesser  $d_f$  hier ebenfalls als konstant anzusehen ist. Da die Schichtdicke ebenfalls konstant gehalten wird, der Energieeintrag hauptsächlich zum Vergleich der Belichtungsparameter genutzt wird und nur jeweils ein Vektor zu belichten ist, deckt diese Gleichung alle relevanten Einflussgrößen ab. Mit steigendem Energieeintrag ist ein logarithmisch verlaufender Anstieg der Schmelzspurbreite zu erwarten [32]. Da die Schmelzspurbreite jedoch von weiteren Parametern abhängt, ist nicht zu erwarten, dass bisherige Untersuchungen die vorhandene Werkstoff- und Anlagengegebenheit abdecken. Somit ist im Weiteren in einer Testreihe die Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Belichtungsparameter zu ermitteln. Zusätzlich wird die Prozessstabilität der verschiedenen Parameter untersucht, um den praktischen Einsatz einschätzen zu können.

## 5.1.2 Vorbereitung

Zunächst müssen die zu untersuchenden Geometrien festgelegt werden. Da während des Bauprozesses Kräfte vom Beschichter auf das Bauteil wirken, wird einbezogen, wie sich die Ausrichtung der Strukturen zur Beschichtungsrichtung auswirkt. Um ein Spektrum des Einsatzgebietes von Supports abzudecken, werden, die in Abbildung 5.2 dargestellten, Geometrien für die Testreihe mit einer Höhe von 5 mm festgelegt.

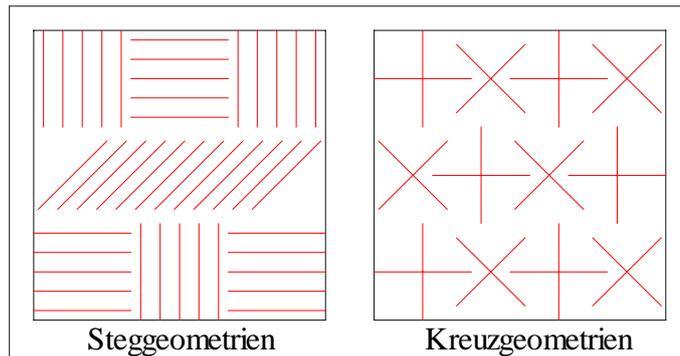


Abbildung 5.2: Probengeometrie zur Ermittlung der Schmelzspurbreite

Es werden für jeden Parameter sowohl Stege als auch Kreuze untersucht und diese jeweils parallel, rechtwinklig und in einem Winkel von  $45^\circ$  zum Beschichter ausgerichtet. Alle Belichtungsvektoren haben eine Länge von 5 mm, um bei der späteren Auswertung auch die Gleichmäßigkeit über die Länge der Schmelzspur beurteilen und vergleichen zu können. Es wird eine konstante Vektorlänge gewählt. Jede Geometrie wird mehrfach gebaut, um abgesicherte Aussagen treffen zu können. Die Anzahl der Elemente wird so gewählt, dass der verfügbare Raum optimal ausgenutzt wird. Ein Parameter und ein Geometrietyt werden auf einer 15x15 mm großen Grundplatte aufgebaut, damit sie im Block ausgewertet und gegebenenfalls hierzu auch eingebettet werden können.

Um ein möglichst großes Spektrum des Energieeintrags abzudecken und den qualitativen Verlauf der Schmelzspurbreite feststellen zu können, wird das verfügbare Parameterspektrum möglichst umfassend abgebildet. Tabelle 5.1 zeigt die festgelegten Parameter, welche miteinander kombiniert werden, sodass 49 Parametersätze entstehen.

Tabelle 5.1: Belichtungsparameter zur Ermittlung der Schmelzspurbreite

$P_l$ [W]	50	75	100	125	150	175	200
$v_s$ [m/s]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4

Zusätzlich muss die Arbeitsvorbereitung zur Herstellung der Proben möglichst sinnvoll vorgenommen werden. Es ist zu erwarten, dass Parameter mit geringem Energieeintrag nicht aufgebaut, beziehungsweise während des Beschichtens zerstört werden. Außerdem ist zu erwarten, dass Parameter mit sehr hohem Energieeintrag höher als die eigentliche Schichtdicke aufbauen und eine unregelmäßige Beschichtung der folgenden Bauteile verursachen. Aufgrund der hohen Elementanzahl und der gewählten Grundplatte mit Nullpunktspannsystem zur Aufbereitung müssen die Proben in mehreren Sets aufgebaut werden. Die runde Grundplatte besitzt einen Durchmesser von 150 mm. Sie kann in einem Aufbau 20 Parametersätze aufnehmen. Um diese nach dem Energieeintrag staffeln zu können, wird zunächst die eingebrachte Energie für die verwendeten Parameter nach Gleichung (5.2) berechnet. Dies ist in Tabelle 5.2 abgebildet.

Tabelle 5.2: Energieeintrag in mJ bei verschiedenen Belichtungsparametern

Em [mJ]		Pi [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	16,25	24,38	32,5	40,63	48,75	56,88	65
	0,4	8,13	12,19	16,25	20,31	24,38	28,44	32,5
	0,6	5,42	8,13	10,83	13,54	16,25	18,96	21,67
	0,8	4,06	6,09	8,13	10,16	12,19	14,22	16,25
	1	3,25	4,88	6,5	8,13	9,75	11,38	13
	1,2	2,71	4,06	5,42	6,77	8,13	9,48	10,83
	1,4	2,32	3,48	4,64	5,8	6,96	8,13	9,29

Mit Hilfe dieser Werte lassen sich die Proben, wie in Tabelle 5.3 dargestellt, in drei Sets aufteilen.

Tabelle 5.3: Aufteilung der Baujobs

	Range [mJ]	Anzahl
Set1	7 bis 15	18
Set2	über 15	16
Set3	unter 5	15
Gesamt		49

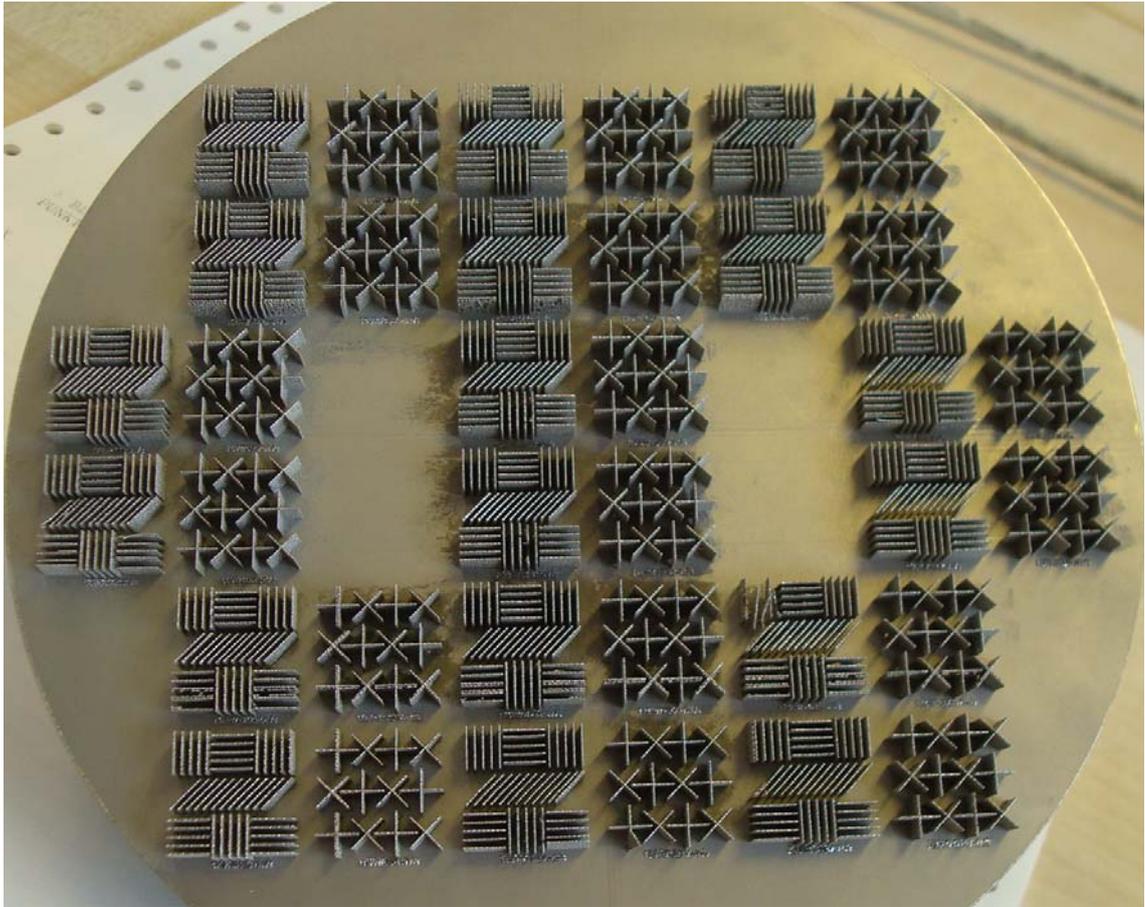
Die Proben innerhalb der Sets werden so angeordnet, dass solche Parameter, die in der Gruppe am wenigstens stabil einzuschätzen sind, als letztes beschichtet werden. Die geometrische Anordnung eines Sets auf der Bauplatzform sowie die Anordnung der Parametergruppen innerhalb der Sets sind dem Anhang zu entnehmen.

### 5.1.3 Durchführung

Im ersten Schritt sind die Maschinendaten zu erzeugen, was in diesem Fall recht aufwändig ist, da kein direkter Zugang zu dem maschineninternen cls-Dateiformat vorhanden ist. Somit müssen die Supportgeometrien mittels Magics generiert werden. Es wird ein fiktives Bauteil mit jeder Supportgeometrie unterstützt und anschließend nur die Supportgeometrien gesliced und als cls-File abgelegt. Die Vervielfältigung und Anordnung der Geometrien wird nach Abbildung 5.1 an der Anlage in der Concept Laser Software vorgenommen. Somit werden für jeden Belichtungsparameter anlagenintern 54 Bauteile abgelegt. Für diese muss der entsprechende Belichtungsparametersatz generiert und zugewiesen werden. Beim ersten Set ergeben sich ca. 1000 Bauteile in einem Job, was die Leistung des Maschinenrechners an seine Grenzen stoßen lässt. Der Job lässt sich als Auftragsdatei abspeichern, jedoch nicht wieder öffnen. Der Auftrag wird somit in vier separaten Auftragsdateien abgelegt, um ein erneutes Öffnen zu ermöglichen. Das Auftragsdateiformat wird uncodiert abgelegt, sodass die clo-Files des ersten Sets in einem Tabellenverarbeitungsprogramm eingelesen und geändert werden können. Somit kann zur Generierung der Maschinendaten für die folgenden Sets die geometrische Anordnung des ersten Sets übernommen werden. Es müssen lediglich die Belichtungsparametersätze in der Anlage generiert werden und die zugehörigen LaserIDs den entsprechenden Bauteilen zugewiesen werden. Zusätzlich werden die Datensätze zur Beschriftung der Probensets geändert. Mit Hilfe eines Tabellenverarbeitungsprogramms kann dies schnell und fehlerfrei vorgenommen werden.

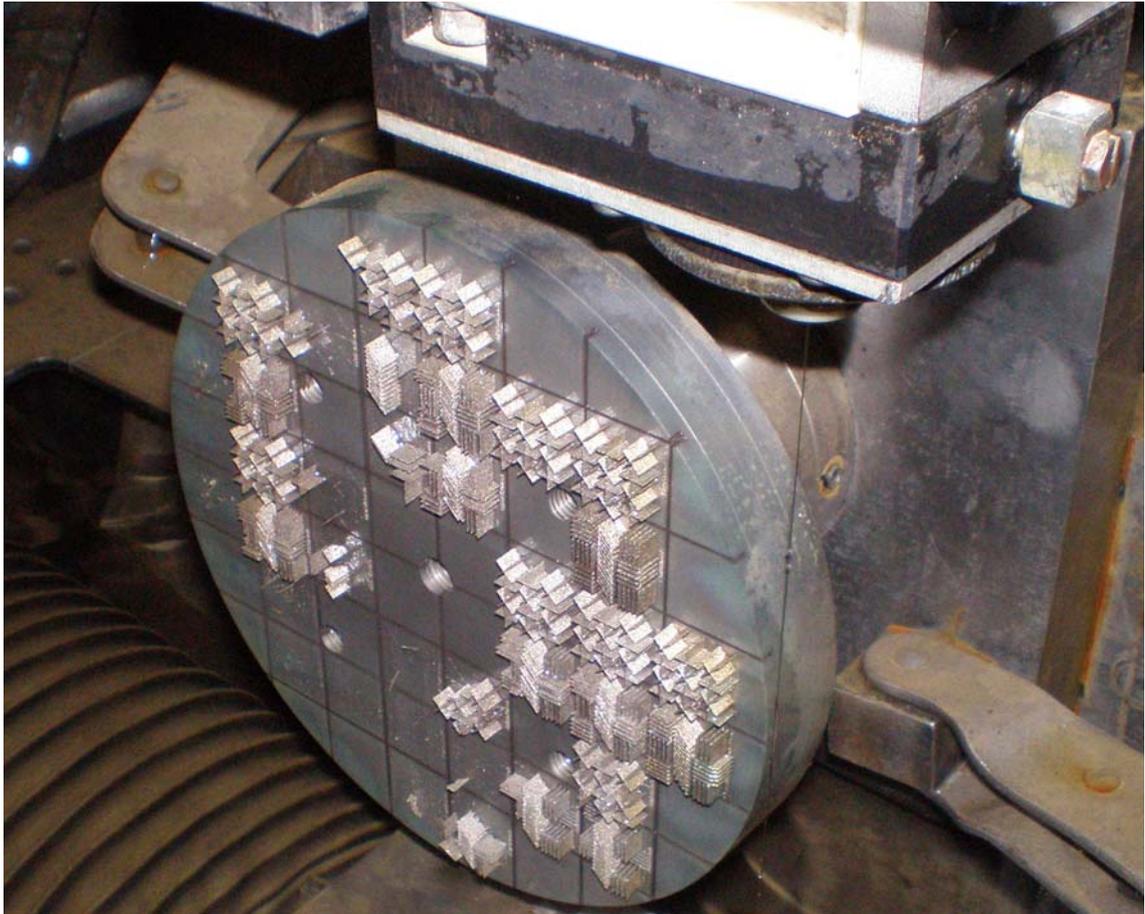
Anschließend können die Auftragsdateien von der Maschinensoftware eingelesen werden. Ist die Prozesskammer vorbereitet, kann der Bauprozess gestartet werden. Die große Anzahl an Bauteilen mit verschiedenen Belichtungsparametern lässt das Berechnen der Schichten wesentlich länger als das Belichten und Beschichten dauern. Dem liegt zugrunde, dass die Belichtungsvektoren im Anlagenrechner während des Bauprozesses erzeugt werden. Nach ca. 60 Stunden Bauzeit ist ein Probenet generiert.

Abbildung 5.3 zeigt ein fertiggestelltes Probenet auf der Bauplattform.



*Abbildung 5.3: Probenset 1 nach dem Generieren und Abrüsten*

Da sich wie in Tabelle 5.3 und Abbildung 5.3 einzusehen, 15 bis 18 Parameter mit jeweils 54 einzelnen Geometrien auf der Plattform befinden, müssen diese zwecks Handling und Einbetten noch aufbereitet werden. Mittels Drahterodieren wird in die Grundplatte erst das Raster von 15x15 mm, wie in Abbildung 5.4 zu erkennen ist, eingebracht. Anschließend werden die Probenträger auf eine Dicke von ca. 3 mm abgetrennt, sodass sich jeder Geometrietypp eines Parametersets auf einer 15x15x3 mm großen Grundplatte befindet.



*Abbildung 5.4: Probenset 3 während der Aufbereitung auf der Drahterodiermaschine*

Um die aufgebauten Supportgeometrien nun auszuwerten, wird zunächst aufgenommen mit welchen Parametern wie viele der zu erstellenden Geometrien aufgebaut wurden. Anschließend werden die aufgebauten Geometrien auf Fehlstellen, Poren und ihre Gleichmäßigkeit innerhalb der Parameter- und Geometrietyten und sonstige Auffälligkeiten untersucht. Die erzeugten Schmelzspurbreiten werden anschließend vermessen. Hierzu eignet sich eine Analyse mittels Messmikroskop.

Im ersten Ansatz werden Proben mit Kreuzgeometrien und hohen Energieeinträgen heiß eingebettet und geschliffen, sodass die Stegbreiten optimal zu messen sind. Der Einbettdruck deformiert jedoch die meisten Geometrien, sodass sie sich nicht mehr vermessen lassen. Heißes Einbetten erweist sich somit für diesen Anwendungsfall als ungeeignet. Der Versuch, die Strukturen kalt einzubetten scheitert ebenfalls, da sich Luftblasen zwischen den Strukturen sammeln. Zusätzlich fällt auf, dass das Schleifen der erfolgreich eingebetteten Probe die Fehlstellen ebnet, unkenntlich macht und somit das Messergebnis zu verfälschen scheint. Außerdem ist an den nicht eingebetteten

Proben eine nachträgliche Beurteilung der Flanken möglich. Somit werden die Geometrien ohne Einbetten optisch vermessen, wobei als tatsächliche Stegbreite nur die Schmelzspurbreite ohne die anhaftenden Pulverpartikel angenommen wird. Es werden zur statistischen Auswertung von jedem Supporttyp fünf Werte aufgenommen, sodass für jeden Belichtungsparameter 25 Werte zur Verfügung stehen.

## 5.1.4 Auswertung

Im ersten Schritt gilt es festzustellen, welche Geometrien in Verbindung mit welchen Belichtungsparametern herzustellen sind und wie stabil diese Parameter eingestuft werden können. Hierzu wird gezählt, wie viele der programmierten Strukturen aufgebaut wurden. Zunächst werden die Geometrietypen getrennt voneinander betrachtet, da die Kreuzgeometrien als stabiler eingestuft werden können. Zum Einen verfügen sie über die doppelte Vektorlänge. Zum Anderen sind sie im Gegensatz zu den Steggeometrien aufgrund der zweidimensionalen Ausdehnung in sich steifer und somit als stabiler, insbesondere gegen durch den Beschichter bedingte Störeinflüsse einzuschätzen. Folgende Tabellen zeigen den relativen Anteil der erfolgreich aufgebauten Supports für die verwendeten Geometrietypen. Die Absoluten Werte sind dem Anhang zu entnehmen.

*Tabelle 5.4: Anteil erfolgreich aufgebauter Kreuzgeometrien*

Relativer Aufbau		PI [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,6	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,8	66,67%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	1	0,00%	8,33%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	1,2	0,00%	25,00%	58,33%	91,67%	100,00%	100,00%	100,00%
	1,4	0,00%	0,00%	8,33%	100,00%	100,00%	91,67%	91,67%

Die Kreuzgeometrien werden mit den verwendeten Parametern überwiegend stabil aufgebaut. Auffällig ist, dass die Geometrien zum größten Teil entweder fehlerfrei aufgebaut werden oder sich massive Einbrüche in der Stabilität zeigen. Wie erwartet, wurden Supports mit höherem Energieeintrag stabiler aufgebaut als Supports, welche mit geringer Energie generiert wurden.

Tabelle 5.5: Anteil erfolgreich aufgebauter Steggeometrien

Relativer Aufbau		PI [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	90,48%	95,24%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,4	90,48%	95,24%	100,00%	100,00%	95,24%	100,00%	100,00%
	0,6	71,43%	85,71%	92,86%	95,24%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,8	54,76%	80,95%	95,24%	95,24%	95,24%	95,24%	100,00%
	1	0,00%	2,38%	90,48%	97,62%	92,86%	92,86%	92,86%
	1,2	0,00%	47,62%	26,19%	95,24%	76,19%	95,24%	97,62%
	1,4	0,00%	19,05%	7,14%	83,33%	66,67%	71,43%	80,95%

Die Steggeometrien wurden generell weniger stabil aufgebaut, wobei auch hier mit höherem Energieeintrag eine bessere Aufbaustabilität zu verzeichnen ist. Diese Geometrien scheinen jedoch Störeinflüssen gegenüber anfälliger zu sein. Dies ist insbesondere durch die geringere Stabilität dem Beschichter gegenüber zu begründen. Auch eine lokale Unebenheit der Bauplattform kann innerhalb der Geometrie schlechter kompensiert werden, da sie schneller eine ungenügende Anbindung an die Plattform verursacht, und nicht über eine rechtwinklig angebundene Geometrie kompensiert werden kann, wie bei der Kreuzbauweise.

Die erste Beurteilung der Proben zeigt, dass sich Supportstrukturen mit einer großen Variation des Energieeintrags realisieren lassen. Ab einem Energieeintrag von ca. 5 mJ bis hin zu 65 mJ wurden Supportgeometrien erfolgreich aufgebaut. Auffällig ist zunächst, dass bei Laserleistungen unter 100 W die Belichtungsgeschwindigkeit von 800 mm/s die Grenze zur Generierbarkeit darstellt und nicht der sich ergebende Energieeintrag. Es scheint, als ob unabhängig von der Laserleistung eine gewisse Einwirkzeit benötigt wird, um eine Schmelzspur und die Anbindung zur darunter liegenden Schicht zu realisieren. Tabelle 5.6 zeigt die in Tabelle 5.4 und 5.5 dargestellten Werte kombiniert.

Tabelle 5.6: Erfolgreich aufgebaute Supportgeometrien

Relativer Aufbau		PI [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	92,59%	96,30%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,4	92,59%	96,30%	100,00%	100,00%	96,30%	100,00%	100,00%
	0,6	77,78%	88,89%	94,44%	96,30%	100,00%	100,00%	100,00%
	0,8	57,41%	85,19%	96,30%	96,30%	96,30%	96,30%	100,00%
	1	0,00%	3,70%	92,59%	98,15%	94,44%	94,44%	94,44%
	1,2	0,00%	42,59%	33,33%	94,44%	81,48%	96,30%	98,15%
	1,4	0,00%	14,81%	7,41%	87,04%	74,07%	75,93%	83,33%

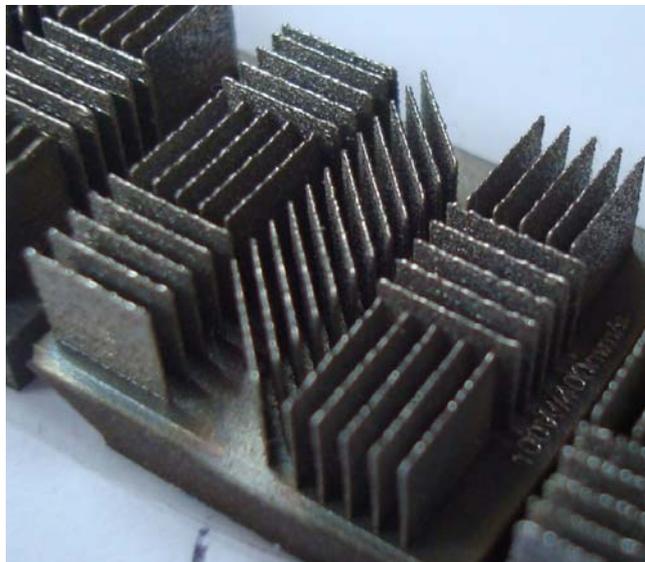
Mit Hilfe dieser Beurteilung lassen sich bereits einige Parameter als ungeeignet einschätzen. Geometrien, welche zu weniger als 50% erfolgreich aufgebaut wurden, werden als ungeeignet zur Bauteilunterstützung eingestuft.

Nachdem untersucht wurde, welche Parameter geeignet sind, um stabil Strukturen zu erzeugen, werden diese Strukturen nun qualitativ betrachtet. Die Kriterien für diese Beurteilung ergaben sich bei der Betrachtung und sind in folgender Tabelle aufgelistet.

*Tabelle 5.7: Kriterien zur Beurteilung*

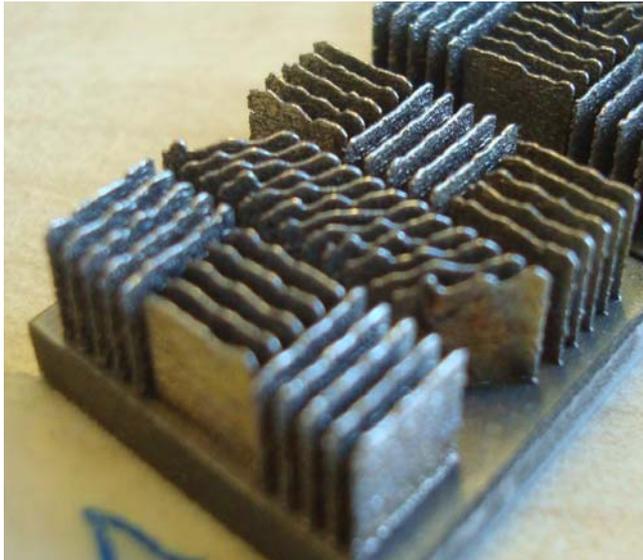
Merkmal	Kennzeichnung
korrekter Aufbau	
Riffelbildung	r
löchrigkeit	l
ungleichmäßiger Aufbau	u
Doppelstege	d
kein Aufbau	

Korrekt aufgebaute Supportgeometrien sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Es sind weder fehlende Elemente, Poren oder Unregelmäßigkeiten zu erkennen.



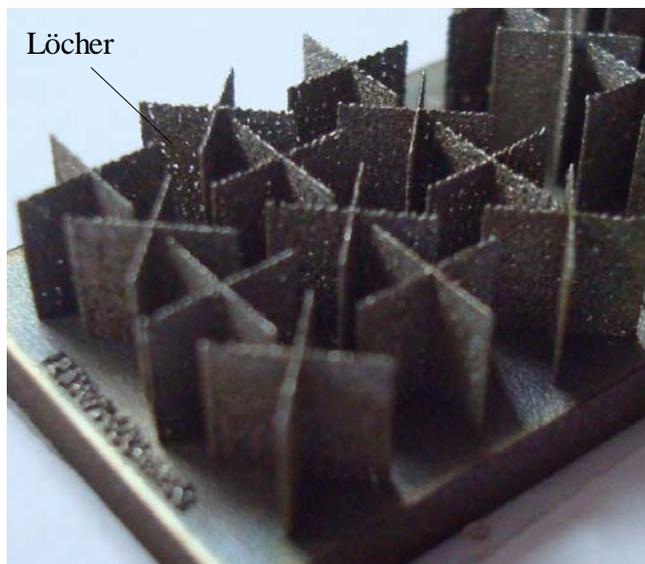
*Abbildung 5.5: Stege mit 100 W und 400 mm/s*

Als Riffelbildung werden solche Elemente gezählt, die in Aufbaurichtung eine größere Unebenheit als ca. 0,2 mm aufweisen. Abbildung 5.6 bildet Steggeometrien ab, welche dieses Merkmal aufweisen.



*Abbildung 5.6: Stege mit 200 W und 400 mm/s*

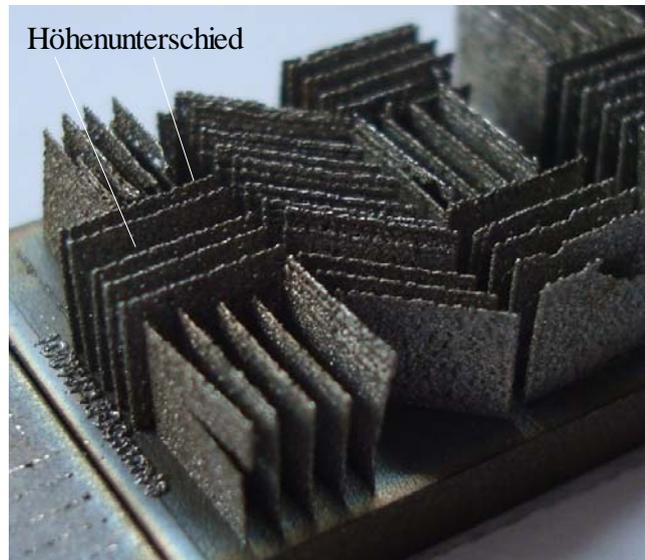
Es fällt auf, dass die Ausbildung der Riffel je nach Ausrichtung zum Beschichter variiert. Die Löchrigkeit wird mit Hilfe von Licht geprüft. Abbildung 5.7 veranschaulicht, wie sich dieses Merkmal ausbildet.



*Abbildung 5.7: Kreuze mit 125 W und 1400 mm/s*

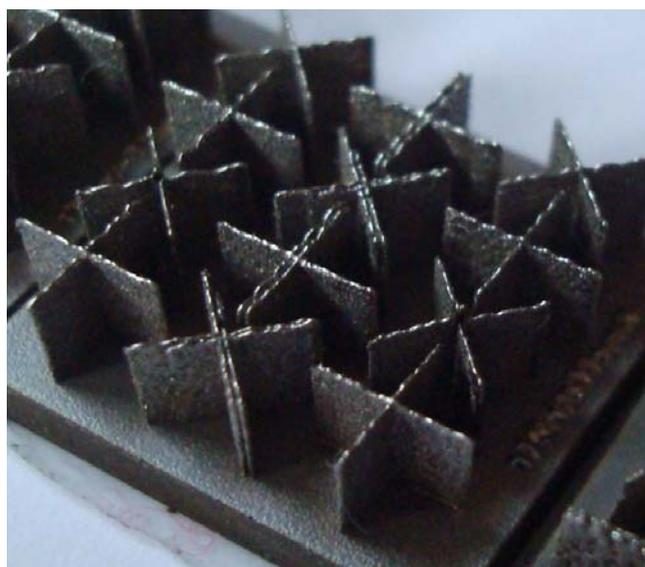
Wie in Abbildung 5.7 zu sehen, ist die Sichtbarkeit dieses Merkmals vom Hintergrund und der Beleuchtung abhängig und somit nicht immer deutlich zu erkennen.

Ein ungleichmäßiger Aufbau wird dann angenommen, wenn die Elemente innerhalb eines Belichtungsparameters und einer Geometrie deutliche Abweichungen voneinander in der Aufbauhöhe und der Stabilität aufweisen. Abbildung 5.8 zeigt dies an einem Beispiel.



*Abbildung 5.8: Stege mit 100 W und 1000 mm/s*

Doppelstege beschreiben, dass anscheinend zwei Supports direkt nebeneinander aufgebaut wurden. Dies kann entweder auf einen Anlagenfehler zurückgeführt werden, dass der Scankopf aufgrund verschmutzter Glasmaßstäbe nicht wiederholgenau positioniert wurde, oder dass der Beschichter die aufgebauten Supports plastisch verformt hat. Ersteres scheint jedoch nach Absprache mit dem Maschinenhersteller [17] und den Anwendern der SLM-Anlage [21] plausibler. Abbildung 5.9 bildet diese Erscheinung ab.



*Abbildung 5.9: Kreuze mit 175 W und 600 mm/s*

Folgende Tabellen stellen die erfassten Merkmale für alle Belichtungsparameter und Geometrien getrennt dar.

Tabelle 5.8: Kreuzgeometrien nach optischen Kriterien beurteilt

		PI [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	r			r/d	r	r	r
	0,4	r			r/d	r	r/d	r
	0,6	r			r/d	r	r	r
	0,8	l/u			l/d			
	1		l/u	l/u		l/d		
	1,2		l/u			l/d		
	1,4			l/u			l/d	

Tabelle 5.9: Steggeometrien nach optischen Kriterien beurteilt

		PI [W]						
		50	75	100	125	150	175	200
vs [m/s]	0,2	(d)	(d)	(d)	r/d	r	r	r
	0,4	(l)	(l)	(l)	d	r	r	r
	0,6	l/u	l/(u)	u		r	r	r
	0,8	l/u	l/(u)	l/u		(l)	(l)	(l)
	1		l/u	l/u	l/u		l/d	(l)
	1,2		l/u	l/u	l/u	l/u		
	1,4		l/u	l/u	l/u/(d)	l/u	l/u	l/u

Im Gegensatz zur vorherigen Beurteilung zeigt sich, dass nur die wenigsten Belichtungsparameter Strukturen gänzlich ohne Fehlstellen erzeugten, wobei sich die Steggeometrien als unregelmäßiger und somit instabiler als die Kreuzgeometrien erweisen. Die Doppelstegbildung wird als Anlagefehler angenommen, somit wird diese Erscheinung hier nicht weiter analysiert. Abbildung 5.10 stellt die Aufbaustabilität nach Tabelle 5.6 in Verbindung mit der optischen Beurteilung dar.

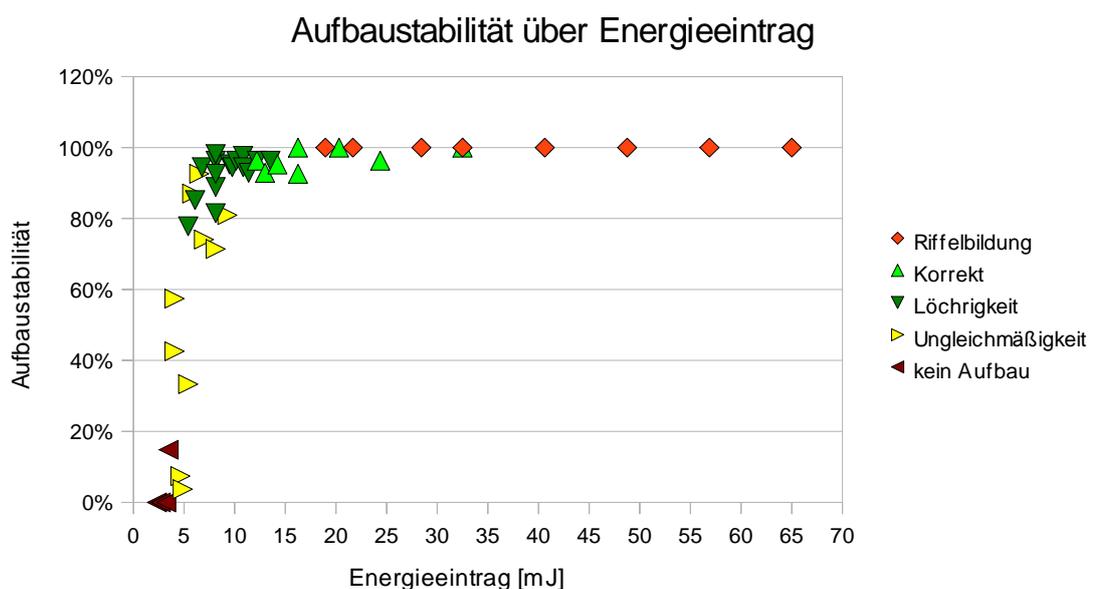


Abbildung 5.10: Aufbaustabilität und makroskopische Merkmale über Energieeintrag

Besonders bei hohen Energieeinträgen mit niedriger Belichtungsgeschwindigkeit ergibt sich an der Kopffläche eine große Riffelbildung, was auf einen instabilen Bauprozess hindeutet. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass durch die hohe Energie mehr Material aufgeschmolzen wird, als die Schichtdicke beträgt. Somit kann folglich die kommende Schicht nicht gleichmäßig beschichtet werden, da der Beschichter von den herausragenden Elementen abgelenkt wird und anschließend schlagartig umso mehr Pulver ablegt. Dieses Verhalten ließ sich beim Beobachten des Prozesses bereits erahnen und wird durch die Fehlercharakteristik bestätigt. Obwohl sich ein dichtes Gefüge und eine klar ausgebildete Schmelzspur einstellt, sind solche Geometrien zur praktischen Anwendung ungeeignet, da sie den Beschichter stärker verschleifen lassen und keine gleichmäßige Bauteilanbindung garantieren können.

Mit sinkendem Energieeintrag bleibt ein dichtes Gefüge in Verbindung mit einer deutlich erkennbaren Schmelzspur erhalten. Somit wurden Supportstrukturen mit einem Energieeintrag von ca. 15 mJ bis 30 mJ stabil und dicht aufgebaut. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Belichtungsparameter innerhalb dieses Bereiches die Strukturen stabil aufbauten. Bei großen Laserleistungen ab 175 W wurden ab einem Energieeintrag von 19 mJ bereits Riffel ausgebildet, wobei der nächst niedrigere Energieeintrag bereits eine geringe Löchrigkeit zur Folge hat.

Ein Energieeintrag von weniger als 15 mJ hat zunächst eine Porenbildung zur Folge. Der Energieeintrag scheint nicht auszureichen, um alle Pulverpartikel zu verschmelzen, die vom Belichtungsvektor getroffen werden. Bis ca. 10 mJ werden diese Strukturen jedoch stabil aufgebaut, bei niedriger Belichtungsgeschwindigkeit gelingt dies noch bis ca. 8 mJ Energieeintrag. Es zeigt sich erneut, dass eine geringe Laserleistung und langsame Belichtungsgeschwindigkeit bei gleichem Energieeintrag einen stabileren Prozess bewirken als eine hohe Leistung in Verbindung mit einer schnelleren Belichtungsgeschwindigkeit. Solche Strukturen sind, insofern sie gleichmäßig aufgebaut werden, zur Abstützung geeignet, da Supports nicht zwingend eine dichte Struktur aufweisen müssen, um ihre Funktion zu erfüllen. Es ist jedoch eine überproportionale Abnahme der Festigkeit zu erwarten, was bei der Anordnung berücksichtigt werden sollte.

Strukturen mit weniger als 8 mJ Energieeintrag weisen deutliche Poren und Fehlstellen auf, sodass diese nur bedingt zur Bauteilunterstützung geeignet sind. Von einfachen

Steggeometrien sollte abgesehen werden, zumindestens ohne einen höheren Sicherheitsfaktor anzusetzen. Diese sind einfacher vom Bauteil zu entfernen, was eventuell bei der Nachbearbeitung vorteilhaft sein kann.

Wie bereits in Tabelle 5.6 dargestellt, ist ein Energieeintrag von weniger als 5 mJ gänzlich ungeeignet um Strukturen zu erzeugen, die über die erfolgreiche Herstellung von Bauteilen entscheiden.

Da zur optischen Vermessung, wie bereits in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, die Proben weder eingebettet noch geschliffen werden konnten, sind bei der Betrachtung unter dem optischen Messgerät die Ausbildung der Schmelzspuren und Pulveranhaftungen sehr gut sichtbar. Hier fällt zunächst auf, dass sich die Pulveranhaftung mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit verstärkt. Bei vielen Strukturen mit weniger als 10 mJ Energieeintrag fällt auf, dass sich kaum noch eine Schmelzspur ausbildet, sondern die Supports aus verbundenen Schweißspratzern bestehen. Folgende Abbildungen zeigen beispielhaft, wie sehr die Pulveranhaftung zunimmt bei einer verhältnismäßig geringen Zunahme der Belichtungsgeschwindigkeit. Abbildung 5.11 zeigt eine vergrößerte Aufnahme von deutlich erkennbaren Schmelzspuren mit geringen Pulveranhaftungen.

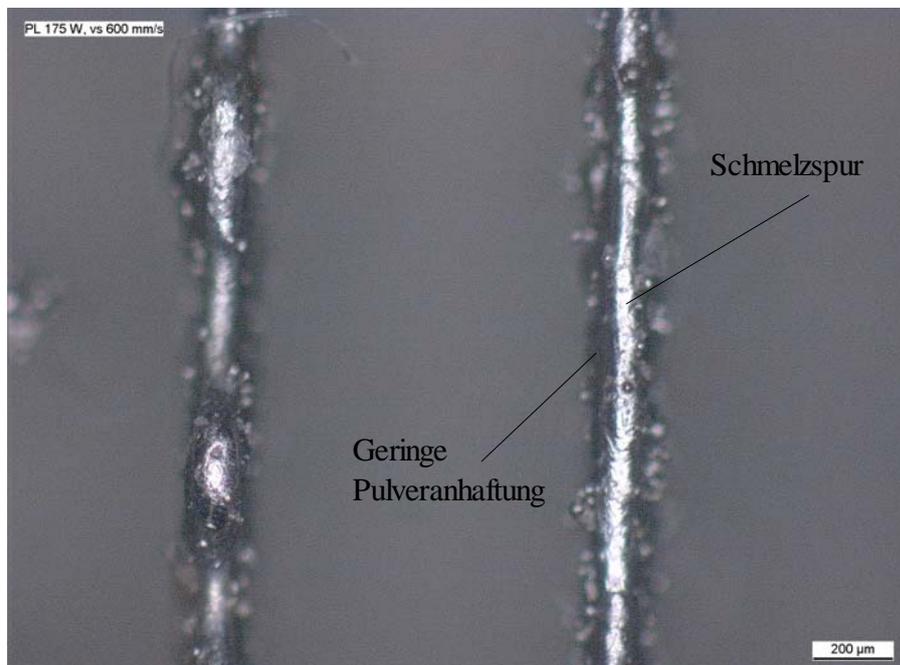


Abbildung 5.11: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 600 mm/s

Bei einer Laserleistung von 175 W und einer Belichtungsgeschwindigkeit von 600 mm/s lässt sich die Schmelzspur deutlich erkennen und die Pulveranhaftungen sind gering. Abbildung 5.12 zeigt Steggeometrien mit identischer Laserleistung und der nächsthöheren Belichtungsgeschwindigkeit.

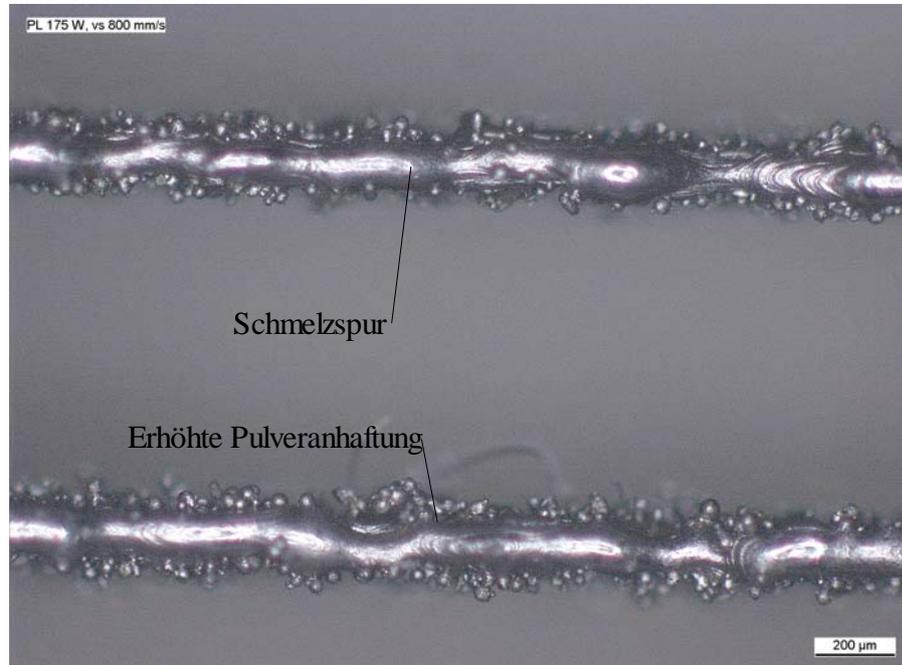
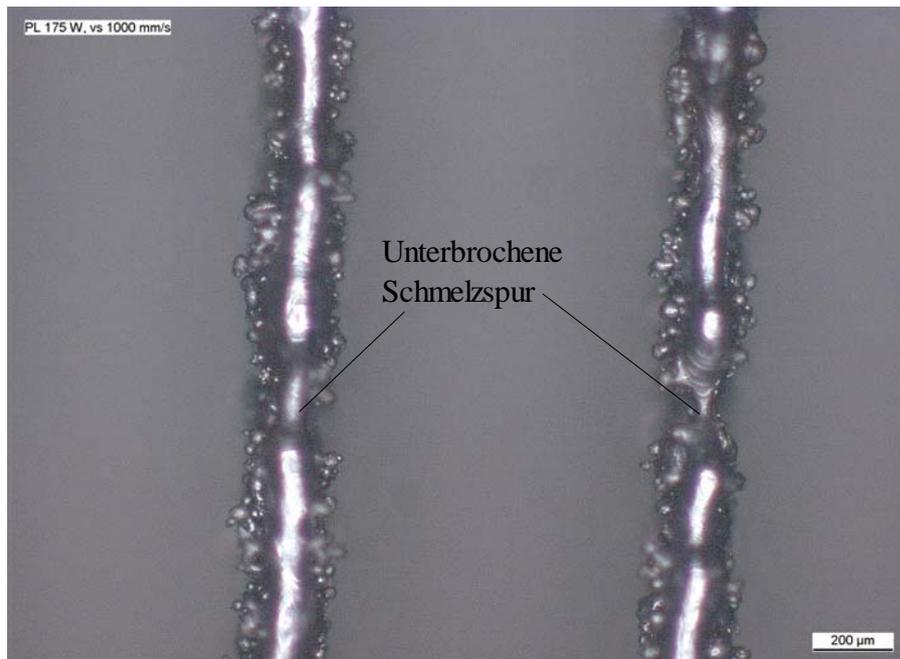


Abbildung 5.12: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 800 mm/s

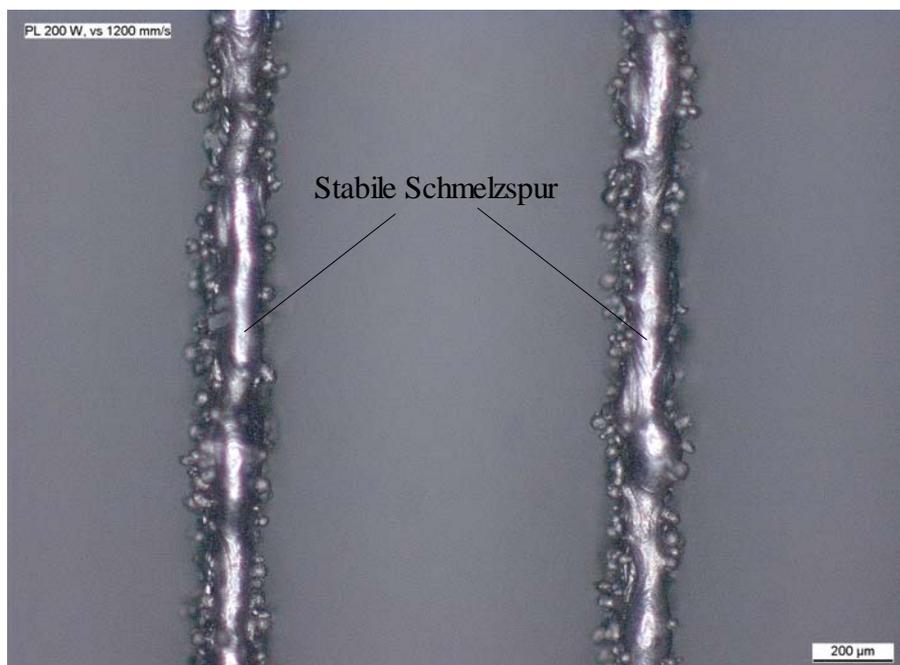
Bei einer Zunahme der Belichtungsgeschwindigkeit um 30% lässt sich die Schmelzspur ebenfalls problemlos erkennen, jedoch haftet deutlich mehr Pulver an den Seiten der Schmelzspuren an. Die optische Betrachtung zeigt, dass den Pulveranhaftungen kaum Tragfähigkeit zugesprochen werden kann, sie also zur Ermittlung der Festigkeit nicht zu berücksichtigen sind.

Abbildung 5.13 zeigt Schmelzspuren, welche mit einer noch schnelleren Belichtungsgeschwindigkeit hergestellt wurden. Ein weiterer Anstieg der Belichtungsgeschwindigkeit zeigt ähnliche Pulveranhaftungen, doch treten hier erste Fehlstellen innerhalb der Schmelzspuren auf.



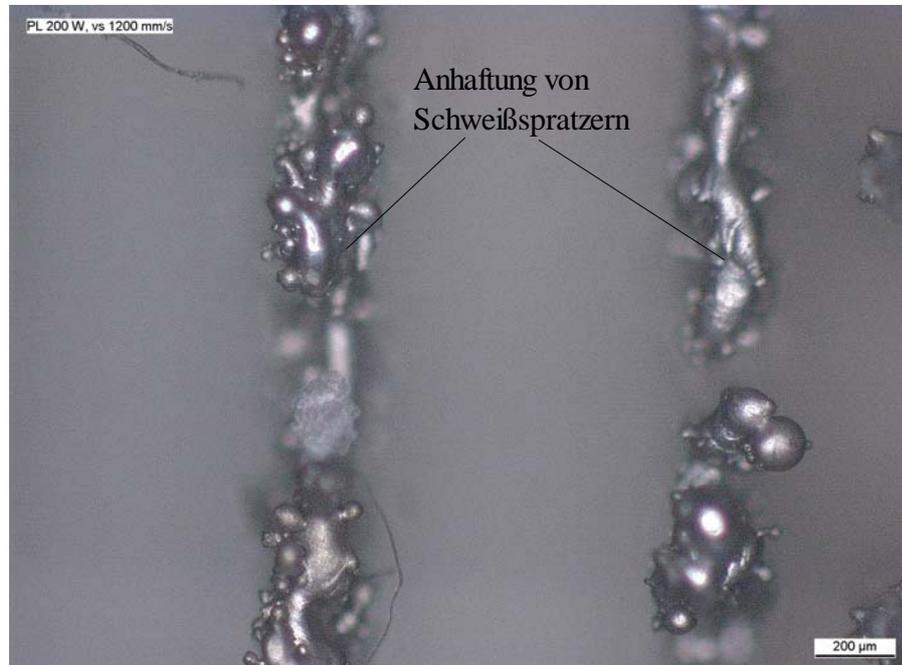
*Abbildung 5.13: Schmelzspur bei einer Laserleistung von 175 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1000 mm/s*

Der zuvor beobachtete unregelmäßige Aufbau innerhalb eines Belichtungsparameters spiegelt sich bei der vergrößerten Betrachtung wieder. Folgende Abbildungen zeigen Strukturen eines Belichtungsparameters, welche jedoch deutlich unterschiedliche Schmelzspuren aufweisen.



*Abbildung 5.14: Stabile Schmelzspur bei einer Laserleistung von 200 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1200 mm/s*

Trotz Pulveranhaftungen und geringen Unregelmäßigkeiten in der Schmelzspur ist diese in Abbildung 5.14 problemlos zu identifizieren. Abbildung 5.15 zeigt Schmelzspuren, welche mit identischen Belichtungsparametern keine Schmelzspur erzeugen.



*Abbildung 5.15: Instabile Schmelzspur bei einer Laserleistung von 200 W und Belichtungsgeschwindigkeit von 1200 mm/s*

An mit gleichen Parametern belichtete Strukturen, welche lediglich unterschiedlich auf der Bauplattform lokalisiert sind, lassen sich keine Schmelzspur erkennen. Bei gleicher Bauhöhe bestehen sie offensichtlich aus Pulveranhaftungen. Es scheint, als habe eher ein Sinter- anstatt ein Schweißprozess stattgefunden. Eine mögliche Begründung liegt in der Korngrößenverteilung des Ausgangswerkstoffes. Es kann nicht sichergestellt werden, dass über die gesamte Bauplattform das Pulverbett über identische Eigenschaften verfügt, da die Korngröße um mehr als 100% schwankt. Der in Abbildung 5.14 und 5.15 verwendete Belichtungsparameter liegt nach den bisherigen Untersuchungen im Grenzwertbereich zwischen Porenbildung und unregelmäßigem Aufbau. Es ist somit denkbar, dass die Schwankung der Kornfraktion bei solchen Parametern ausreicht um die Absorption des Laserstrahls und die Wärmeleitfähigkeit lokal hinreichend zu beeinflussen, um über das Benetzungsverhalten und somit der Ausbildung einer Schmelzspur zu entscheiden.

Die optische Vermessung der Schmelzspurbreiten zeigt, dass sich sowohl die Laserleistung als auch die Belichtungsgeschwindigkeit proportional auf die Schmelzspurbreite auswirken. Es konnten die Schmelzspurbreiten mit einer Standardabweichung von ca. 10  $\mu\text{m}$  bis 30  $\mu\text{m}$  bestimmt werden, wobei sich bei den Steggeometrien im Durchschnitt eine ca. 50% größere Standardabweichung als bei den Kreuzgeometrien ergibt. Messreihen, welche eine größere Standardabweichung als 20  $\mu\text{m}$  aufweisen, werden im Folgenden nicht berücksichtigt, da dies im Verhältnis zum gesamten Variationsfeld eine zu große Unsicherheit mit sich bringen würde. Somit bleiben fünf Messreihen im Folgenden unberücksichtigt. Die unbereinigten Diagramme befinden sich im Anhang. Es wurde auch hier wieder festgestellt, dass die Kreuzbauweise eine bessere Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit aufweist. Von einer weiteren Bereinigung der Daten wurde abgesehen, da unter Berücksichtigung der Mess- und teilweisen Prozessunsicherheit eine Standardabweichung von bis zu 15% nicht eindeutig auf Ausreißer zurückgeführt werden kann. Folgende Abbildungen zeigen, wie sich die Prozessparameter getrennt auf die Schmelzspurbreite auswirken. In Abbildung 5.16 ist die Abhängigkeit der Schmelzspurbreite von der Laserleistung gestaffelt nach den Belichtungsgeschwindigkeiten dargestellt.

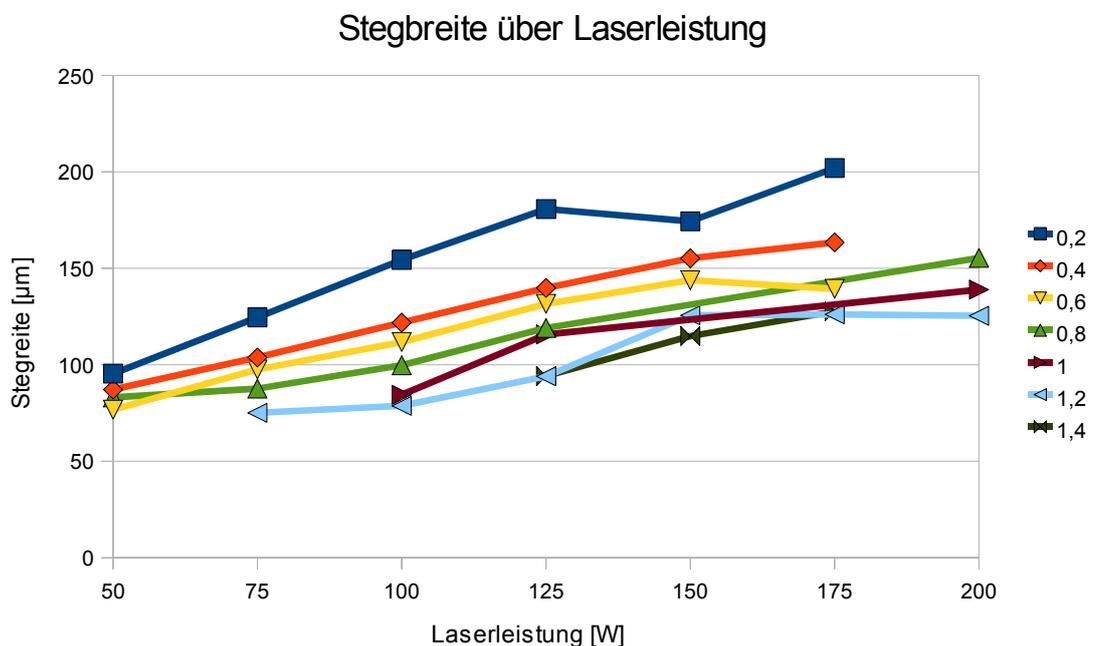
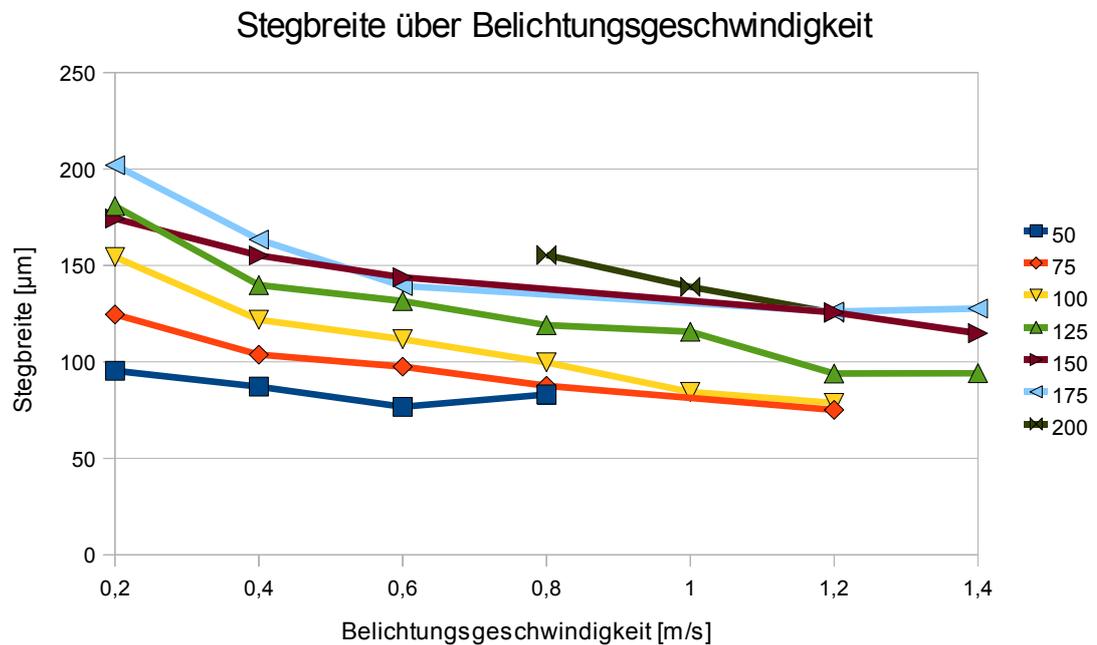


Abbildung 5.16: Entstehende Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten

Es lässt sich ein linearer Zusammenhang erkennen. Mit steigender Laserleistung steigt auch die Schmelzspurbreite. Nach Gleichung (5.2) bewirkt eine höhere Laserleistung

einen steigenden Energieeintrag. Die Abhängigkeit der Schmelzspurbreite von der Belichtungsgeschwindigkeit ist in Abbildung 5.17 dargestellt.



*Abbildung 5.17: Entstehende Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen*

Mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit ist ein linearer Abfall der Schmelzspurbreite zu erkennen. Da eine schnellere Belichtungsgeschwindigkeit eine kürzere Wirkzeit der Laserstrahlung bezweckt, zeigt sich hier ein ähnlicher Zusammenhang, wie in Abbildung 5.16. Die Schmelzspurbreite verringert sich mit sinkendem Energieeintrag.

Sowohl mit steigender Laserleistung, als auch mit sinkender Belichtungsgeschwindigkeit steigt, wie erwartet, die Schmelzspurbreite linear. Für diese Versuchsreihe soll untersucht werden, inwiefern einer der beiden Belichtungsparameter sich dominant auf die entstehende Schmelzspur auswirkt. Hierzu werden alle getesteten Parameter relativ zueinander gesetzt, um sie vergleichen zu können. Die entsprechenden Grafiken sind im Anhang abgelegt. Vergleicht man nun die Steigungen, mit welcher die Schmelzspurbreite vom jeweiligen Parameter abhängig ist, zeigt sich, dass die Laserleistung nahezu den 1,6-fachen Einfluss auf die Schmelzspurbreite hat. Zu beachten ist, dass dieser Faktor nur für das ausgewählte Prozessfenster gilt, da die jeweils maximal eingestellten Parameter die Bezugsbasis bilden.

Der Einfluss des Energieeintrages auf die Schmelzspurbreite ist in Abbildung 5.18 getrennt für beide Geometrietypen dargestellt.

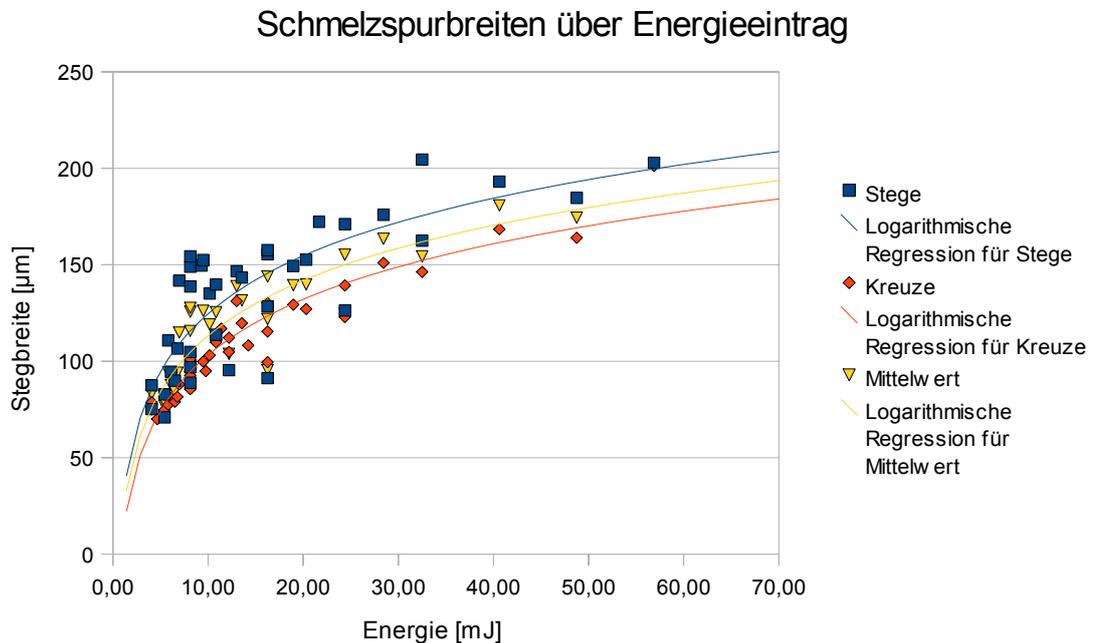


Abbildung 5.18: Schmelzspurbreiten in Abhängigkeit des Energieeintrags

Die Abhängigkeit der Schmelzspurbreite vom Energieeintrag zeigt, dass hier kein linearer Zusammenhang vorliegt. Die aufgenommenen Daten lassen sich, wie zu erwarten, durch logarithmische Kurven beschreiben. Es fällt auf den ersten Blick auf, dass die Werte der Steggeometrien eine deutlich größere Streuung aufweisen als die Kreuzgeometrien und generell mit größeren Schmelzspuren bei identischen Energieeinträgen behaftet sind. Dies deckt sich mit den vorherigen Betrachtungen und lässt den Schluss zu, dass die Steggeometrien aufgrund ihrer geringeren Steifigkeit gegen ein Verbiegen durch den Beschichter störanfälliger sind als die Kreuzgeometrien. Der Zusammenhang zwischen den Schmelzspurbreiten und dem Energieeintrag der Kreuzgeometrien hingegen kann deutlich besser durch eine logarithmische Kurve beschrieben werden. Es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß der Regressionskurve von  $R^2=0,91$ , wobei sich die Steggeometrien nur mit  $R^2=0,66$  durch eine logarithmische Kurve annähern lassen. Im Anhang ist die Standardabweichung über den Energieeintrag abgelegt. Es zeigt sich, wie in Abbildung 5.18 zu erkennen ist, dass besonders niedrigere Energieeinträge mit großen und sehr stark schwankenden Standardabweichungen behaftet sind.

Die minimal zu erreichende Schmelzspurbreite hat bei der hier verwendeten Konfiguration eine Breite von 0,075 mm. Es wurde eine maximale Schmelzspurbreite von 0,2 mm aufgenommen, wobei der Parametersatz mit dem höchsten Energieeintrag beim Einbettversuch verfälscht wurde und somit nicht ausgewertet werden konnte. Da dieser im Vorfeld als ungeeignet zur Supporterzeugung eingestuft wurde, sind diese fehlenden Daten für die folgenden Untersuchungen nicht ausschlaggebend.

Mit Hilfe der gewonnenen Daten und Gleichung (5.2) kann nun die Schmelzspurbreite für die untersuchte Konfiguration in Abhängigkeit der Belichtungsparameter berechnet werden. Diese ergibt sich zu

$$b_s = 0,041 \cdot \ln\left(\frac{P_i \cdot d_f}{v_s}\right) + 0,303 \quad (5.3)$$

und es kann in Verbindung mit Gleichung (5.1) die Querschnittsfläche für beliebige, offene Vektorlängen ermittelt werden.

### **5.1.5 Zusammenfassung der geometrischen Untersuchung**

Die geometrische Untersuchung von Supportstrukturen hat gezeigt, dass diese Strukturen generell mit sehr großer Variation der Belichtungsparameter und somit auch des Energieeintrages erzeugbar sind. Eine Variation des Energieeintrages um 1300% stellt sich als zulässig zur Generierung von Supports heraus.

Ein stabilerer und besser reproduzierbarer Prozess wurde mittels der Kreuzbauweise erzielt, da sich diese Geometrien in sich stützen können.

Eine erste nähere Betrachtung zeigt weitgehend unabhängig von der aufgebauten Geometrie, dass jedoch nicht das ganze Spektrum des Energieeintrags zur gezielten Abstützung von Bauteilen geeignet ist. Es wird aufgrund von Riffelbildung bei zu hohem Energieeintrag und Unregelmäßigkeit bei zu niedrigem Energieeintrag der zur Supportgenerierung sinnvolle Bereich auf 10 mJ bis 30 mJ Energieeintrag eingegrenzt. Eine Porosität der Strukturen wird als zulässig betrachtet solange eine genügende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ersichtlich ist. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Parameterpaarungen mit identischen Energieeinträgen hier identische Ergebnisse

liefern. Generell lässt die Paarung einer niedrigen Laserleistung mit einer niedrigen Belichtungsgeschwindigkeit einen stabileren Aufbau bei niedrigerer resultierender Energie zu als eine hohe Laserleistung mit schneller Belichtungsgeschwindigkeit.

Mikroskopisch betrachtet fällt auf, dass mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit die Pulveranhaftungen steigen und in schnellen Bereichen der Belichtungsgeschwindigkeit ab 1000 mm/s teilweise die Ausbildung einer Schmelzspur ausbleibt, beziehungsweise nicht reproduzierbar ist. Dies begründet die steigende Unregelmäßigkeit bei sinkendem Energieeintrag, insbesondere mit schnellen Belichtungsgeschwindigkeiten, was makroskopisch bereits bemerkt wurde.

Die optische Vermessung zeigt, dass die Schmelzspurbreite vom Energieeintrag logarithmisch abhängt. Die einzelnen Belichtungsparameter beeinflussen die Schmelzspurbreite linear. Es wurden Schmelzspurbreiten von 0,075 mm bis 0,2 mm erzeugt. Die zur Supporterstellung als geeignet eingestuft Parameter erzeugten Schmelzspurbreiten zwischen 0,076 mm und 0,155 mm. Tabelle 5.10 zeigt die bereinigte Parameterkombinationen, welche weiter untersucht werden in grün.

*Tabelle 5.10: Geeignete Belichtungsparameter nach Abschnitt 5.1*

		PI [W]					
		50	75	100	125	150	175
vs [m/s]	0,2						
	0,4						
	0,6						
	0,8						
	1						
	1,2						
	1,4						

Es ist zu beachten, dass die verbleibenden Belichtungsparameter mit niedrigen Belichtungsgeschwindigkeiten zunächst unwirtschaftlich erscheinen, da mit schnelleren Geschwindigkeiten und höheren Energien dieselben Energieeinträge und nach Gleichung (5.3) auch dieselben Schmelzspurbreiten erzielt werden können. Solche Belichtungsparameter sind nur anzuwenden, wenn die aufgezeigten Vorzüge hinsichtlich der Prozessstabilität und Dichte benötigt werden. Diese Parameter werden trotzdem weiterhin untersucht und nicht aufgrund von Unwirtschaftlichkeit ausgeschlossen. Somit kann der Einfluss von Laserleistung und Belichtungsgeschwindigkeit getrennt ausgewertet und festgestellt werden, ob sich aufgrund der unterschiedlichen Porosität bei identischer Schmelzspurbreite abweichende Festigkeiten ergeben.

## 5.2 Mechanische Untersuchungen

Im vorherigen Abschnitt wurden Parameter erarbeitet, welche sich generell zur Generierung von Supportstrukturen eignen. Ziel dieses Abschnitts ist es nun, die zur Bauteilabstützung relevanten, mechanischen Eigenschaften dieser Strukturen zu ermitteln.

### 5.2.1 Grundlagen

Die mechanische Beanspruchbarkeit der Supportstrukturen ist zunächst abhängig von den vorhandenen Werkstoffdaten, sowie der je nach Belichtungsparameter entstehenden Querschnittsfläche. Somit kann, da diese Daten nun bekannt sind, berechnet werden, welche Stützwirkung die generierten Supportstrukturen den thermisch induzierten Spannungen entgegenbringen können.

Um die maximale Stützwirkung von Supportstrukturen zu berechnen, kann die Bruchfestigkeit  $R_m$  des verwendeten Werkstoffes herangezogen werden. Die zu erwartende Kraftaufnahme  $F_s$  eines Supports ist somit als

$$F_s = A_s \cdot R_m \quad (5.4)$$

zu erwarten.

Wie bereits aufgezeigt, ergibt sich die Schmelzspurbreite aus den Belichtungsparametern und die Länge des Belichtungsvektors kann durch den erzeugten Datensatz direkt beeinflusst werden. Somit kann die Stützkraft eines Support in Abhängigkeit von der Belichtungsvektorlänge und der Schmelzspurbreite durch Einsetzen von Gleichung (5.1) in Gleichung (5.4) wie folgt dargestellt werden:

$$F_s = \left( v_l \cdot b_s + b_s^2 \frac{\Pi}{4} \right) \cdot R_m \quad (5.5)$$

Für einen offenen Vektor und einer beliebigen Schmelzspurlänge wird die Fläche und somit die aufzunehmende Kraft von zwei Komponenten gebildet. Ein Teil ist ausschließlich abhängig vom Energieeintrag.

$$F_{s(E)} = b_s^2 \frac{\Pi}{4} \cdot R_m \quad (5.6)$$

Der zweite Anteil ist sowohl von der Vektorlänge, als auch von dem Energieeintrag

abhängig.

$$F_{s(v)} = v_l \cdot b_s \cdot R_m \quad (5.7)$$

Die gesamte aufnehmbare Kraft ergibt sich zu

$$F_s = F_{s(E)} + F_{s(v)} \quad (5.8)$$

wobei die Kraftaufnahme berechnet durch Gleichung (5.6) nur bei sehr geringen Vektorlängen zum tragen kommt. Ist die Vektorlänge deutlich größer als die Schmelzspurbreite, kann die Fläche, welche von den Vektorenden gebildet wird, vernachlässigt werden. Um Supportstrukturen unabhängig von Ihrer Vektorlänge vergleichen zu können, wird die spezifische Kraftaufnahme  $F_{s(spez)}$  wie folgt vereinfachend eingeführt.

$$F_{s(spez)} = \frac{F_s}{v_l} \quad \text{für } v_l \gg b_s \quad (5.9)$$

Die Kraftaufnahme, welche ein Support in Abhängigkeit seiner Vektorlänge aufnehmen kann, ergibt sich somit zu:

$$F_{s(spez)} = b_s \cdot R_m \quad (5.10)$$

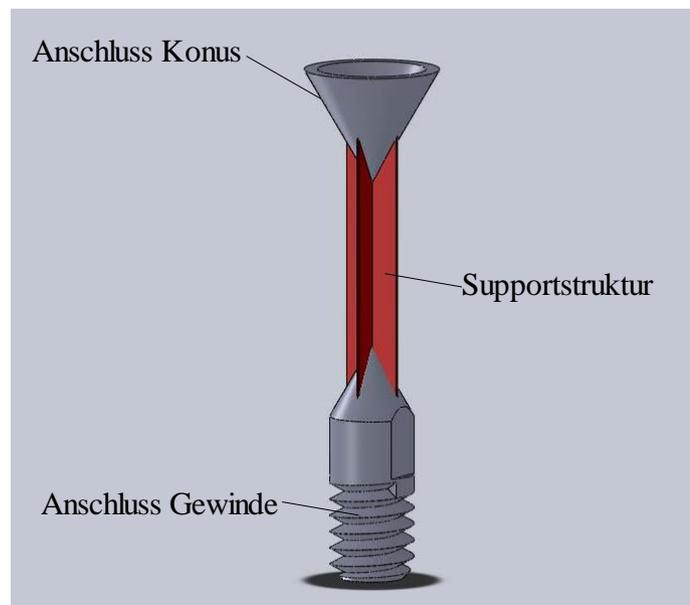
Mit Hilfe dieser Gleichung kann die spezifische Kraftaufnahme anhand der Schmelzspurbreite und der Werkstoffkenndaten, zunächst unabhängig von der Vektorlänge, näherungsweise bestimmt werden. Somit können nach Gleichung (5.9) und (5.10) sowohl experimentell ermittelte, als auch anhand der Schmelzspurbreite berechnete Kraftaufnahmen unabhängig von der Vektorlänge verglichen werden.

Da die vorgehenden Untersuchungen gezeigt haben, dass die Ausbildung beziehungsweise die Entstehung einer durchgängigen Schmelzspur durch die Belichtungsparameter erheblich beeinflusst wird, stellt sich die Frage, ob die Werkstoffkenndaten allen Strukturen zu Grunde liegen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die theoretisch ermittelte Festigkeit der Supportstrukturen im Zugversuch validiert.

## 5.2.2 Vorbereitung

Um Zugversuche an Supports durchzuführen, sind zunächst die zu testenden Probekörper und insbesondere ihre Schnittstelle zur Zugprüfmaschine zu definieren. Das Wechseln der Proben soll mit möglichst wenig Aufwand zu vollziehen sein, damit ohne Probleme eine größere Anzahl an Probekörpern getestet werden kann.

An die zu testenden Supportstrukturen werden direkt im Bauprozess Elemente angebracht, mittels denen sie in entsprechenden Adaptern zur Zugprüfung fixiert werden können. Um sie an beiden Enden befestigen und den Aufbau montieren zu können, werden die Zugproben wie in Abbildung 5.19 ersichtlich ausgeführt.



*Abbildung 5.19: Probekörpergeometrie zur Zugprüfung*

An einer Seite muss die zu testende Supportgeometrie in einem Konus gehalten werden und an der anderen Seite durch eine Schraubverbindung, welche zwecks Montierbarkeit einen geringeren Durchmesser besitzen muss als der Adapter, der das Gegenstück zum Konus bildet. Ein Adapter zum Ansetzen eines Maulschlüssels wird ebenfalls angebracht, welcher zusätzlich dazu dient, die Ausrichtung der Supportstruktur zum Beschichter nachvollziehen zu können.

Um die Bauzeit gering zu halten und so viele Proben wie möglich in einem Set herstellen zu können, wird die Höhe der Supportstrukturen auf 10 mm gesetzt und die Anschlussdurchmesser betragen 4 mm am Gewinde und 5 mm am Konus. Die Verbindungen zwischen Supportstruktur und den Anschlüssen wird konisch ausgeführt, um die Anbindung der Supports stabiler zu halten als die Supports. Somit wird ein Versagen innerhalb des Querschnitts der Strukturen gefördert. Es kann somit zur Anbringung der Supportstrukturen ein Durchmesser von maximal 3,5 mm genutzt werden.

Nun müssen die in Abbildung 5.19 gezeigten Anschlussgeometrien an die vorhandene Schnittstelle der Zugprüfmaschine adaptiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Wechsel der Zugproben mit möglichst wenig Aufwand geschehen und kein Demontieren der Adapter notwendig sein soll. Die Zugproben sind mit dem Gewinde voraus von hinten durch die Aufnahme des Konus zu führen. Somit ist hier eine Aussparung vorzusehen. Anschließend sind sie mit der Gewindeaufnahme zu verschrauben, wobei noch keine Verbindung von der konischen Seite ausgehen darf, da dadurch die filigranen Proben einer Torsion ausgesetzt werden könnten, welche sie vor der Prüfung bereits beschädigen. Abbildung 5.20 zeigt, wie die Adaption des Probekörpers zur Zugprüfmaschine gelöst wird.

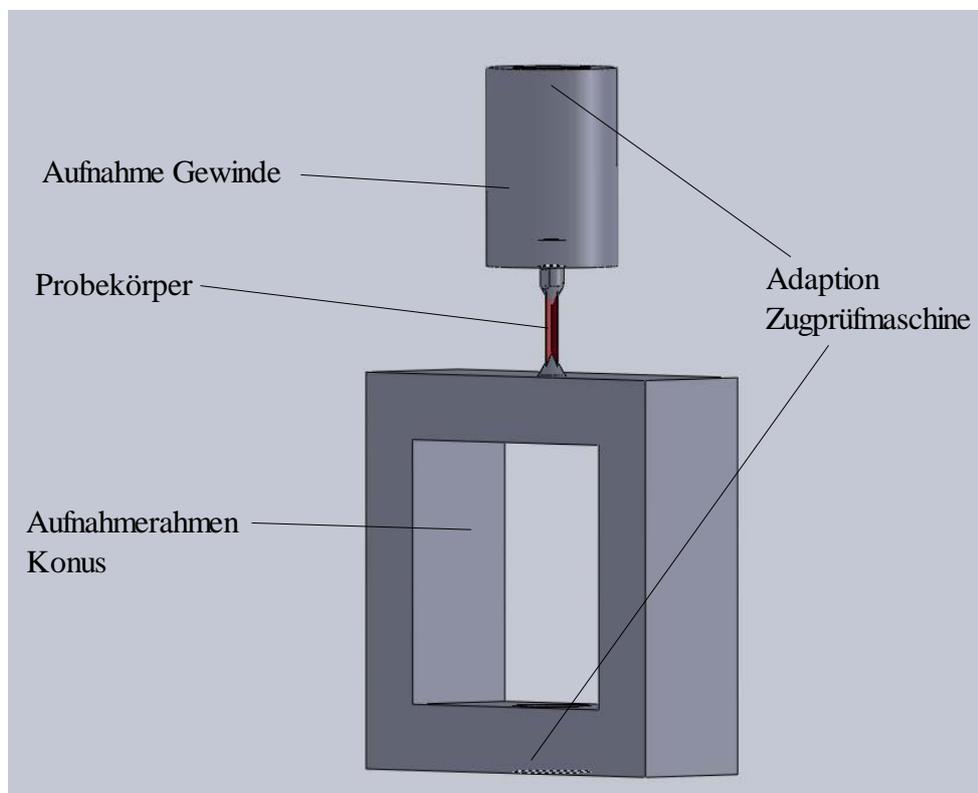


Abbildung 5.20: Adaption der Probekörper an die Zugprüfmaschine

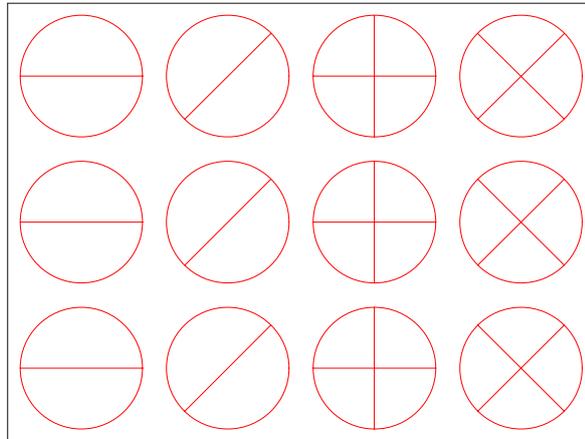
Die Fertigungszeichnungen der Adapter sind im Anhang abgelegt. Sie werden so ausgelegt, dass sie mindestens die 200-fache Steifigkeit der Probekörper aufweisen. Somit kann später auf eine Bereinigung der Messdaten aufgrund der Elastizität der Adapter verzichtet werden.

Vor der Definition der Testreihe wird ein Vorversuch durchgeführt, indem die in Abbildung 5.19 festgelegte Geometrie in verschiedenen Ausrichtungen mit Steg- und Kreuzsupports und einem stabilem Belichtungsparameter aufgebaut wird. Hier wird zum Einen geprüft, ob der konische Anschluss in dieser Ausführung von den Supportstrukturen getragen werden kann und zum Anderen, ob das Gewinde funktionsfähig hergestellt werden kann. Wenn ein Support in Steg Ausführung mit dem Belichtungsvektor parallel zum Beschichter ausgerichtet ist, ist kein Aufbau des Konus möglich, da der Support in dieser Ausrichtung der vom Beschichter ausgehenden Kraft nicht standhalten kann. Alle anderen Geometrien und Ausrichtungen sind problemlos zu erzeugen. Nach einer geringen Anpassung des Gewindes kann die Funktionsfähigkeit des Versuchsaufbaus beim Zugversuch geprüft werden. Hier sind keine Änderungen notwendig. Die Kraft/Weg-Diagramme zeigen gute Übereinstimmungen zueinander und erste Ausreißer sind am Verlauf deutlich zu erkennen.

Nachdem der Versuchsaufbau validiert ist, kann die Versuchsreihe definiert werden. Es werden die nach Tabelle 5.10 stabil eingestuften Parameter verwendet. Somit sind 34 Belichtungsparameter zu untersuchen.

Es werden wieder zwei Geometrien untersucht. Stege mit einer Vektorlänge von 2,5 mm und Kreuze mit einer gesamten Vektorlänge von 5 mm. Diese Geometrien werden in jeweils zwei Ausrichtungen untersucht. Rechtwinklig und unter einem Winkel von  $45^\circ$  zum Beschichter, wobei zur späteren Identifizierung nur die Supportstrukturen gedreht werden und die Ausrichtung der Gewindeaufnahme im Maschinenkoordinatensystem konstant gehalten wird. Somit ist an der Ausrichtung der Werkzeugaussparung zu erkennen, in welcher Ausrichtung das Bauteil auf der Bauplatzform erzeugt wurde. Zur statistischen Absicherung genügen drei Probekörper jedes Typs, da die Voruntersuchungen eine geringe Streuung der Ergebnisse aufwiesen.

Abbildung 5.21 zeigt schematisch die Anordnung der Zugproben innerhalb eines Belichtungsparameters. Auch hier werden tendenziell instabile Elemente so angeordnet, dass sie als letztes beschichtet werden.



*Abbildung 5.21: Anordnung der Zugproben*

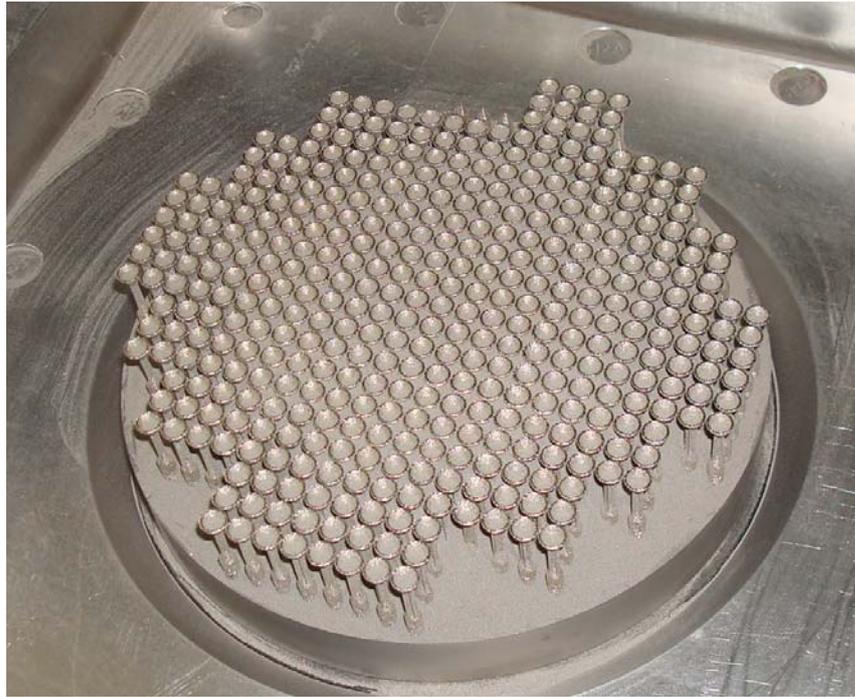
Es sind insgesamt 408 Zugproben zu generieren, welche aufgrund des geringen Flächenbedarfs in einem Job hergestellt werden können. Auch die Belichtungsparameter werden so zueinander angeordnet, dass solche Zugproben, die instabil einzuschätzen sind, als letztes beschichtet werden und ein Versagen dieser Strukturen während des Generierens möglichst keine Beschädigung anderer Elemente zur Folge hat. Eine Skizze und eine Tabelle, aus denen die Anordnung der Parameter zueinander hervorgeht, sind im Anhang abgelegt.

### **5.2.3 Durchführung**

Zunächst müssen die Maschinendaten erzeugt werden. Hierzu werden die in Abbildung 5.19 dargestellten Anbindungsgeometrien im STL-Datenformat an Magics übergeben. Anschließend werden mit dem Supportgenerator manuell sowohl die Steg- als auch die Kreuzsupports mit einer Vektorlänge von jeweils 2,5 mm angebracht und diese getrennt gesliced. Diese Daten werden mittels der Anlagesoftware nach Abbildung 5.21 vervielfältigt, positioniert und orientiert. Die Probekörper eines Belichtungsparameters werden als Auftragsdatei abgelegt. Die so entstandene Auftragsdatei wird vervielfältigt, erneut eingeladen, des zuvor erarbeiteten Rasters entsprechend positioniert und erneut abgelegt. Somit entsteht für jeden Belichtungsparameter eine Auftragsdatei mit

24 Elementen, was dem Maschinenrechner keine Probleme bereitet. Diesen werden mittels eines Tabellenverarbeitungsprogramms die LaserIDs, welche in Abschnitt 5.1.3 ausgelesen wurden, zugewiesen. Die Adaptionselemente werden alle mit dem Standardparameter für diesen Werkstoff belichtet, sodass diese zum Einen nicht voneinander abweichen und zum Anderen eine optimale Festigkeit aufweisen. Sie werden mit einer Laserleistung von 200 W und einer Belichtungsgeschwindigkeit von 800 mm/s belichtet. Nun sind die Auftragsdateien mit allen relevanten Parametern versehen und können gemeinsam in die Anlagensoftware eingeladen werden.

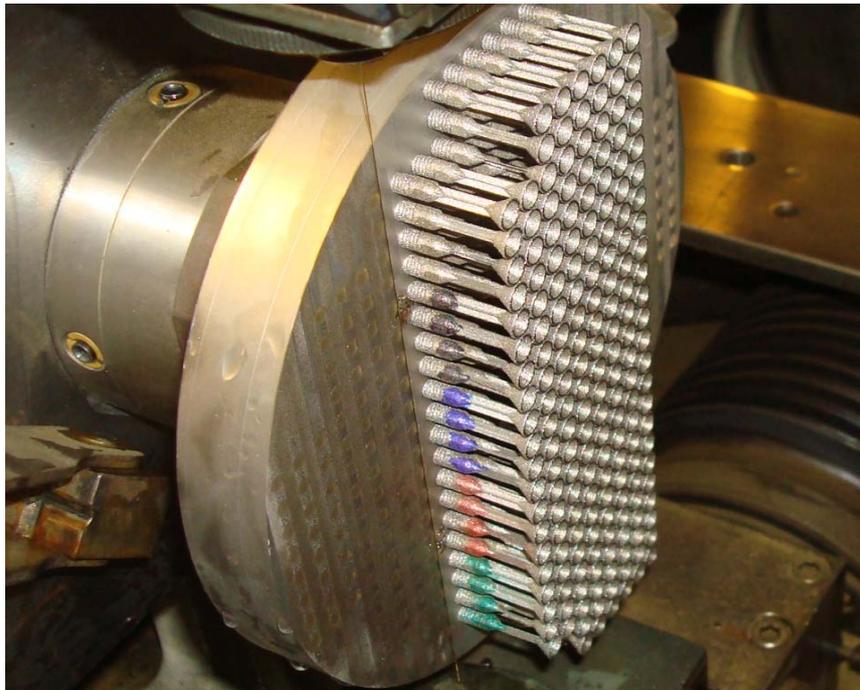
Da nun nicht nur einzelne Belichtungsvektoren erzeugt werden müssen, sondern die Anbindungsgeometrien aus massiven Bauteilen bestehen, entsteht ein deutlicher Rechenaufwand zur Generierung der Belichtungsvektoren. Die Berechnung der Belichtungsvektoren nimmt ungefähr das 15-fache der Belichtungs- und Beschichtungszeit in Anspruch. Dies liegt daran, dass die Belichtungsvektoren für die jeweilige Schicht berechnet werden, während die vorherige Schicht belichtet wird und die Software laut Aussage des Anlagenherstellers nicht erkennt, dass es sich um 408 identische Bauteile handelt und somit für solch viele Bauteile in einem Job nicht ausgelegt ist [17]. Eine Bauzeit von zwölf Tagen konnte leider nicht akzeptiert werden, zum Einen aus terminlichen Gründen und zum Anderen da aufgrund der langen Wartezeiten zwischen den Belichtungsvorgängen von der Realität abweichende Temperaturverhältnisse zu erwarten waren. Somit musste ein Weg gefunden werden, den Prozess zu beschleunigen und die Rechendauer zu verkürzen. Es wurde vermutet, dass das Bestreben, den Scankopf stets optimal über allen zu belichtenden Bauteilen zu positionieren, bei 408 Bauteilen sehr viel Rechenzeit in Anspruch nimmt. Um die jeweils optimale Position zu berechnen, muss eine Schleife durchlaufen werden, welche sich nicht linear mit steigender Bauteilanzahl vergrößert, sondern potenziell. Somit wurde die Option der Quadrantenoptimierung für diesen Bauprozess deaktiviert und die Quadranten wurden manuell möglichst optimal positioniert, sodass kein Support getrennt aus mehreren Scankopfpositionen belichtet wird. Die Stillstandszeit wird so nahezu vollständig eliminiert. Nur in den Schichten, in denen sowohl Adapter, als auch Support zu belichten ist, ergeben sich Rechenzeiten, die ca. 50% höher ausfallen als die Belichtungszeiten. Somit konnte der Bauprozess innerhalb von 50 Stunden abgeschlossen werden. Abbildung 5.22 zeigt alle Zugproben während des Abrüstens der SLM-Anlage.



*Abbildung 5.22: 396 generierte Zugproben in der SLM-Anlage*

Ein Parameter wurde nicht erfolgreich aufgebaut. Die Fehlerquelle ist ein Bedienungsfehler bei der Einpflege der Belichtungsparameter in der SLM-Anlage.

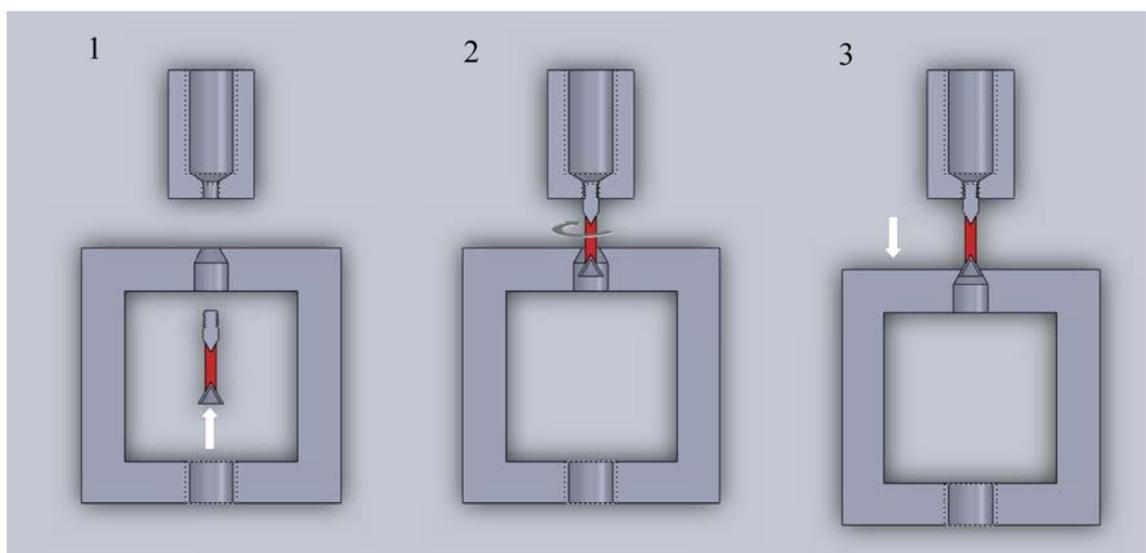
Nach dem Generieren müssen die Proben von der Bauplatzform abgetrennt werden, sodass sie zum Zugversuch adaptiert werden können. Abbildung 5.23 zeigt die Zugproben während des Abtrennens.



*Abbildung 5.23: Zugproben während des Abtrennens*

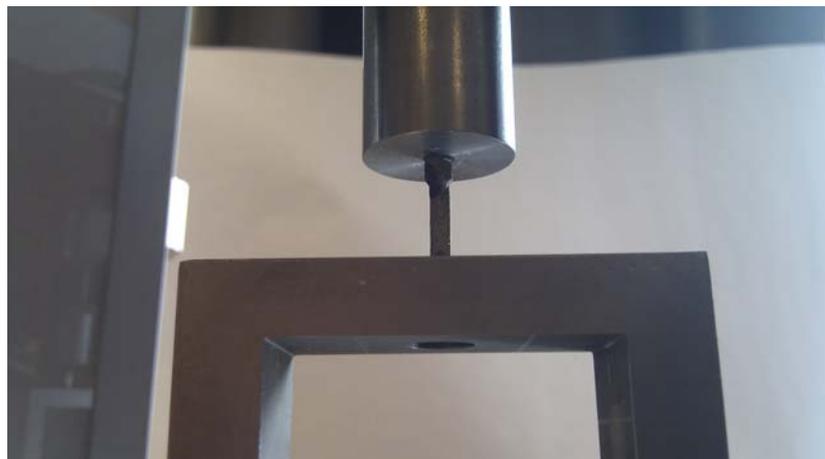
Wie bereits erwähnt, sind die Ausrichtungen zum Beschichter und die Geometrietypen ersichtlich. Um jedoch nach dem Trennen von der Bauplattform die Belichtungsparameter zuordnen zu können, werden die Proben nach den Belichtungsparametern, wie in Abbildung 5.23 zu sehen ist, farblich markiert.

Aufgrund der im Vorversuch erprobten Adaption der Proben an die Zugprüfmaschine, lassen sich nahezu alle Proben, wie in Abbildung 5.24 dargestellt, montieren und prüfen.



*Abbildung 5.24: Montage der Zugproben in den Adaptern*

Im ersten Schritt wird die Zugprobe durch die Aussparung im Aufnahmerahmen durch die konische Aufnahmegeometrie geführt. Im zweiten Schritt wird der Probekörper in das Gewinde der gegenüberliegenden Aufnahme eingeschraubt. Hierbei ist zu beachten, dass die Probe im Konusbereich noch nicht anliegt, da sie dadurch mit einer Torsion belastet und somit beschädigt werden könnte oder eine Zugspannung eingeleitet wird, die zu einer Kaltverfestigung oder Beschädigung führen kann. Im dritten Schritt kann die Zugprüfmaschine so verfahren werden, dass sich die Probe im Konus des Aufnahme Rahmens zentriert, es darf jedoch noch keine Kraft aufgebracht werden. Abbildung 5.25 zeigt eine im verwendeten Prüfstand montierte Probe vor dem Zugversuch.



*Abbildung 5.25: Im Prüfstand montierte Zugprobe*

Ist die Probe adaptiert, kann der Prüfvorgang gestartet werden, wobei Kraft und Weg aufgenommen werden. Die Zugversuche werden alle mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 m/min durchgeführt.

Die Durchführung der Zugversuche liefert für jede Probe den Kraft/Weg-Verlauf, der in einer Textdatei abgelegt wird. Dies lässt jedoch nicht unmittelbar alle gewünschten Kennwerte erkennen. Somit müssen die erzeugten Datensätze mittels Tabellenkalkulation aufbereitet werden.

Zunächst werden alle Daten getrennt nach Belichtungsparametersätzen unter Berücksichtigung der Probengeometrie und -ausrichtung eingelesen. Um bereits frühzeitig eine Aussage über die Streuung der erzeugten Ergebnisse treffen zu können und Ausreißer frühzeitig zu erkennen, werden die jeweils drei identischen Proben gemeinsam dargestellt und weiterverarbeitet.

Es wird für jede Probe die maximale Kraftaufnahme ermittelt sowie die nach Gleichung (5.9) definierte spezifische Kraftaufnahme, um die Steg- und Kreuzgeometrien hinsichtlich ihrer Kraftaufnahme vergleichen zu können. Somit wird sowohl die absolute Kraftaufnahme als auch die Kraft, welche pro 1 mm Vektorlänge aufgenommen werden kann, in Erfahrung gebracht.

Die Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter sind mit Hilfe von Kraft/Weg-Diagrammen nicht zu ermitteln. Hierzu müssen Spannungs/Dehnungs-Diagramme generiert werden. Dies geschieht, indem aus den in Abschnitt 5.1 ermittelten Schmelzspurbreiten und den Vektorlängen der Probegeometrien nach Gleichung (5.1) die Flächen der jeweiligen Supportstrukturen berechnet werden. Die gemessene Kraftaufnahme in Verbindung mit den Querschnittsflächen liefern die jeweiligen Spannungen. Die Dehnung wird mittels der in Abschnitt 5.2.2.1 festgelegten Höhe der Supportstrukturen und dem im Zugversuch aufgenommenen Weg berechnet. Somit können Spannungs/Dehnungs-Diagramme zur weiteren Auswertung der Probencharakteristik erzeugt werden.

Die Maximalspannung kann, wie die maximale Kraftaufnahme direkt ausgelesen werden. Um jedoch die Dehngrenze zu ermitteln sind weitere Berechnungen notwendig. Hierzu muss zunächst die Hook'sche Gerade im Spannungs/Dehnungs-Diagramm identifiziert, diese versetzt und anschließend der Schnittpunkt mit der Spannungs/Dehnungs-Kurve gefunden werden. Die Startpunkte der Messungen ließen sich aufgrund der Schraubverbindung an den Probekörpern nicht konstant halten und die Startzeiten sind, softwarebedingt, abhängig vom Bediener. Außerdem konnte zu Beginn die Regelmäßigkeit der Kurvenverläufe zueinander nicht eingeschätzt werden. Somit wurden die elastischen Bereiche manuell identifiziert und kein komplexer Algorithmus programmiert, dessen Funktionsfähigkeit zu 100% getestet werden müsste.

Abbildung 5.26 zeigt beispielhaft die zur Auswertung aufbereiteten Spannungs/Dehnungs-Kurven von drei Probekörpern.

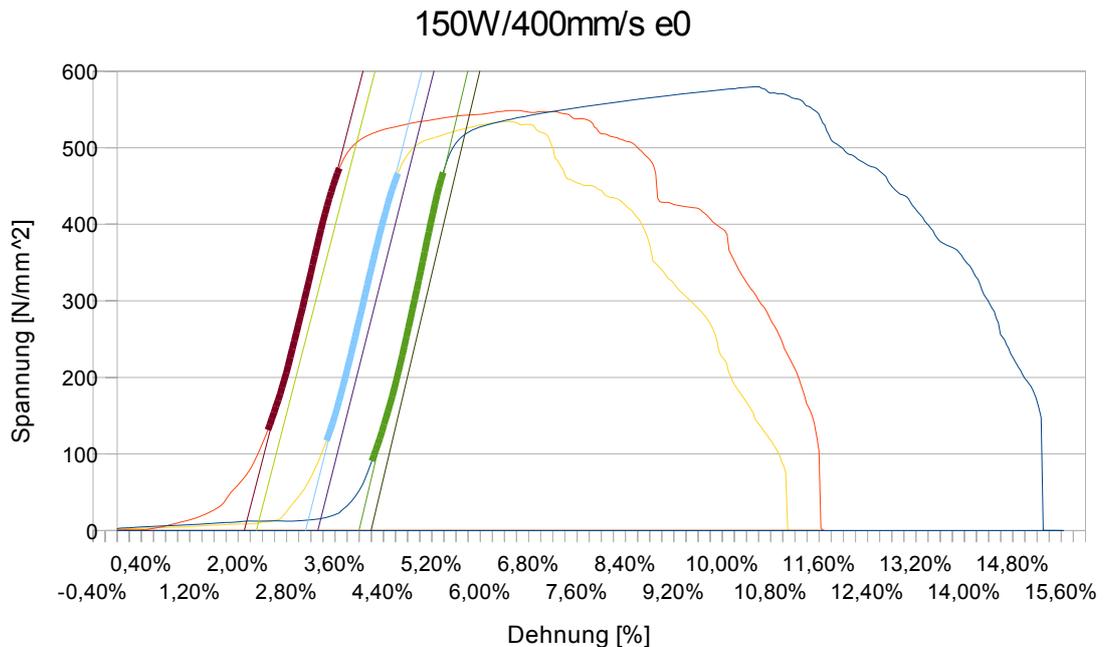


Abbildung 5.26: Spannungs/Dehnungs-Diagramm zur Ermittlung der Dehngrenze

Wie in Abbildung 5.26 zu sehen, geschieht der Abriss der Geometrien nicht abrupt und teilweise sehr unregelmäßig. Da bei der Ermittlung der Zugfestigkeit auffiel, dass die Länge des plastischen Bereichs deutlich variiert, ist auszuwerten, wie sich dieser in Abhängigkeit der Belichtungsparameter verhält. Aufgrund des unregelmäßigen Abrisses und des hohen manuellen Aufwandes, wird davon abgesehen, die Bruchdehnung zu bestimmen. Stattdessen wird die plastische Dehnung der Probekörper bei Erreichen der Maximalkraft ausgelesen.

Sind für die je zwölf Proben der 34 Belichtungsparameter Maximalkraft, und -spannung, Dehngrenze, Dehnung bei Maximalkraft sowie die Steigung der Hook'schen Gerade ermittelt, müssen diese Daten zusammengeführt werden. Hierzu werden zunächst innerhalb der Belichtungsparameter die Daten komprimiert, sodass jeder Belichtungsparameter nur noch Werte für die Ausrichtungs- und Geometrietypen liefert, inklusive Standardabweichung. Anschließend werden die Daten der Belichtungsparameter zusammengeführt, sodass die Einflüsse der Belichtungsparameter, sowie des Geometrietyps und der Ausrichtung ausgewertet werden können.

## 5.2.4 Auswertung

Da nun alle relevanten Daten erzeugt, aufbereitet und zusammengeführt wurden, können nun die Auswirkungen der Belichtungsparameter und geometrischen Variationen auf die mechanische Charakteristik der Supportstrukturen betrachtet werden.

Die Auswahl der zu untersuchenden Belichtungsparameter nach Abschnitt 5.1 hat zu nahezu 100% einen erfolgreichen Aufbau der Probekörper zur Folge, sodass nahezu alle Probekörper ausgewertet werden können. Lediglich drei Zugversuche können nicht ausgewertet werden, wobei es sich hier um Bedienfehler an der Zugprüfmaschine handelt. Es wird eine Streuung der Maximalkraft zwischen identischen Proben von 10% zugelassen, wobei möglichst nur Proben mit offensichtlichen Fehlstellen, wie zum Beispiel Rissen oder fehlerhaften Anbindungen der Supportstrukturen an die Adapter, als Ausreißer deklariert und in den quantitativen Auswertungen nicht betrachtet werden.

Nun gilt es, auszuwerten wie sich die Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen auswirken. Abbildung 5.27 verdeutlicht die zu untersuchende Zusammenhänge.

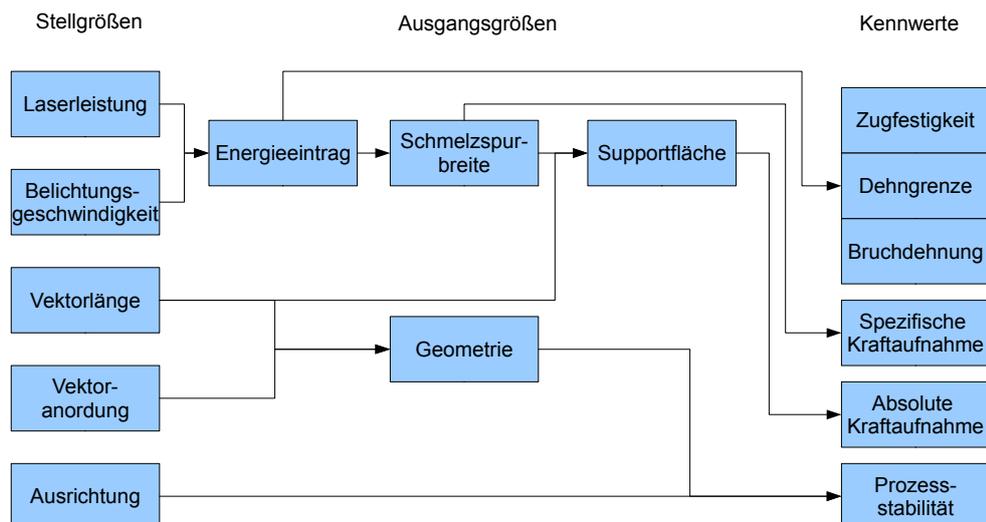
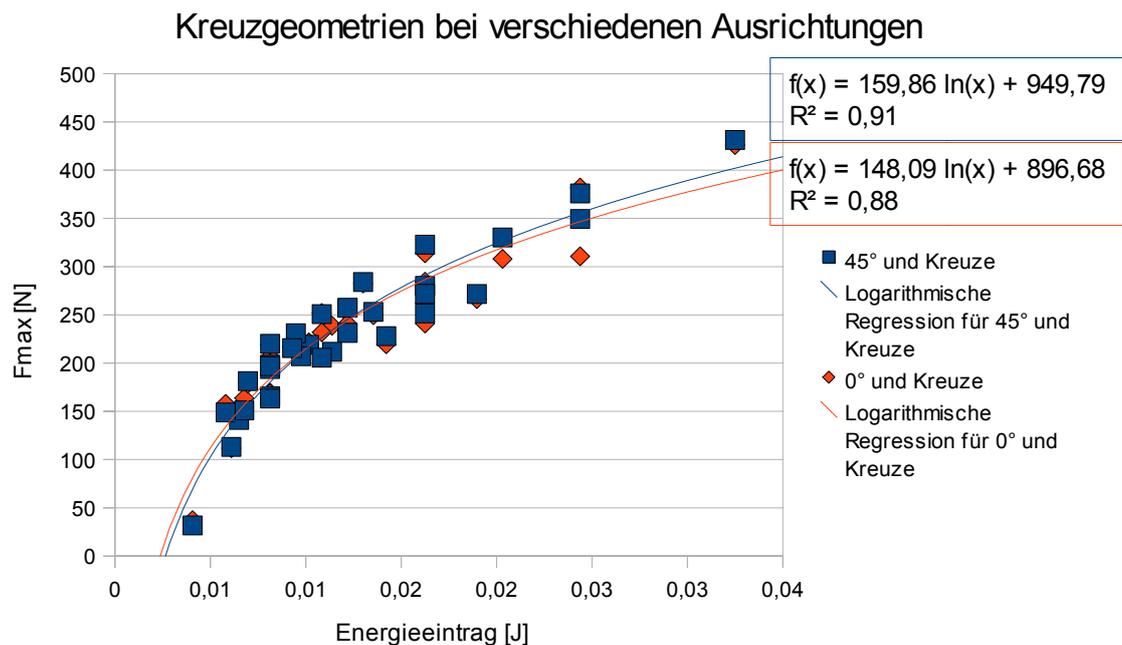


Abbildung 5.27: Erwartete Zusammenhänge zwischen Probenparameter und Ausgangsgrößen

Im ersten Schritt werden zunächst die Parameter betrachtet, welche auf Basis der im Zugversuch gesammelten Daten direkt auswertbar sind. Die entstehenden Supportflächen sind aufgrund der zuvor in Abschnitt 5.1 gesammelten Versuchsdaten zu ermitteln. Um mögliche Messungenauigkeiten dieser Untersuchung zu eliminieren, werden zunächst nur Kennwerte herangezogen, welche unabhängig von der Supportfläche ermittelt werden können. Dies sind lediglich die absolute und die spezifische Kraftaufnahme sowie die Prozessabweichungen ausgehend vom Geometrietyp und der Ausrichtung zum Beschichter.

Zunächst wird untersucht, ob sich die Ausrichtung zum Beschichter während des Generierprozesses auf die Festigkeit der Strukturen auswirkt. Hierzu eignet es sich, jeweils die absolute Kraftaufnahme in Abhängigkeit des Energieeintrags heranzuziehen. Abbildung 5.28 stellt dieses Abhängigkeit für Kreuzgeometrien und beide Ausrichtungen zum Beschichter dar.



*Abbildung 5.28: Absolute Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags bei Kreuzgeometrien gestaffelt nach Ausrichtungen*

Es zeigen sich logarithmische Kurvenverläufe. Diese erscheinen plausibel, da die aufzunehmende Kraft nach Gleichung (5.4) in direkter Abhängigkeit zur Querschnittsfläche steht, und diese, wie bereits nachgewiesen, auch in logarithmischer Abhängigkeit zum Energieeintrag steht. Jedoch lässt sich hier eine deutlich geringere

Streuung der Werte erkennen, als bei der Vermessung der Schmelzspurbreiten. Dies lässt sich durch eine geringere Messunsicherheit begründen. Wie im Diagramm zu sehen ist, lässt sich der Verlauf der Messwerte gut durch eine logarithmische Funktion abbilden. Betrachtet man beide Kurven zueinander, lässt sich kein nennenswerter Einfluss der Ausrichtung der Kreuzgeometrien zum Beschichter erkennen. Zusätzlich wird untersucht, ob dies auch für die Steggeometrien gilt. Abbildung 5.29 zeigt die maximale Kraftaufnahme in Abhängigkeit des Energieeintrags für die Steggeometrien.

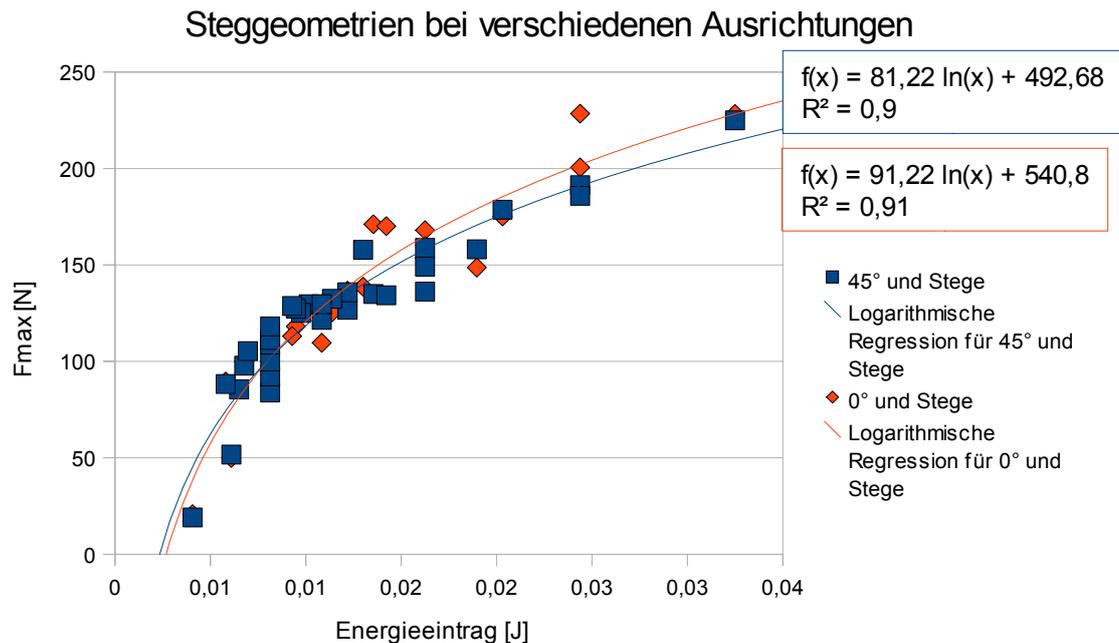


Abbildung 5.29: Absolute Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags bei Steggeometrien gestaffelt nach Ausrichtungen

Hier zeigen sich qualitativ dieselben Kurvenverläufe. Bei einer ähnlich guten Abbildbarkeit mittels der logarithmischen Regressionskurve, weichen die Kurven etwas stärker voneinander ab, ein nennenswerter Unterschied zwischen den Ausrichtungen lässt sich jedoch nicht feststellen.

Auffällig ist, dass die geringen Unterschiede bei unterschiedlichen Ausrichtungen sich bei Kreuz- und Steggeometrien entgegengesetzt aufzeigen. Dies könnte durch die mechanische Widerstandsfähigkeit durch den Beschichter begründet werden. Eine um 45° ausgerichtete Kreuzstruktur richtet beide Belichtungsvektoren gleichermaßen zum Beschichter aus, wobei die Länge, welche mit dem Beschichter in Kontakt steht stets konstant ist. Eine zum Beschichter senkrecht ausgerichtete Kreuzstruktur hat zum

größten Teil eine geringere Kontaktlänge, in der Mitte jedoch für kurze Zeit eine um ein Vielfaches größere. Die Kontaktlänge ist jedoch generell über den Support unregelmäßig. In dieser Hinsicht ist die optimale Ausrichtung für eine Kreuzstruktur  $45^\circ$ , sodass eine gleichmäßige Beschichtung und gegebenenfalls eine gleichmäßige Krafteinbringung vom Beschichter ausgehend geschieht. Somit könnte hier eine größere Festigkeit erwartet werden. Bei Steggeometrien ist nur ein Vektor vorhanden, was bei jeder Ausrichtung eine konstante Kontaktlänge bedeutet. Somit ist die optimale Ausrichtung nach denselben Gesichtspunkten im Gegensatz zu den Kreuzgeometrien  $0^\circ$ , da hier dem Beschichter eine minimale Kontaktlänge entgegensteht. Dort deutet sich in Abbildung 5.28 auch eine höhere Festigkeit an.

Die Unterschiede ausgehend von der Ausrichtung zum Beschichter stellen sich jedoch als so gering heraus, dass die verschiedenen Ausrichtungen zum Beschichter in den folgenden Untersuchungen nicht weiter getrennt betrachtet werden müssen.

Nachdem sich der erste Einflussfaktor, die Ausrichtung zum Beschichter, als für die Kraftaufnahme unerheblich erwiesen hat, wird nun untersucht, inwiefern sich der Geometrietypp auf die Kraftaufnahme auswirkt. Hierzu muss auf die spezifische Kraftaufnahme zurückgegriffen werden, da beide Geometrien eine unterschiedliche Vektorlänge und somit Querschnittsfläche aufweisen. Die im Maschinendatensatz festgelegte Vektorlänge kann jedoch als geringer Störfaktor eingestuft werden, sodass von dieser keine Verfälschung der Daten erwartet werden kann. Die spezifische Kraftaufnahme nach Gleichung (5.8) in Abhängigkeit des Energieeintrags getrennt für Kreuz- und Steggeometrien wird in Abbildung 5.30 dargestellt.

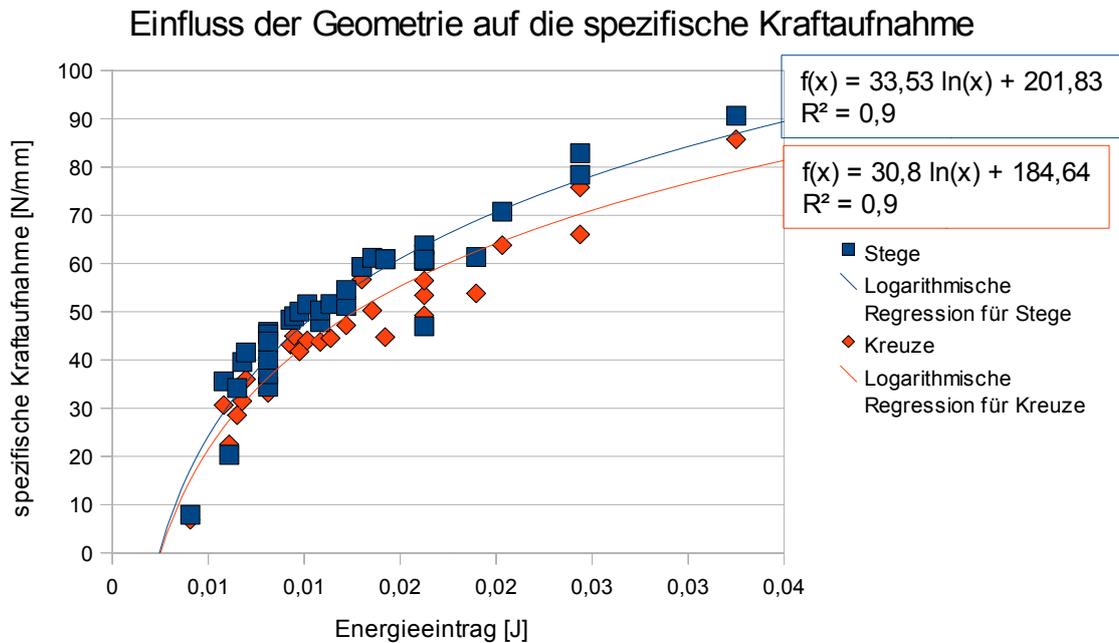
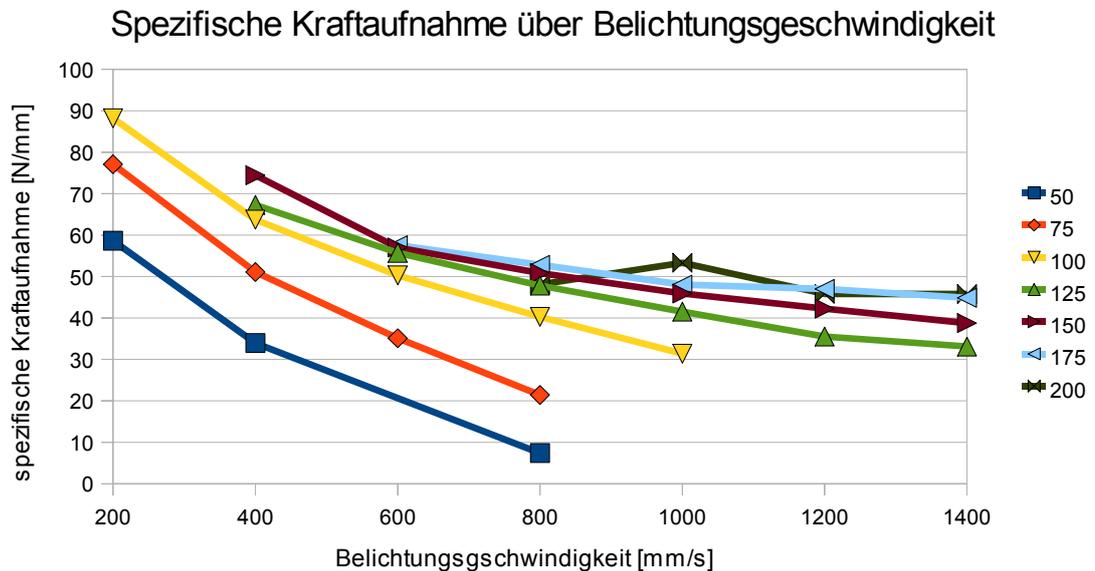


Abbildung 5.30: Spezifische Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags gestaffelt nach Geometrietypen

Es ergibt sich erneut und wie zu erwarten, eine logarithmische Abhängigkeit, welche sich gut durch die entsprechenden Regressionskurven beschreiben lässt. Die Kurven der Geometrietypen decken sich qualitativ. Die Steggeometrien weisen jedoch eine etwas größere spezifische Festigkeit auf als die Kreuzgeometrien. Der Ursprung kann darin liegen, dass die Überschneidung beider Vektoren bei den Kreuzgeometrien nicht berücksichtigt ist. Dies verursacht jedoch bei der gewählten Vektorlänge lediglich einen Fehler von ca. 3%. Eine andere Möglichkeit ist, da auch in Supports Spannungen thermisch induziert werden und mit steigender Supportlänge die Spannung innerhalb des Supports steigt. Dadurch neigen lange Supports, insbesondere mit großen Energieeinträgen hergestellt eher zur Bildung von Mikrorissen, welche die Festigkeit herabsetzen. Die Überlappung der Vektoren bei der Kreuzbauweise könnte solch einen Effekt noch verstärken. Die Abweichung zwischen den Geometrietypen ist dennoch zu gering, sodass ohne weitere Testreihen keine abgesicherte Aussage getroffen werden kann, ob sich die Vektorlänge signifikant auf die Festigkeit auswirkt. Hier hat jedoch der Geometrietyper keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit und wird nicht weiter getrennt betrachtet.

Da weder von der Ausrichtung zum Beschichter noch vom Geometrietyper ein signifikanter Einfluss auf die Festigkeit ausgeht, muss nun nur noch festgestellt werden, inwiefern sich die Belichtungsparameter auf die Kraftaufnahme auswirken. Da

nun Kreuz- und Steggeometrien gemeinsam ausgewertet werden können, ist wieder die spezifische Kraftaufnahme heranzuziehen. Zunächst wird untersucht, wie sich Belichtungsgeschwindigkeit und Laserleistung getrennt voneinander auf die Kraftaufnahme auswirken. Abbildung 5.31 zeigt die Abhängigkeit der spezifischen Kraftaufnahme von der Belichtungsgeschwindigkeit.



*Abbildung 5.31: Spezifische Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen*

Es ergeben sich, ähnlich wie bei den Untersuchungen der Schmelzspurbreiten, annähernd lineare Abhängigkeiten. Mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit, also sinkendem Energieeintrag, sinken auch die aufnehmbaren Kräfte der Supports. Jedoch sind die Steigungen über die Laserleistungen nicht konstant, wie es die Verläufe der Schmelzspurbreiten näherungsweise sind. Mit sinkender Laserleistung steigt das Gefälle der Verläufe.

Die Abhängigkeit der spezifischen Kraftaufnahme von der Laserleistung, in Abbildung 5.32 dargestellt, zeigt, dass die Kraftaufnahme mit steigender Laserleistung zunimmt. Es stellen sich jedoch, wie nach Abbildung 5.30 zu erwarten ist, mit langsameren Belichtungsgeschwindigkeiten höhere Steigungen ein. Die Verläufe sind größtenteils linear, wobei sich bei Belichtungsgeschwindigkeiten von 600 mm/s und 800 mm/s Zusammenhänge höheren Grades andeuten.

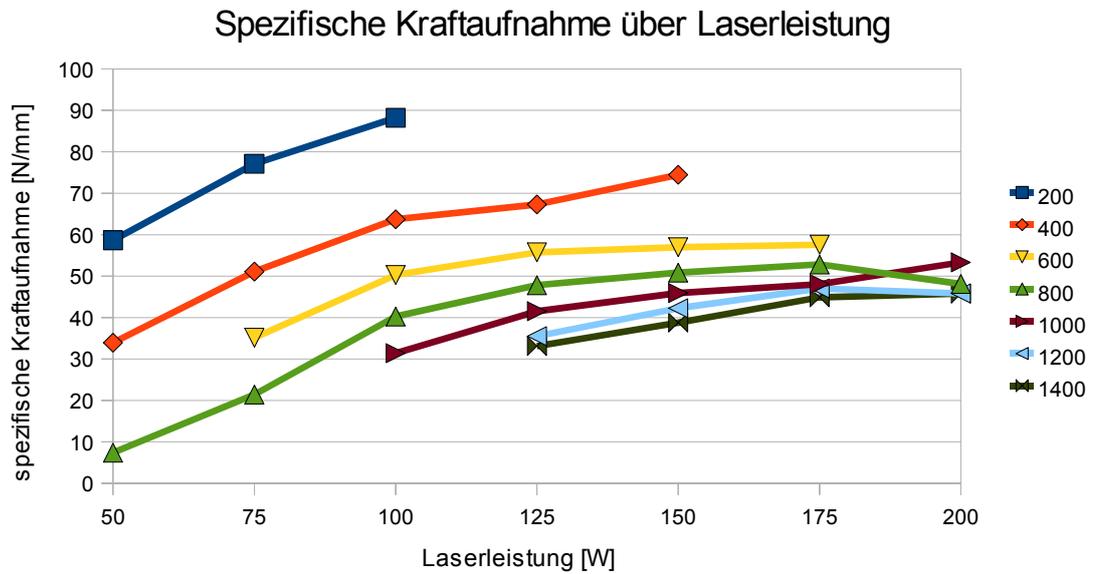


Abbildung 5.32: Spezifische Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten

Es lässt sich nun vermuten, dass sich die maximale Kraftaufnahme nicht mittels Gleichung (5.10) alleine aus der Schmelzspurbreite und der Zugfestigkeit des Werkstoffes berechnen lässt. Um dem nachzugehen, wird zunächst die Kraftaufnahme in Abhängigkeit des Energieeintrags mit den nach Gleichung (5.10) berechneten Werten verglichen. Abbildung 5.33 stellt diese Verläufe gemeinsam dar.

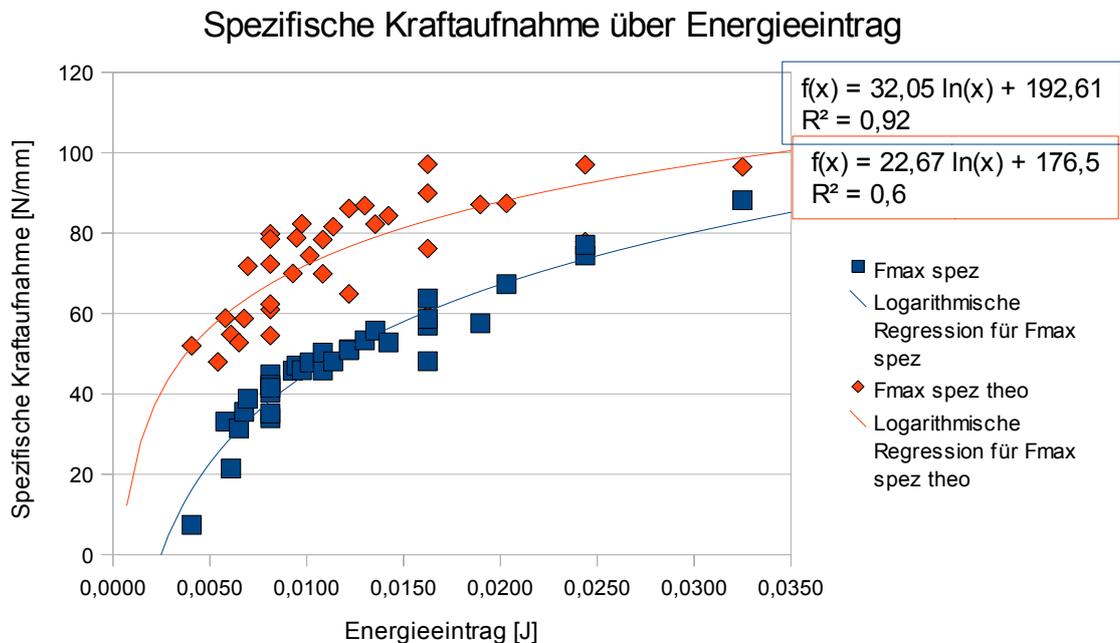


Abbildung 5.33: Theoretische und tatsächliche Supportfestigkeit in Abhängigkeit des Energieeintrags

Auch, wenn sich die theoretische Supportfestigkeit aufgrund der Messdaten sehr viel schlechter logarithmisch annähern lässt, ist zu erkennen, dass die tatsächliche Festigkeit deutlich unter der erwarteten liegt, dies aber nicht gleichmäßig. Bei niedrigen Energieeinträgen ist die Abweichung deutlich größer als bei großen Energieeinträgen, wo beide Verläufe nahezu parallel verlaufen. Mit sinkendem Energieeintrag scheinen somit nicht nur die Supportflächen zu sinken, sondern zusätzlich sich auch die Festigkeiten der Strukturen zu vermindern. Eine Erklärung liefert der Zusammenhang zu den vorherigen Untersuchungen. Die hier verwendeten Belichtungsparameter sind stabil aufzubauen, bei geringen Energieeinträgen sind jedoch Poren in den Strukturen zu erwarten, welche sich großteils nicht auf die gemessene Schmelzspurbreite auswirken. Da sich bei niedrigen Energien verstärkt Poren bilden, ist auch hier eine verstärkte Verminderung der Festigkeit zu erwarten. Bei hohen Energieeinträgen erweisen sich die Strukturen als porenfrei. Eine konstante Verminderung der Festigkeit im Gegensatz zu den Werkstoffkennwerten ist aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit zu erwarten. Die recht raue Oberfläche der SLM-Strukturen hat eine höhere Kerbwirkung zur Folge und setzt somit die Festigkeit der Strukturen um einen konstanten Faktor herab, angenommen, dass die Oberflächenbeschaffenheiten hier nicht maßgeblich von den Belichtungsparametern beeinflusst werden. Um diese Einflüsse zu beschreiben, sind diese zunächst getrennt zu betrachten. Hierzu werden die sich aus dem Spannungs/Dehnungs-Diagramm ergebenden Werkstoffkennwerte betrachtet.

Um den Ursprung der Differenzen zwischen theoretischer und tatsächlicher Kraftaufnahme ausfindig zu machen, werden nun die sich aus den Kraft/Weg-Diagrammen ergebenden Werkstoffkenndaten betrachtet. Es ist zu beachten, dass mögliche Messfehler bei der Schmelzspurbreitenbestimmung sich hier direkt auf die Ergebnisse auswirken, da diese in Abschnitt 5.1 ermittelten Werte zur Spannungsberechnung herangezogen werden müssen. Neben der Zugfestigkeit und der Dehngrenze werden auch die Steigung im elastischen Bereich und die Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit betrachtet.

Abbildung 5.34 zeigt die Dehngrenze sowie die Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Energieeintrags.

## Zugfestigkeit und Dehngrenze über Energieeintrag

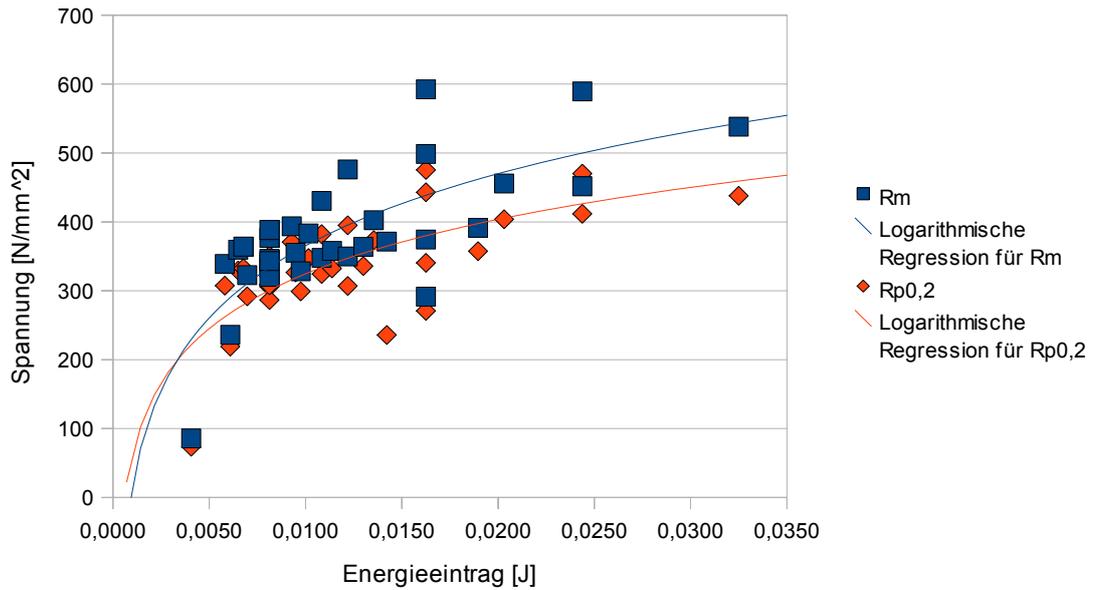


Abbildung 5.34: Abhängigkeit der Zugfestigkeit und Dehngrenze vom Energieeintrag

Die Verläufe der Zugfestigkeiten korrelieren gut mit den Verläufen der Dehngrenze. Wie zu erwarten, liegt die Dehngrenze unter der Zugfestigkeit, wobei sich auch das Verhältnis beider Kennwerte deckt. Somit ist auch validiert, dass die manuelle Auswertung der Diagramme ohne nennenswerte Fehler geschehen ist, da die Maximalspannung automatisch und die Dehngrenze manuell ermittelt wurde. Laut Werkstoffdatenblatt in Abschnitt 4.2 liegt das Verhältnis von Zugfestigkeit und Dehngrenze bei 1,19. Die aus den Zugversuchen ausgewerteten Kennwerte weisen im Mittel ein Verhältnis von 1,13 mit einer Standardabweichung von 0,09 auf. Das Verhältnis von Zugfestigkeit und Dehngrenze richtet sich nach den allgemeinen Werkstoffkennwerten und wird somit von den Belichtungsparametern nicht beeinflusst. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur einer von beiden Kennwerten betrachtet. Es wird die Zugfestigkeit gewählt, jedoch werden die Einflüssen von Belichtungsgeschwindigkeit und Laserleistung getrennt betrachtet.

Abbildung 5.35 zeigt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Belichtungsgeschwindigkeit.

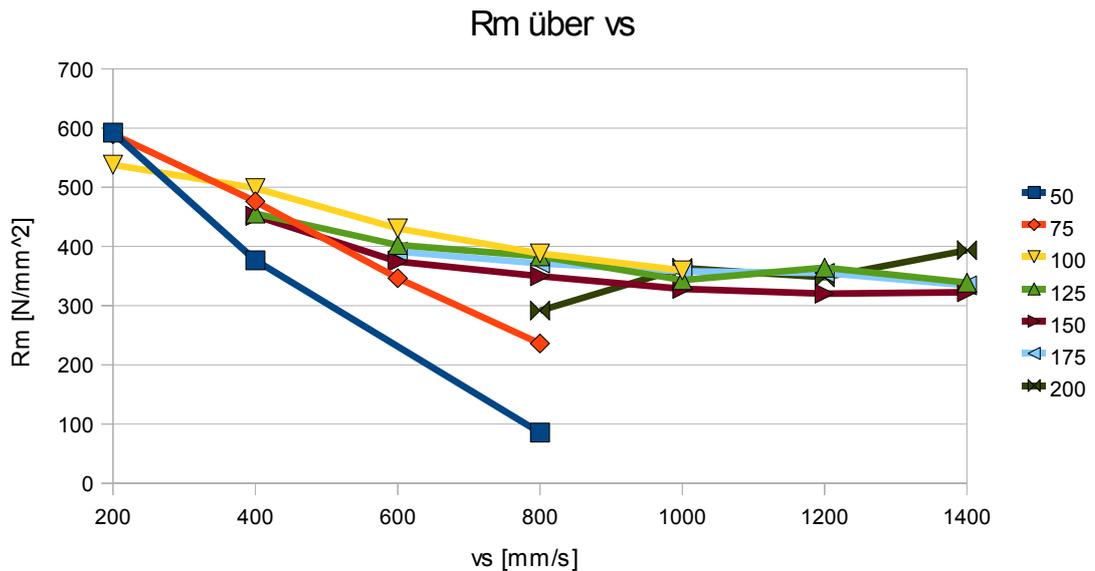


Abbildung 5.35: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen

Es zeigt sich, dass mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit ein Abfall der Zugfestigkeit zu verzeichnen ist, wobei sich das Gefälle, bis auf die geringsten Laserleistungen von 50 W und 75 W, als weitgehend konstant erweist. Die geringen Laserleistungen weisen ein deutlich steileres Gefälle auf als die Laserleistungen von 100 W bis 200 W, wobei sich für die geringste Leistung von 50 W ein deutlich steileres Gefälle als für die nächstgrößere Leistung ergibt. Ab einer Laserleistung von 100 W scheint sich die Laserleistung nur minimal auf die Zugfestigkeit auszuwirken. Den hauptsächlichen Einfluss hat hier die Belichtungsgeschwindigkeit. Lediglich sehr langsame Belichtungsgeschwindigkeiten erreichen annähernd die laut Werkstoffdatenblatt anzunehmende Zugfestigkeit. Dies sind laut Abschnitt 5.1 Parameter, welche keine Poren aufweisen. Somit kann die Abnahme der Zugfestigkeit weitgehend auf die Porosität, welche mit niedrigen Energieeinträgen und insbesondere schnellen Belichtungsgeschwindigkeiten entsteht, zurückgeführt werden. Eine signifikante Schwächung der Strukturen durch die Oberflächenbeschaffenheit kann zunächst nicht nachgewiesen werden, da von zwei Belichtungsparametern die ermittelte Zugfestigkeit sehr nahe der laut Datenblatt angegebenen Toleranz liegt.

Abbildung 5.36 zeigt die Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung.

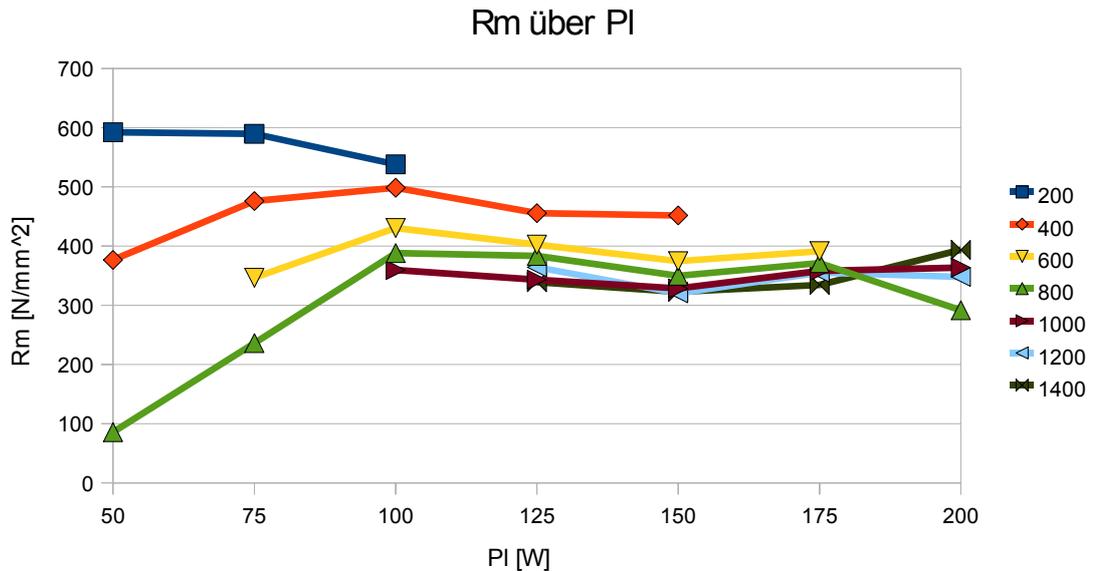


Abbildung 5.36: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung gestaffelt nach Belichtungsgeschwindigkeiten

In den niedrigen Bereichen der Laserleistung ergibt sich wieder ein abweichendes Bild, wie nach Abbildung 5.35 zu erwarten war. Abgesehen von diesen Bereichen ergeben sich nahezu konstante Kurvenverläufe, qualitativ und quantitativ und ohne Steigung. Im Bereich der Laserleistung von 100 W bis 200 W in Verbindung mit Belichtungsgeschwindigkeiten ab 800 mm/s scheint die Zugfestigkeit lediglich absolut von den theoretischen abzuweichen. Dieser Bereich entspricht einem Energieeintrag von 6 mJ bis 16 mJ und somit genau dem Bereich, welcher laut Abschnitt 5.1 mit einer mittleren bis großen Porenbildung behaftet ist. Hier scheint hauptsächlich die Belichtungsgeschwindigkeit die Porenbildung und somit die Zugfestigkeit zu beeinflussen.

Da nun der Einfluss der Parameter auf die Zugfestigkeit festgestellt ist, soll auch untersucht werden, wie sich die unterschiedlichen Belichtungsparameter auf die Steifigkeit der Geometrien im elastischen Bereich auswirken. Da die Probekörper nicht nach den allgemeinen Spezifikationen für normgerechte Zugversuche hergestellt wurden, ist nicht zu erwarten, dass das E-Modul quantitativ korrekt bestimmt werden konnte. Aus diesem Grund wird im Weiteren die Steigung im elastischen Bereich der Proben und nicht das E-Modul des Werkstoffes untersucht. Dieser Kennwert dient ausschließlich zum Vergleich der Proben untereinander. Ein elastischer Bereich ließ sich bei allen Zugproben identifizieren, somit auch die Steifigkeit der Strukturen.

Abbildung 5.37 zeigt die Steigung im elastischen Bereich des Zugversuchs in Abhängigkeit des Energieeintrags.

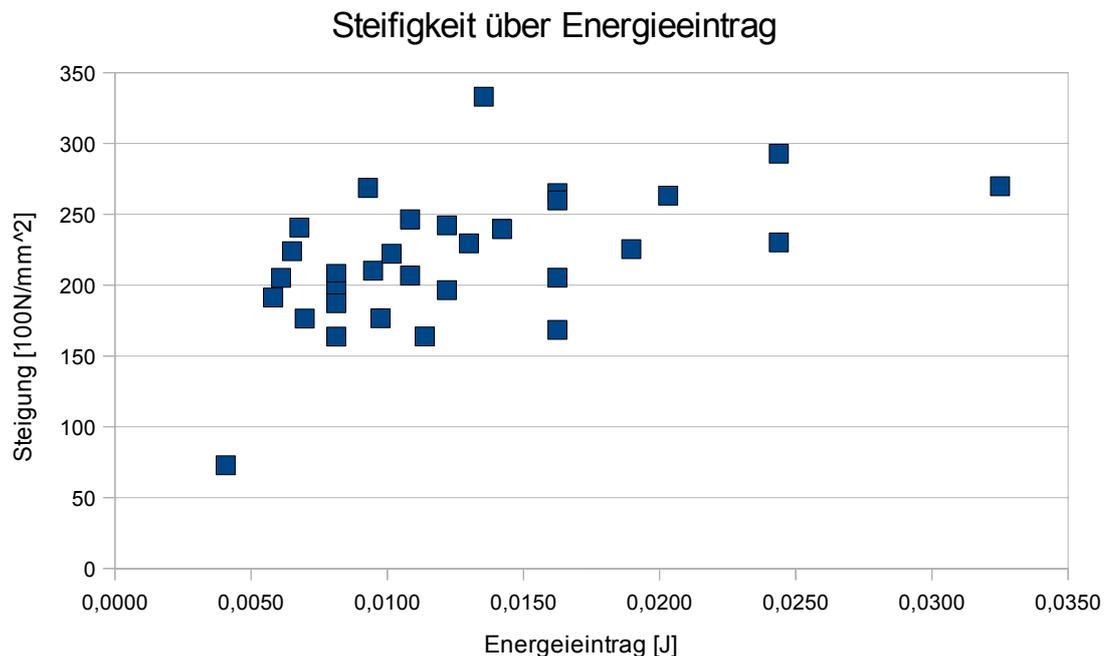


Abbildung 5.37: Steigung des elastischen Bereichs in Abhängigkeit des Energieeintrags

Es lässt sich mit steigendem Energieeintrag tendenziell ein Anstieg der Steifigkeit erkennen, das Verhalten lässt sich jedoch mathematisch kaum beschreiben. Somit kann keine Aussage getroffen werden, ob sich der Energieeintrag tatsächlich auf die Steifigkeit der Supportstrukturen auswirkt, oder hier die Messfehler laut Abschnitt 5.1 Abweichungen verursachen. Im Anhang ist die Steifigkeit getrennt über beide Belichtungsparameter dargestellt. Die Kurvenverläufe weisen Parallelen zu denen der Festigkeit in Abbildungen 5.35 und 5.36 auf. Somit ist anzunehmen, dass sich aufgrund der Porosität der Proben ein wirksamer Probenquerschnitt ergibt, welcher deutlich von dem durch die Schmelzspurbreite bestimmten Querschnitt abweicht.

Zuletzt wird hier die plastische Verformbarkeit der Strukturen in Abhängigkeit der Belichtungsparameter betrachtet. Wie bereits erläutert, wird hierfür die Dehnung beim Erreichen der Maximalkraft herangezogen, da diese in jedem Fall eindeutig und automatisiert auswertbar ist. Abbildung 5.38 zeigt die Dehnung beim Erreichen der Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags. Auch hier ist zu beachten, dass die absoluten Werte durch die nicht normgerechte Probengeometrie nicht zwingend aussagekräftig sind, die Werte relativ zueinander jedoch ausgewertet werden können.

Dehnung in Abhängigkeit des Energieeintrags

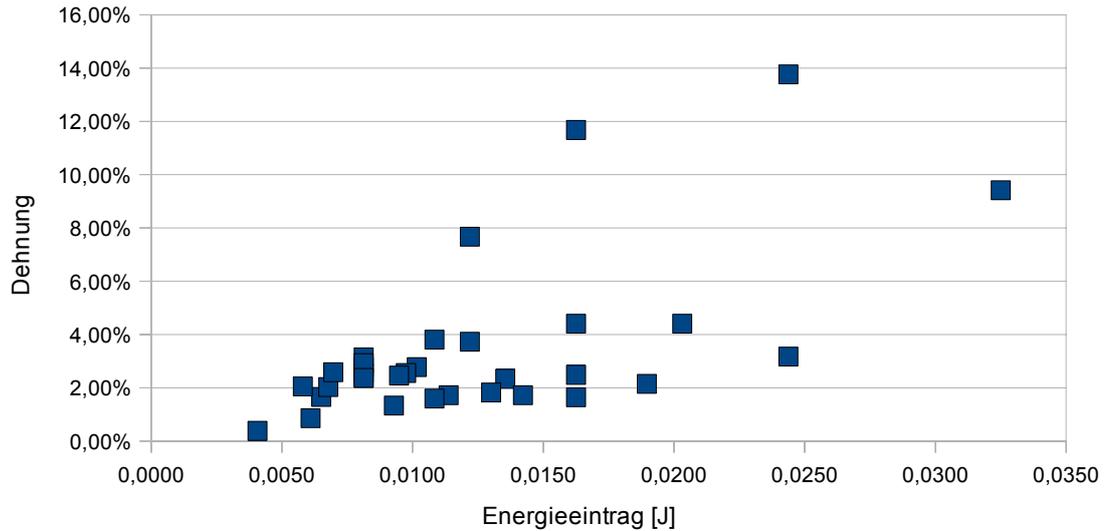


Abbildung 5.38: Dehnung bei Erreichen der Maximalkraft in Abhängigkeit des Energieeintrags

Es deutet sich großteils mit steigendem Energieeintrag ein geringer Anstieg der Dehnung beim Erreichen der Maximalkraft an, wobei die Werte stark streuen und somit keine mathematische Abhängigkeit abgeleitet werden kann. Auffällig sind die vier ausreißenden Werte. Da diese jeweils mittels zwölf Zugproben ermittelt wurden, sind sie jedoch nicht als Ausreißer einzustufen und sollten näher untersucht werden. Hierzu wird die Dehnung bei Maximalkraft in Abhängigkeit der Belichtungsparameter getrennt in Abbildung 5.39 dargestellt, um die abweichenden Parameter genau identifizieren zu können.

Dehnung über vs

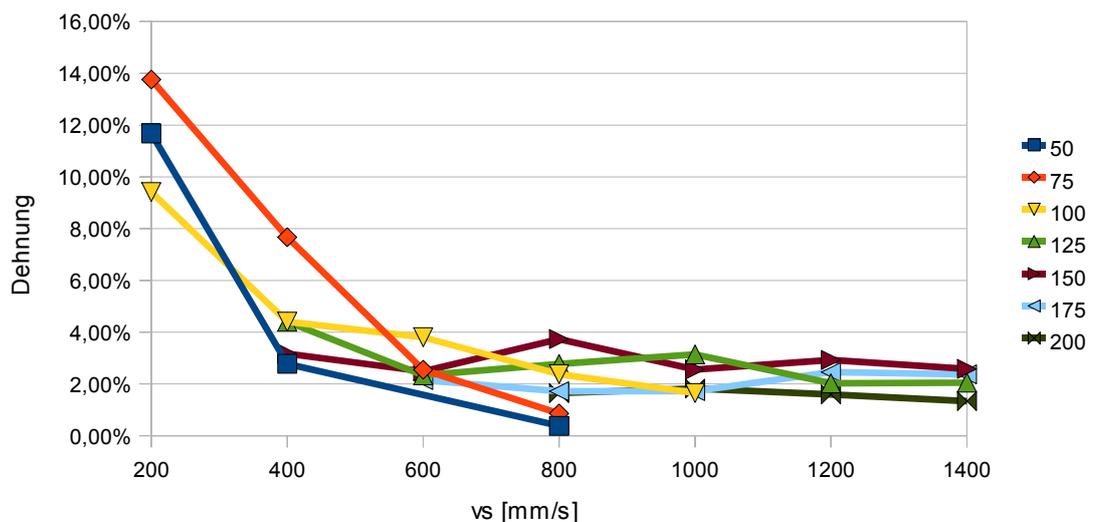


Abbildung 5.39: Dehnung bei Maximalkraft in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistungen

Die mit Abstand größten Dehnungen bei Maximalkraft können nun auf Ihre Belichtungsparameter zurückgeführt werden. Es handelt sich genau um die Parameter, welche auch die größte Spannung aufnehmen konnten und als porenfrei eingestuft wurden. Die Belichtungsgeschwindigkeit scheint hier entscheidend zu sein. Betrachtet man zum Beispiel die Belichtungsparameter 75 W mit 200 mm/s und 150 W mit 400 mm/s, ergibt sich bei einem identischen Energieeintrag und nahezu identischer Kraftaufnahme eine vierfach höhere Dehnung, wurden die Strukturen mit geringerer Laserleistung und geringerer Belichtungsgeschwindigkeit generiert. Bei den anderen Parameterpaarungen mit identischem Energieeintrag lassen sich ähnliche Verhältnisse nachweisen. Somit scheint mit sinkender Belichtungsgeschwindigkeit und gleichem Energieeintrag ein gutmütigeres Gefüge zu entstehen, als bei hohen Belichtungsgeschwindigkeiten, welche in Verbindung mit hoher Laserleistung identische Energieeinträge zur Folge haben. Hier könnte durch die verlängerte Einwirkzeit der Laserstrahlung im Bauteil bereits während des SLM-Prozesses eine Wärmebehandlung, zum tragen kommen, welche eine spannungsarmes und somit elastischeres Gefüge erzeugt. Ein Einfluss, ausgehend von der Porosität der Strukturen ist hier zunächst nicht auszuschließen. In Abschnitt 5.1 wurden jedoch beide soeben gegenübergestellten Parameter gleichermaßen als porenfrei eingestuft. Somit scheint ein Einfluss der Belichtungsgeschwindigkeit auf das Gefüge unabhängig vom resultierenden Energieeintrag und der Dichte plausibel.

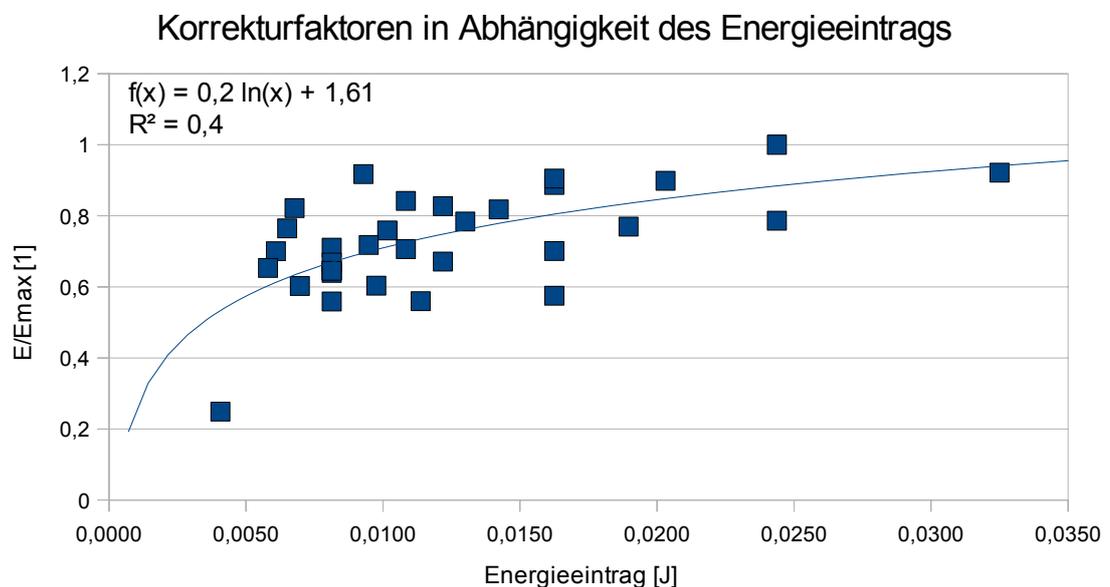
### **5.2.5 Korrektur der Festigkeitsberechnung**

Eine Abweichung der tatsächlichen von der erwarteten Festigkeit der Supportstrukturen ist, wie zuvor dargestellt, hauptsächlich auf die Porenbildung in Abhängigkeit der Belichtungsparameter zurückzuführen, da die identifizierten Einbrüche in der Festigkeit mit der vorherigen Untersuchung auf die Porosität korrelieren. Die Ausbildung der Poren ist jedoch nur qualitativ und nicht quantitativ ermittelt worden. Somit wird im Folgenden versucht, diesen Einfluss indirekt über die mit den Zugversuche ermittelten Daten abzubilden, und so eine genauere Kraftberechnung in Abhängigkeit der Belichtungsparameter erarbeitet werden.

Es wird folgender Ansatz verfolgt. Eine tatsächliche Abweichung der Werkstoffkennwerte im plastischen Bereich wird als plausibel angenommen, da dort

Verschiebungen im Gefüge des Werkstoffes auftreten. Der elastische Bereich im Werkstoff sollte jedoch nicht beeinflussbar sein und eine konstante Steigung aufweisen. Somit soll anhand der Abweichungen der Steigung im elastischen Bereich ein Indikator für die Verminderung der wirksamen Querschnittsfläche gefunden werden. Im Anhang ist hierzu die Herleitung einzusehen. Die im Zugversuch maximale ermittelte Steigung wird als tatsächlich anzunehmende Steifigkeit angenommen. Somit lassen sich anhand der Versuchsdaten Korrekturfaktoren für die wirksame Querschnittsfläche ermitteln.

Die Verhältnisse von ermittelter zu maximaler Steigung des elastischen Bereichs sind in Abbildung 5.40 in Abhängigkeit des Energieeintrags dargestellt.



*Abbildung 5.40: Korrekturfaktor über Energieeintrag*

Es ergibt sich oben gezeigter Verlauf, welcher sich asymptotisch an 1 annähert. Je höher der Energieeintrag ist, desto weniger Korrektur aufgrund von Porenbildung ist notwendig. Ein logarithmischer Kurvenverlauf kann jedoch nur schlecht nachgewiesen werden. In Anbetracht der Datenpunkte ist zu vermuten, dass in den Bereichen des niedrigen und des hohen Energieeintrags generell zu wenige Werte im Gegensatz zum mittleren Bereich vorhanden sind, um die Ausgleichskurve sicher zu beschreiben. Ein logarithmischer Kurvenverlauf erscheint jedoch plausibel, um die Porosität in Abhängigkeit des Energieeintrags zu beschreiben, da in [12] ähnliche Zusammenhänge bei der Untersuchung der Bauteildichte in Abhängigkeit der

Belichtungsgeschwindigkeit ermittelt wurden. Aus diesem Grund wird dieser Zusammenhang im folgendem zu Grunde gelegt.

Die Berechnung der spezifischen Kraftaufnahme von Supportstrukturen muss somit aufgrund der sinkenden Bauteildichte bei geringem Energieeintrag angepasst werden. Nach Abbildung 5.39 lässt sich die Abnahme der wirksamen Querschnittsfläche, welche letztendlich auf die Bauteildichte zurückzuführen ist, wie folgt mittels des Korrekturfaktors  $k_A$  beschreiben.

$$k_A(E_m) = 0,196 \cdot \ln(E_m) + 1,612 \quad (5.11)$$

Somit ist die spezifische Kraftaufnahme nicht durch Gleichung (5.10) exakt zu berechnen. Eine exaktere Berechnung liefert folgende Gleichung, welche die Porosität, beziehungsweise deren Kehrwert einbezieht.

$$F_{s(\text{spez})} = b_s \cdot R_m \cdot k_A \quad (5.12)$$

Berechnet man die theoretische Festigkeit mittels Gleichung (5.12), wird die, in Abbildung 5.41 abgebildete, Annäherung an die tatsächlich aufnehmbare Kraft erzielt.

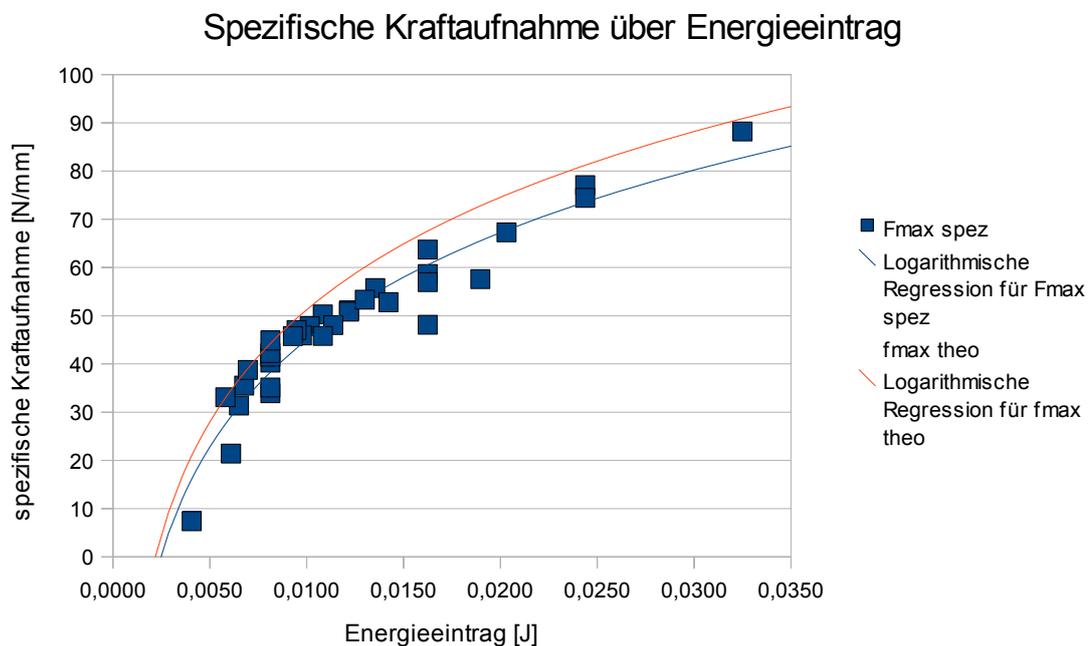


Abbildung 5.41: spezifische Kraftaufnahme mittels Korrektur berechnet im Vergleich zur tatsächlichen Kraftaufnahme

Es zeigt sich eine deutlich bessere Annäherung an die tatsächlich aufzunehmende Kraft als in Abbildung 5.33, setzt man im elastischen Bereich ein konstantes Verhalten

unabhängig von den Belichtungsparametern voraus. Bereinigt man die Querschnittsflächen um die Porosität der Strukturen, ergeben sich auch korrigierte Spannungen in den Strukturen. Diese werden in Abbildung 5.42 über dem Energieeintrag dargestellt.

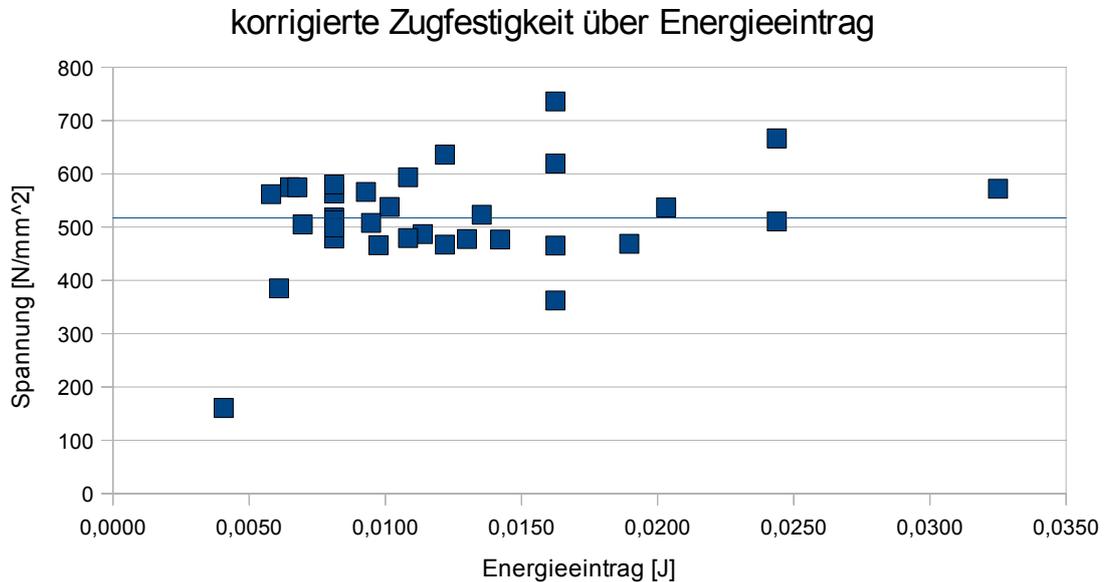


Abbildung 5.42: Mittels Gleichung (5.10) korrigierte Zugfestigkeit über Energieeintrag

Im Gegensatz zu Abbildung 5.33 lässt sich hier kaum ein logarithmischer Zusammenhang ableiten, vielmehr eine Streuung der Werte um einen Mittelwert, welcher ca. 10% niedriger liegt als die laut Datenblatt angegebene Zugfestigkeit. Zur Interpretation wird der Zusammenhang für Belichtungsgeschwindigkeit und Laserleistung getrennt betrachtet. Abbildung 5.43 zeigt die korrigierte Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit.

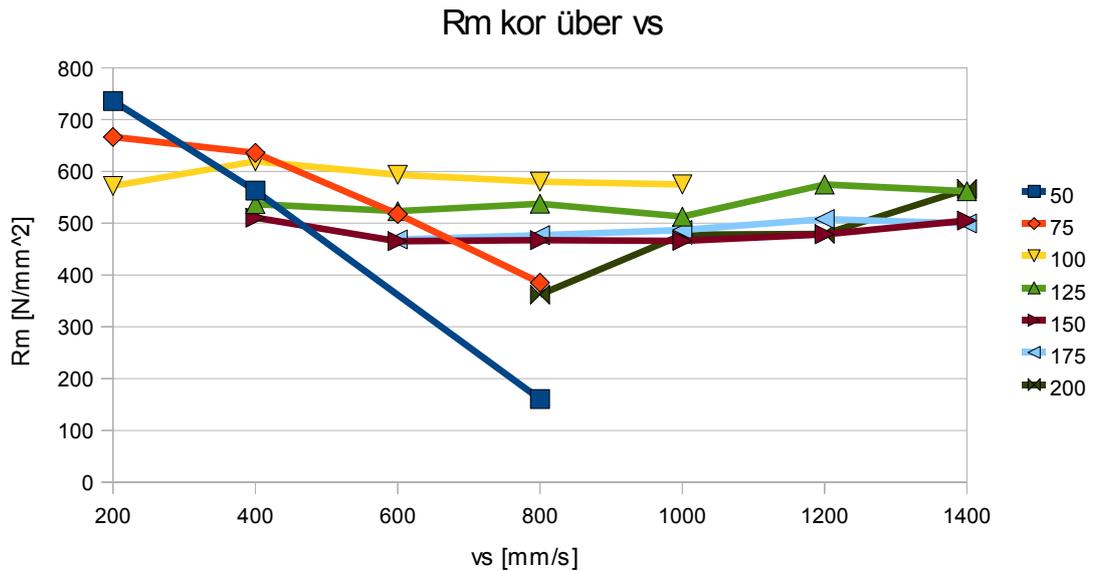


Abbildung 5.43: Korrigierte Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Belichtungsgeschwindigkeit gestaffelt nach Laserleistung

Unter 100 W Laserleistung sinkt die Zugfestigkeit mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit. Die Belichtungsgeschwindigkeit hat jedoch ab einer Laserleistung von 100 W keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit. Auffällig ist, dass überwiegend bei identischem Energieeintrag die Zugfestigkeit mit steigender Laserleistung sinkt. Dies korreliert mit den Erkenntnissen, welche aus Abbildung 5.38 hervorgehen. Es sind mit geringerer Belichtungsgeschwindigkeit und geringer Laserleistung nicht nur dehnbarere Strukturen, sondern auch allgemein festere Strukturen herzustellen. Da hier die Werte um die Porosität der Strukturen bereinigt wurden, erscheint es nun plausibel, dass das Verhältnis von Lasereinwirkzeit zu Energieeintrag einen signifikanten Einfluss auf das entstehende Gefüge hat.

Da sich nach Abbildungen 5.42 und 5.43 größtenteils eine konstante Verminderung der Zugfestigkeit um ca. 10% vom Werkstoffkennwert andeutet, wird nun versucht, dies in der Kraftberechnung zu korrigieren. Da nicht nur die Probengeometrie sondern auch die Oberflächengüte nicht normgerecht ausgeführt wurde, ist nach [15] eine Verminderung der Festigkeit ausgehend von der Oberflächenrauigkeit anzunehmen. Es wird ein Korrekturfaktor von  $k_O=0,9$  für die erhöhte Oberflächenrauigkeit angesetzt. Somit ergibt sich die theoretische Kraftaufnahme zu

$$F_{s(spez)} = b_s \cdot R_m \cdot k_A \cdot k_O \quad (5.13)$$

was die in Abbildung 5.44 gezeigte Näherung zur tatsächlichen Kraftaufnahme ergibt.

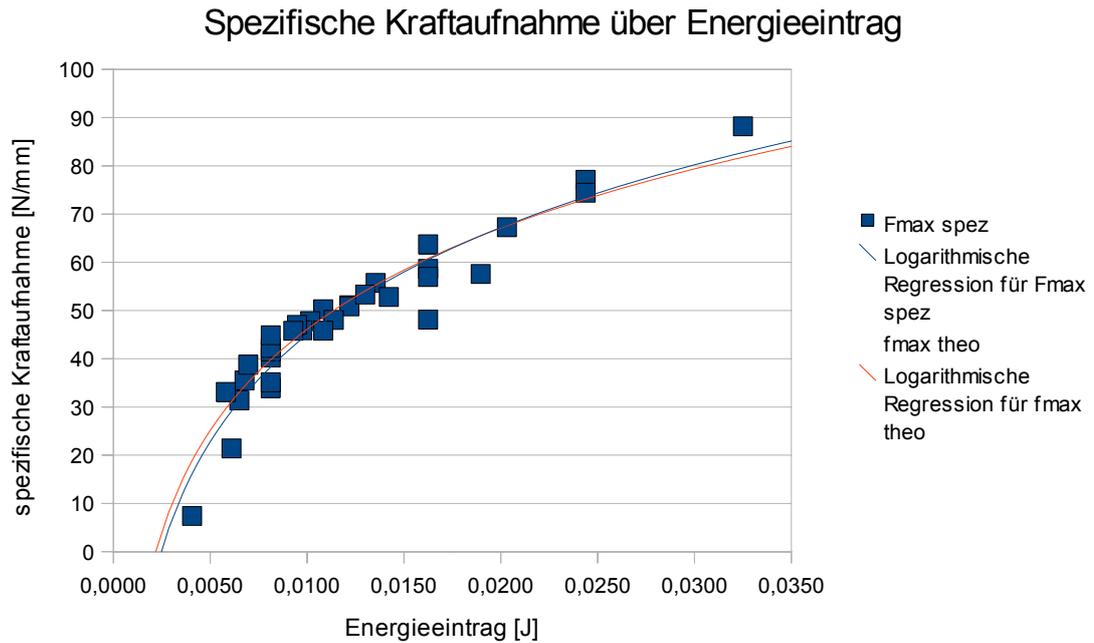


Abbildung 5.44: Spezifische Kraftaufnahme nach Gleichung (5.13) korrigiert

Mit Hilfe dieser Korrekturen lässt sich die Kraftaufnahme in Abhängigkeit vom Energieeintrag ohne deutlichen Unterschied zur Realität in Abhängigkeit der Belichtungsparameter berechnen. Alle anderen Einflussfaktoren wurden jedoch empirisch anhand der Versuchsdaten ermittelt. Somit ist eine quantitative Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nur unter Einhaltung von möglichst ähnlichen Randbedingungen zu erwarten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabenstellung dieser Arbeit ist es, die Festigkeit von Supportstrukturen, welche beim SLM zur Aufnahme der verfahrensbedingten Kräfte notwendig sind, experimentell zu ermitteln. Hierzu wurden Proben in zwei Versuchsreihen hergestellt und ausgewertet. Die Versuche wurden auf einer industriell verwendeten SLM-Anlage mit gängigen Randbedingungen durchgeführt, sodass ein möglichst großes Anwendungsspektrum zur Generierung von Funktionsbauteilen repräsentiert werden kann.

Die erste Versuchsreihe beschäftigt sich mit der Geometrie von Supportstrukturen. Diese grenzt den Bereich ein, welcher zur Generierung von Supportstrukturen geeignet ist und zeigt auf, wie sich die Charakteristik der Strukturen in Abhängigkeit der Belichtungsparameter qualitativ und quantitativ verhält. Es lassen sich Schmelzspurbreiten von 75  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  herstellen. Der zur Anwendung geeignete Bereich grenzt sich auf Schmelzspurbreiten von 76  $\mu\text{m}$  bis 155  $\mu\text{m}$  ein, welche mit einem Energieeintrag von 10 mJ bis 30 mJ Strukturen prozessstabil umzusetzen sind. Das ermittelte Verhältnis vom Energieeintrag zur Schmelzspurbreite kann durch eine logarithmische Funktion abgebildet werden, was durch andere Untersuchungen verifiziert werden kann. Für die untersuchten Randbedingungen kann somit eine Funktion zur Berechnung der Schmelzspurbreite in Abhängigkeit der Belichtungsparameter ermittelt werden. Dadurch wird gleichzeitig auch eine Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Belichtungsparameter und Werkstoffkennwerten geschaffen.

Die zweite Versuchsreihe ermittelt die tatsächliche Kraftaufnahme der prozessstabil herstellbaren Supportstrukturen mittels Zugversuchen und identifiziert die für die Kraftaufnahme relevanten Einflussfaktoren. Der größte Einfluss auf die Kraftaufnahme geht, wie im ersten Versuch auch, vom Energieeintrag aus. Es ergeben sich spezifische Kraftaufnahmen von 10 N/mm bis 90 N/mm. Es wird ebenfalls ein logarithmischer Zusammenhang von Energieeintrag und Kraftaufnahme festgestellt. Mit der Vorausberechnung auf Basis der ersten Versuchsreihe zeigt sich jedoch keine zufriedenstellende Übereinstimmung. Um die Ursache der Abweichung von der theoretischen zur tatsächlichen Kraftaufnahme identifizieren zu können, werden die Daten aus den Zugversuchen hinsichtlich der Werkstoffkennwerte untersucht. Es

zeigen sich Abweichungen in konstanten Werkstoffkennwerten. Unter der Annahme, dass sich das E-Modul nicht von den Belichtungsparametern beeinflussen lässt, kann eine wirksamen Querschnittsfläche ermittelt, welche aufgrund der Porosität der Strukturen geringer als die zuvor angenommene ist. Eine Korrektur der Festigkeitsberechnung auf dieser Basis ergibt eine deutlich bessere Annäherung an die im Zugversuch ermittelten, aufnehmbaren Kräfte. Die Berücksichtigung der hohen Oberflächenrauigkeit lässt die Kraft nahezu ohne Abweichung vorausberechnen. Somit kann eine Funktion abgeleitet werden, welche, unter Berücksichtigung der untersuchten Randbedingungen, die Kraftaufnahme eines Supports in Abhängigkeit der Belichtungsparameter abbildet.

Es sind die sich ergebenden Geometrien und Festigkeiten von Supportstrukturen sowie deren hauptsächliche Einflussgrößen erarbeitet worden. Um diese Erkenntnisse auf die Abstützung eines Bauteils anzuwenden, sind verschiedene Aspekte zu beachten. Die quantitativen Berechnungen können nur übernommen werden, wenn möglichst identische Randbedingungen vorliegen. Bei einer Abweichung von den hier vorliegenden Randbedingungen können lediglich die qualitativen Erkenntnisse, sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung der quantitativen Aussagen übernommen werden. Es wurde ein breites Spektrum der Belichtungsparameter untersucht, um getrennt nach Belichtungsgeschwindigkeit und Laserleistung auswerten zu können. Da Supportstrukturen in der praktischen Anwendung so wenig Ressourcen wie möglich in Anspruch nehmen sollen, sollten nach Möglichkeit Belichtungsparameter mit einer schnellen Belichtungsgeschwindigkeit vorgezogen werden. Ob die qualitativen Vorteile einer langsamen Belichtung den wirtschaftlichen Nachteilen überwiegen, muss im Einzelfall abgewägt werden. Es wurden hier lediglich die Zugfestigkeiten der Strukturen in Abhängigkeit der Belichtungsparameter ermittelt. Die Anforderungen an eine optimale Bauteilabstützung beinhalten jedoch nicht nur die Aufnahme der Zugkräfte, obwohl dies maßgebend für den erfolgreichen Abschluss des Bauprozesses ist. Weitere Anforderungen sollten somit definiert und untersucht werden, um den Bereich der geeigneten Belichtungsparameter oder die geometrische Anordnung der Strukturen am Bauteil einzugrenzen.

Angenommen, die entstehenden Zugkräfte, welche ein mittels SLM herzustellendes Bauteil entwickelt, sind entweder experimentell oder analytisch ermittelt, kann die Auslegung einer optimalen Unterstützung auf zwei Weisen umgesetzt werden. Werden die Abstände zwischen den Supportstrukturen aufgrund der entstehenden Oberfläche

vorgegeben, muss die benötigte Kraftaufnahme an den definierten Anbindungsstellen ermittelt werden. Anhand der experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit können nun geeignete Belichtungsparameter zur gezielten Kraftaufnahme ausgewählt werden. Wird die Anbindungsgeometrie nicht vorgegeben, kann im Vorfeld ein Belichtungsparameter ausgewählt werden und dann anhand der berechenbaren Kraftaufnahme die Anbindungsgeometrie zum Bauteil ausgelegt werden.

Des Weiteren ist es denkbar, die gewonnen Erkenntnisse über diese durch einen Vektor erzeugten Strukturen auch auf andere Anwendungsgebiete auszubreiten. Zum Beispiel könnten die Ergebnisse ebenfalls eine Auslegungsgrundlage für Leichtbaustrukturen sein, da aufgrund der geometrischen Untersuchungen das Gewicht solcher Strukturen berechnet werden könnte. Die Festigkeiten solcher Strukturen sind jedoch nur in Zugrichtung bekannt, was nur bedingt eine Berechnung für komplexe Strukturen zulässt. Andere Anwendungen könnten in Bereichen gefunden werden, in denen dünne beziehungsweise poröse Strukturen prozessstabil und flexibel hergestellt werden müssen. Über ein poröses Gefüge oder die gezielte Anordnung von Belichtungsvektoren zueinander mit dem Wissen über die Breite der Schmelzspuren könnten Filter oder Elemente zur Wärmeübertragung ausgelegt werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen liefern sowohl qualitative als auch quantitative Erkenntnisse über Supportstrukturen beim SLM-Verfahren, welche zur Auslegung dieser zur optimalen Bauteilabstützung beitragen können. Es wurde eine Berechnungsgrundlage geschaffen, welche die aufzunehmenden Kräfte eines Supports in Abhängigkeit der Belichtungsparameter ermittelt. Außerdem wurden qualitative Aspekte aufgezeigt, welche einen Beitrag leisten, die Eignung zur Abstützung und späteren Entfernung einzustufen zu können. Da die quantitativen Ergebnisse für die hier verwendete Konfiguration ermittelt wurden, sind diese im Gegensatz zu den qualitativen nur auf ähnliche Randbedingungen übertragbar.

## Quellenverzeichnis

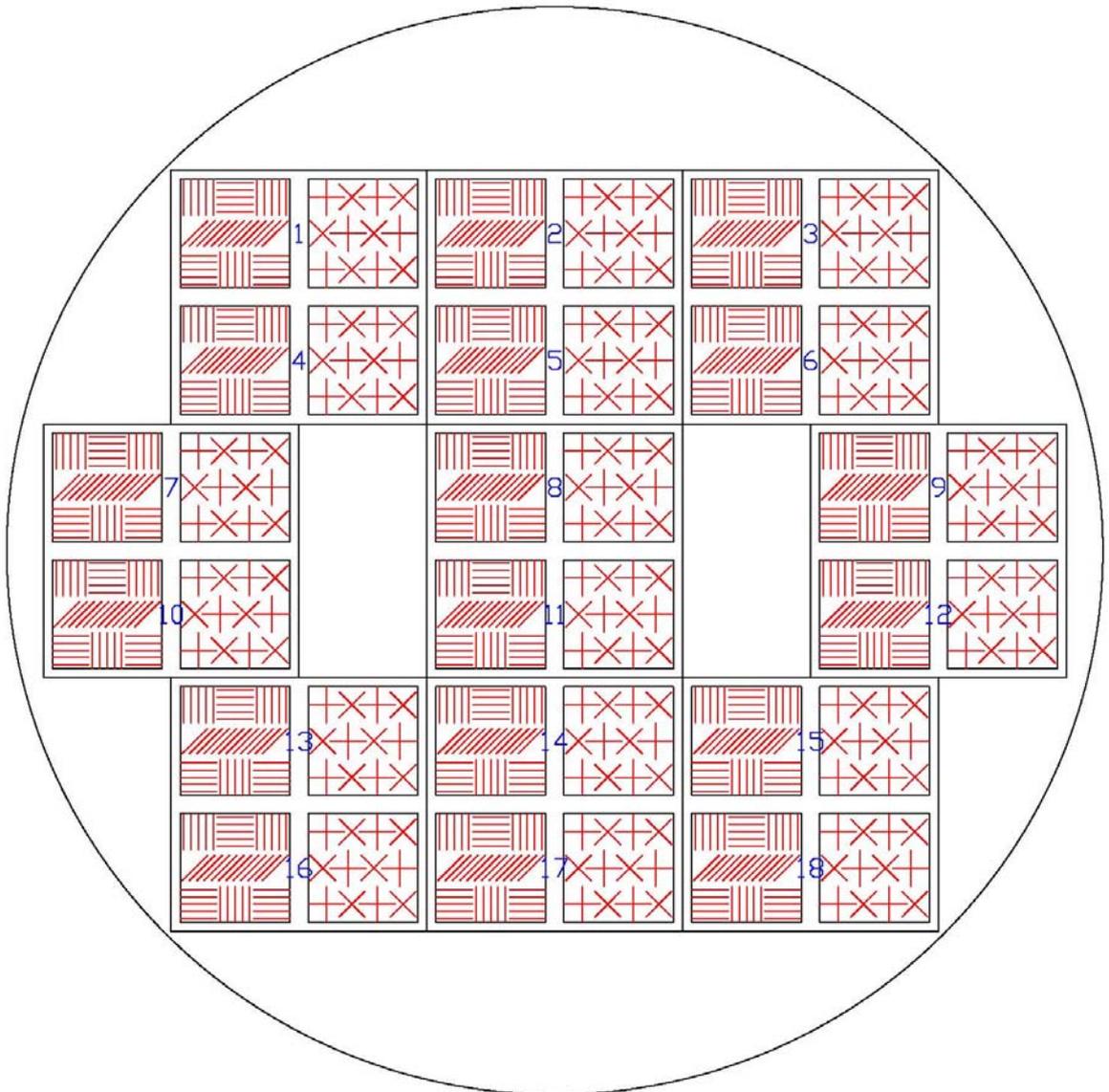
- [1] Bibb, R./Eggbeer, D./Williams, R.: Rapid manufacture of removable partial denture frameworks, Cardiff, 2006
- [2] Branner, G. : Coupled-Field Simulation in Additive Layer Manufacturing, München, 2008
- [3] Branner, G.: Investigations on residual stresses and deformations in Selective Laser Melting (SLM), Augsburg, 2009
- [4] Branner, G.: Prozess-Struktur-Simulation im Bereich metallischer Schichtbauverfahren, Augsburg, 2008
- [5] Branner, G.: Simulationenmethoden für die Auslegung thermischer Fertigungsprozesse, Augsburg, 2008
- [6] Canisius, Marten: Konzepterstellung zur Modellierung der thermisch-induzierten Eigenspannungen beim SLM mit Hilfe der FE-Methode, TU Hamburg-Harburg, Studienarbeit, 2010
- [7] Dressler, M: Temperature distribution in powder beds during 3D printing, Berlin, 2010
- [8] Fritz, A.H.: Fertigungstechnik, 8. Auflage, Berlin, 2007
- [9] Grote, K.-H., Feldhusen J. : Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage, Berlin Heidelberg , Springer Verlag, 2007
- [10] Gusarov, A.V., Laoui, T., Froyen, L, Titov, I.V.: Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering, Leuven, 2002
- [11] iLAS, Vorlesungsunterlagen Lasertechnik
- [12] Meiners, W.: Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe, Aachen, Shaker Verlag, 1999
- [13] Mercelis, P.: Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Leuven, 2006
- [14] Mumtaz, K., Hopkins, N.: Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting, Loughborough, 2009
- [15] Muhs, D., Wittel, H. : Roloff/Matek Maschinenelemente, 18. Auflage, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2007
- [16] Munsch, M.: Entwicklung einer Prozesskette zur lasergenerativen Herstellung von Dentalprodukten, Hamburg-Harburg, 2008
- [17] N.N: Concept Laser GmbH, <http://concept-laser.de>, Abruf 23.06.2010, Schulung und telefonisch

- [18] N.N.: DIN 32532 - Laserstrahlverfahren zur Materialverarbeitung, 2009
- [19] N.N. : DIN 8580
- [20] N.N.: EOS GmbH, <http://www.eos.info/>
- [21] N.N: IES GmbH
- [22] N.N: Marcam Engineering, <http://www.marcam.de/> Abruf 23.06.2010
- [23] N.N: Materialise , <http://www.materialise.com/>, Abruf 23.06.2010
- [24] N.N.: MTT Technologies, <http://www.mtt-group.de/>
- [25] N.N: Netfab, <http://www.netfabb.com>, Abruf 23.06.2010
- [26] N.N.: Prüfmaschinen und Prüfsysteme für Baustoffe, Zwick Roell AG, 2006
- [27] N.N: SLM Materialbroschüre, MTT Technologies GmbH, 26.05.2010
- [28] N.N. : VDI 3404, 2009
- [29] Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAlV4 mit „Selective Laser Melting“, Aachen, Shaker Verlag, 2003
- [30] Petersen, M. : Lasergenerieren von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen, Hamburg, 2006
- [31] Rehme, O. : Cellular Design for Laser Freeform Fabrication, Hamburg, 2009
- [32] Rehme, O., Emmelmann, C. : Rapid manufacturing of lattice structures with Selective Laser Melting, Hamburg, 2006
- [33] Rehme, O., Emmelmann, C. : Reproducibility for properties of Selective Laser Melting products
- [34] Shen, H., Vollertsen, F. : Modelling of laser forming – An review, Bremen/Shanghai, 2009
- [35] Wagner, C. : Untersuchungen zum Selektiven Lasersintern von Metallen, Aachen, Shaker Verlag, 2003
- [36] Wirtz, T. P. : Herstellung von Knochenimplantaten aus Titanwerkstoffen durch Laserformen, Aachen, 2005

# Anhang

Zu 5.1.2

Anordnung der Probensets auf der Bauplattform



### Positionierung der Belichtungsparameter innerhalb der Sets

PI [W]	vs [mm/s]	LID	Set	Part	Pos
50	200	158	2	4	18
50	400	159	1	1	10
50	600	160	3	4	14
50	800	161	3	3	16
50	1000	162	3	1	7
50	1200	163	3	3	4
50	1400	164	3	3	1
75	200	171	2	4	14
75	400	170	1	1	7
75	600	169	1	1	9
75	800	168	3	2	2
75	1000	167	3	2	5
75	1200	166	3	3	13
75	1400	165	3	1	10
100	200	172	2	3	13
100	400	173	2	4	15
100	600	174	1	1	12
100	800	175	1	2	3
100	1000	176	3	1	9
100	1200	177	3	4	17
100	1400	178	3	2	6
125	200	179	2	3	4
125	400	180	2	2	3
125	600	182	1	2	2
125	800	181	1	2	6
125	1000	183	1	2	5
125	1200	184	3	1	12
125	1400	185	3	2	3
150	200	192	2	3	1
150	400	191	2	2	5
150	600	190	2	1	12
150	800	189	1	3	1
150	1000	188	1	3	4
150	1200	187	1	3	13
150	1400	186	3	4	15
175	200	200	2	1	10
175	400	202	2	2	2
175	600	201	2	2	6
175	800	193	1	3	16
175	1000	194	1	4	14
175	1200	195	1	4	17
175	1400	196	1	4	15
200	200	203	2	1	7
200	400	204	2	3	16
200	600	205	2	4	17
200	800	206	2	1	9
200	1000	197	1	4	18
200	1200	198	1	5	8
200	1400	199	1	5	11

Zu 5.1.4.1

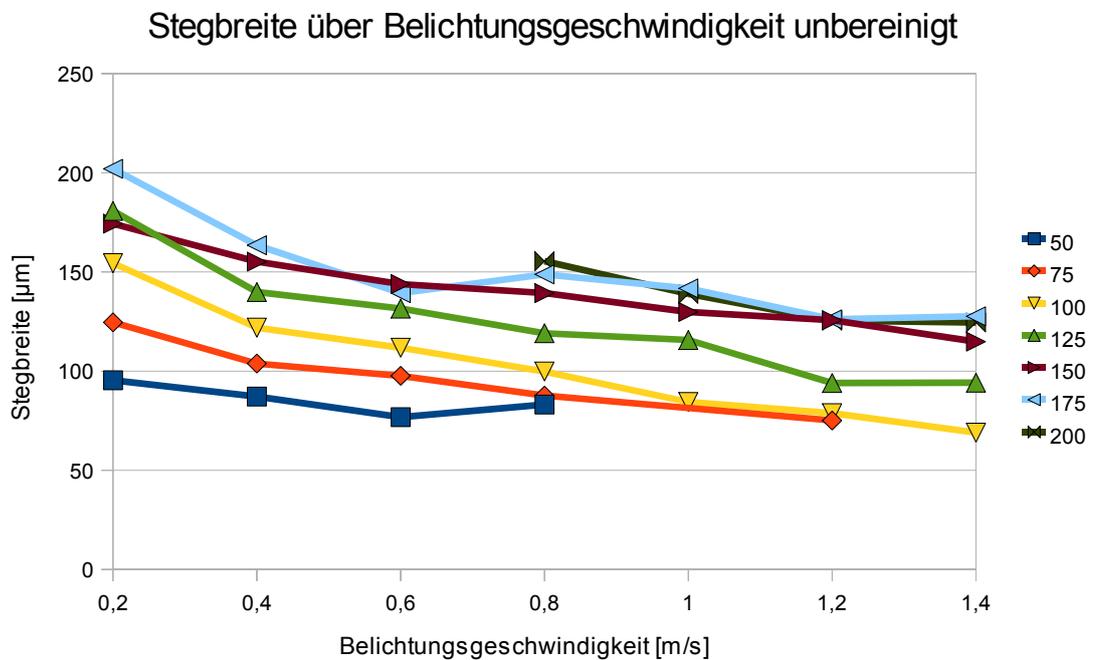
### Aufbaustabilitäten Absolut

Anzahl der aufgebauten Supports Stege							
vs/PL	50	75	100	125	150	175	200
0,2	38	40	42	42	42	42	42
0,4	38	40	42	42	40	42	42
0,6	30	36	39	40	42	42	42
0,8	23	34	40	40	40	40	42
1	0	1	38	41	39	39	39
1,2	0	20	11	40	32	40	41
1,4	0	8	3	35	28	30	34

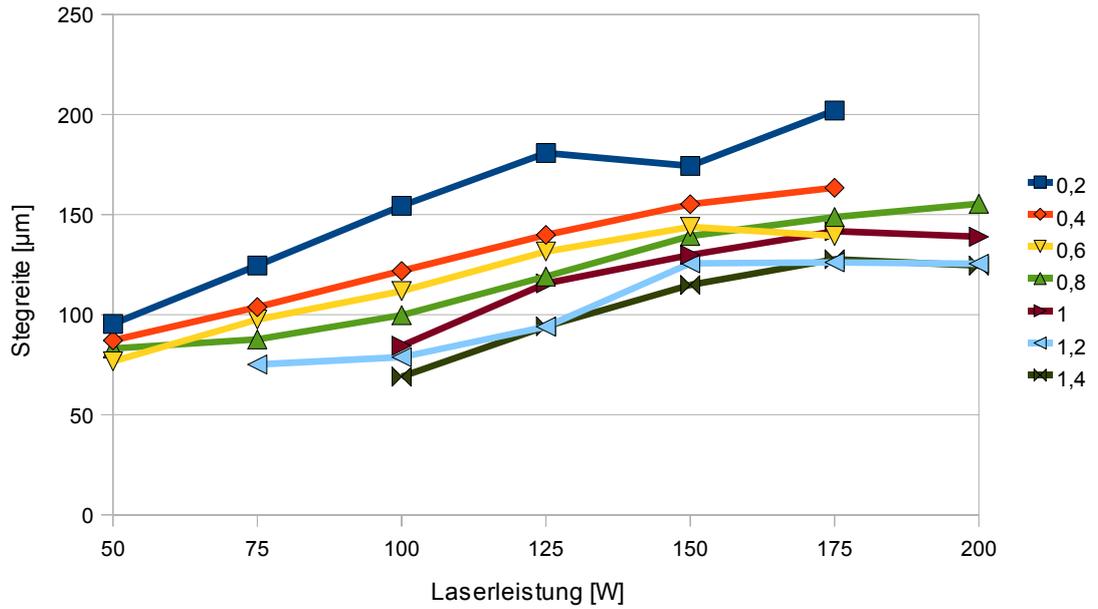
Anzahl der aufgebauten Supports Kreuze							
vs/PL	50	75	100	125	150	175	200
0,2	12	12	12	12	12	12	12
0,4	12	12	12	12	12	12	12
0,6	12	12	12	12	12	12	12
0,8	8	12	12	12	12	12	12
1	0	1	12	12	12	12	12
1,2	0	3	7	11	12	12	12
1,4	0	0	1	12	12	11	11

zu 5.1.4.4

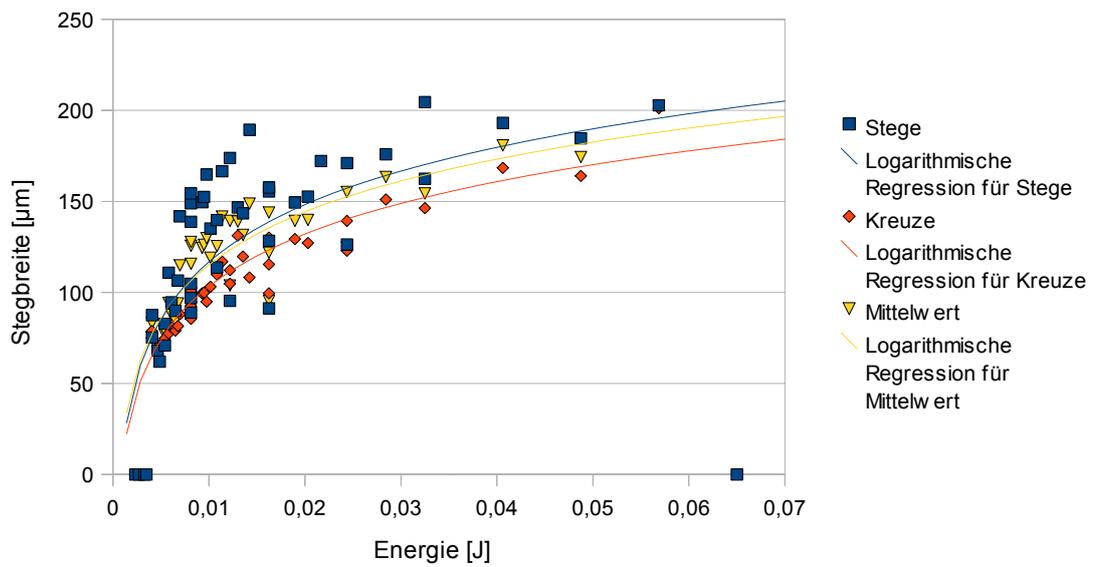
### Unbereinigte Messreihen



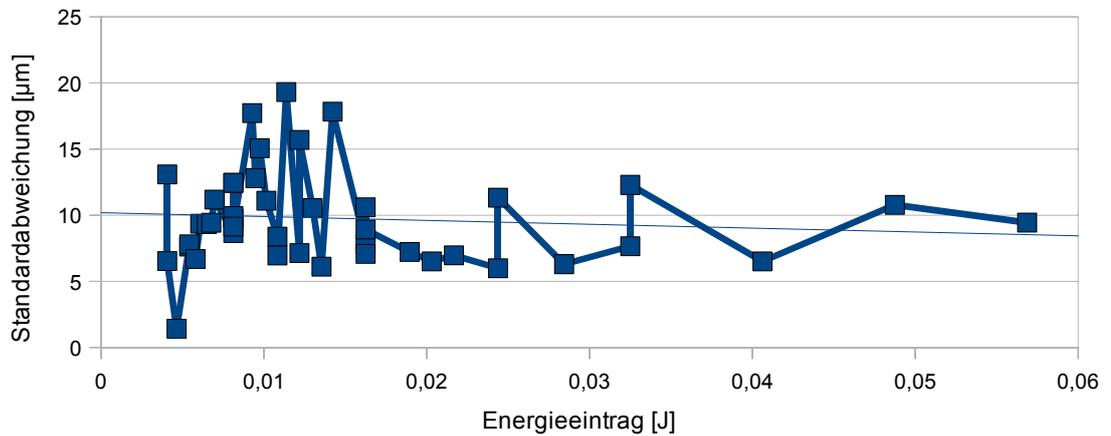
### Stegbreite über Laserleistung unbereinigt



### Schmelzspurbreiten über Energieeintrag unbereinigt

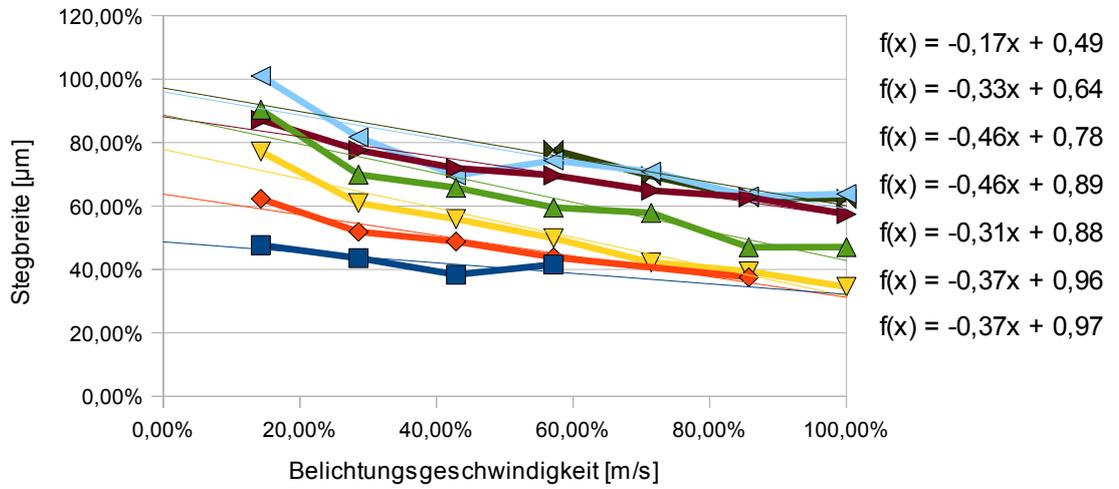


### Standardabweichung über Energieeintrag

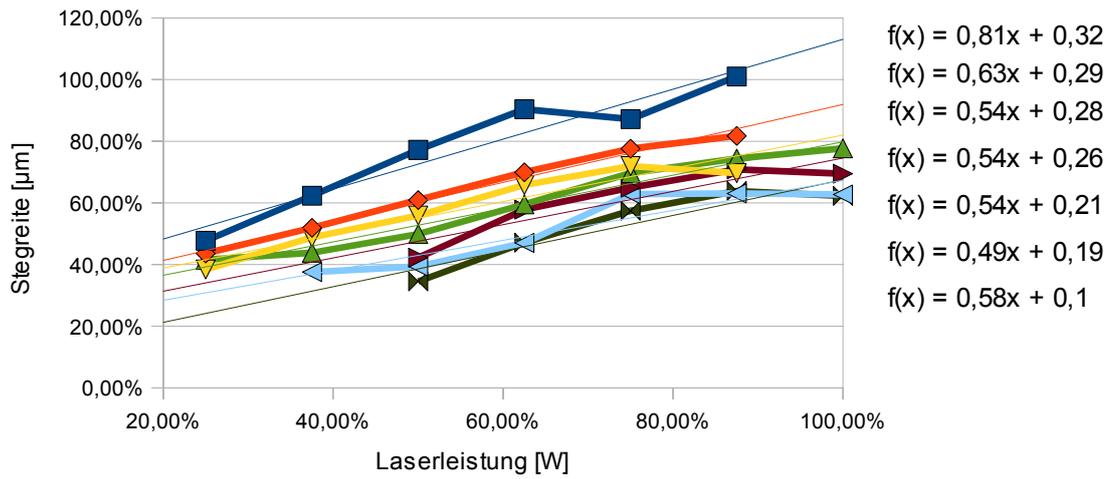


Relative Darstellungen zur Ermittlung des dominanten Einflussfaktors

Stegbreite über Belichtungsgeschwindigkeit relativ

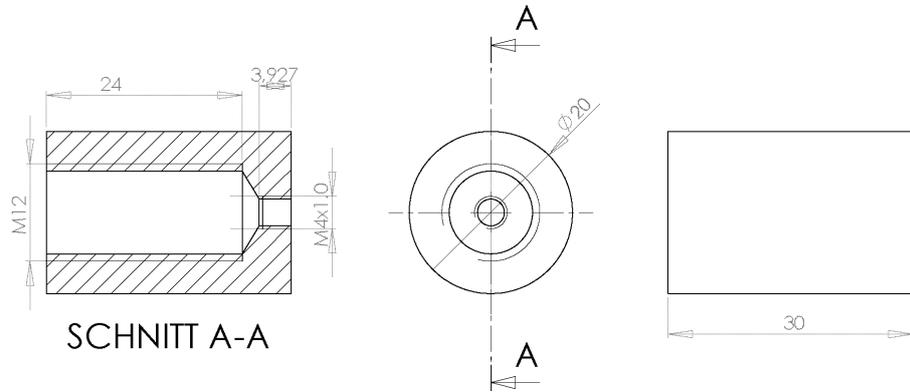


Stegbreite über Laserleistung relativ



zu 5.2.2.1

Fertigungszeichnungen der Adapter zur Zugprüfung



**PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL**  
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF INSERT COMPANY NAME HERE-. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF INSERT COMPANY NAME HERE- IS PROHIBITED.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE
DIMENSIONS ARE IN mm		DRAWN	Wiegandt
TOLERANCES:		CHECKED	Munsch
FRACTIONAL ±		ENG APPR.	
ANGULAR: MACH ± BEND ±		MFG APPR.	
TWO PLACE DECIMAL ±		Q.A.	
THREE PLACE DECIMAL ±		COMMENTS:	
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER MATERIAL			
NEXT ASSY	USED ON	FINISH	
APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING		

ILAS TU-HH  
**TITLE:** Aufnahme Gewinde  
**SIZE** DWG. NO. REV  
**A** SCALE: 2:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1

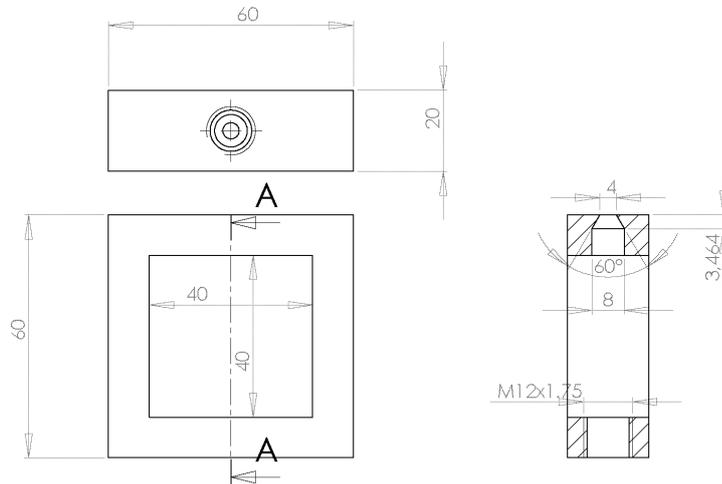
5

4

3

2

1



**SCHNITT A-A**  
**MABSTAB 1 : 1**

**PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL**  
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF INSERT COMPANY NAME HERE-. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF INSERT COMPANY NAME HERE- IS PROHIBITED.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE
DIMENSIONS ARE IN mm		DRAWN	Wiegandt
TOLERANCES:		CHECKED	Munsch
FRACTIONAL ±		ENG APPR.	
ANGULAR: MACH ± BEND ±		MFG APPR.	
TWO PLACE DECIMAL ±		Q.A.	
THREE PLACE DECIMAL ±		COMMENTS:	
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER MATERIAL			
NEXT ASSY	USED ON	FINISH	
APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING		

ILAS TU-HH  
**TITLE:** Aufnahme Konus  
**SIZE** DWG. NO. REV  
**A** SCALE: 2:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1

5

4

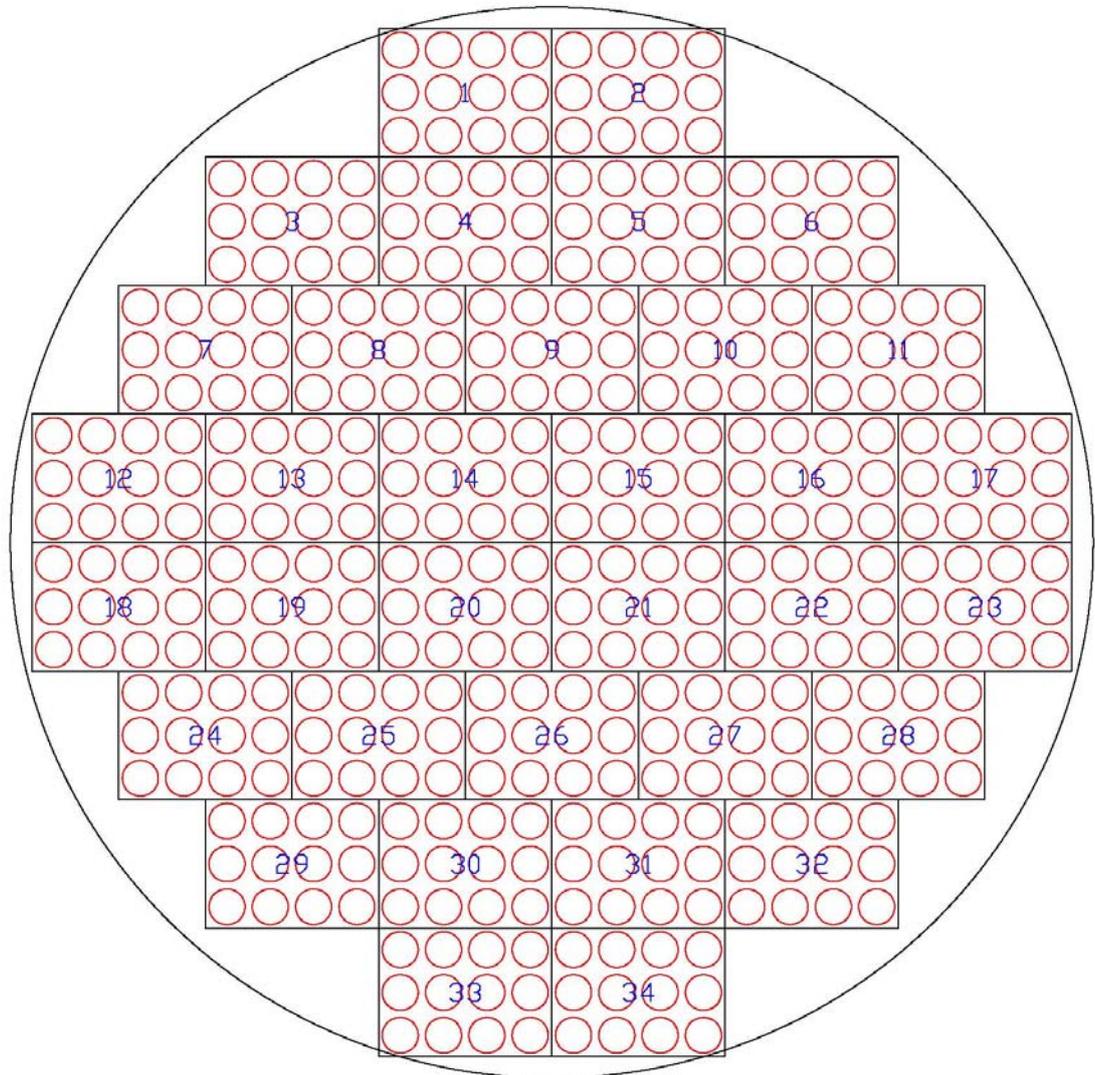
3

2

1

zu 5.2.2.2

### Anordnung der Zugproben auf der Bauplattform

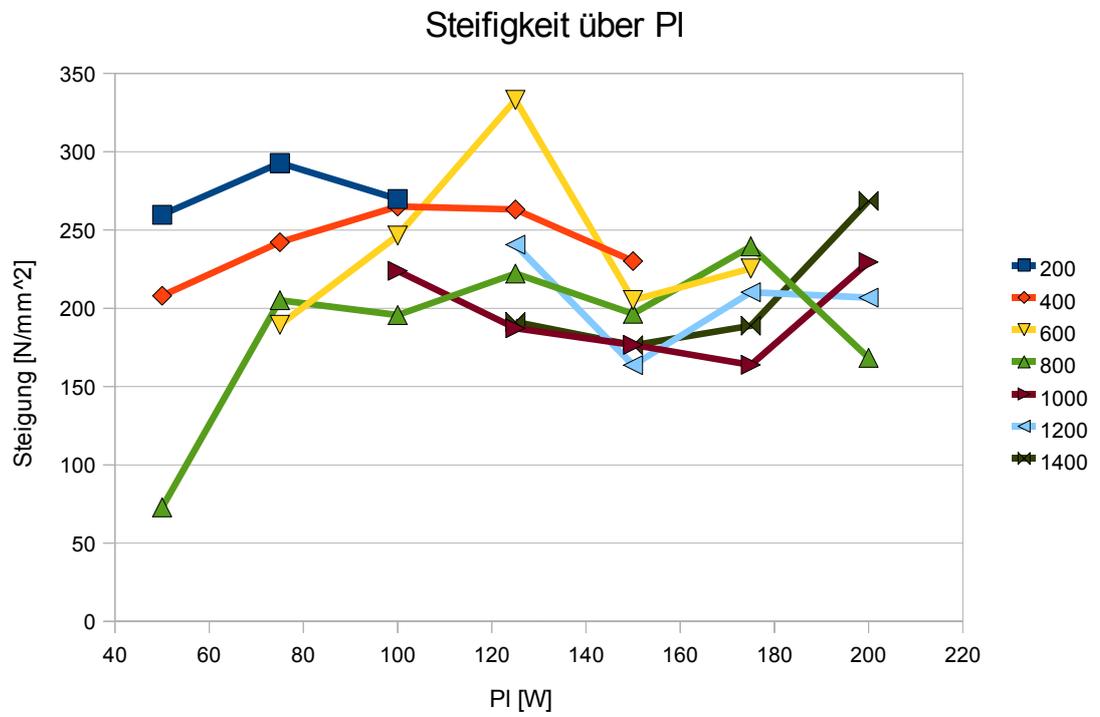
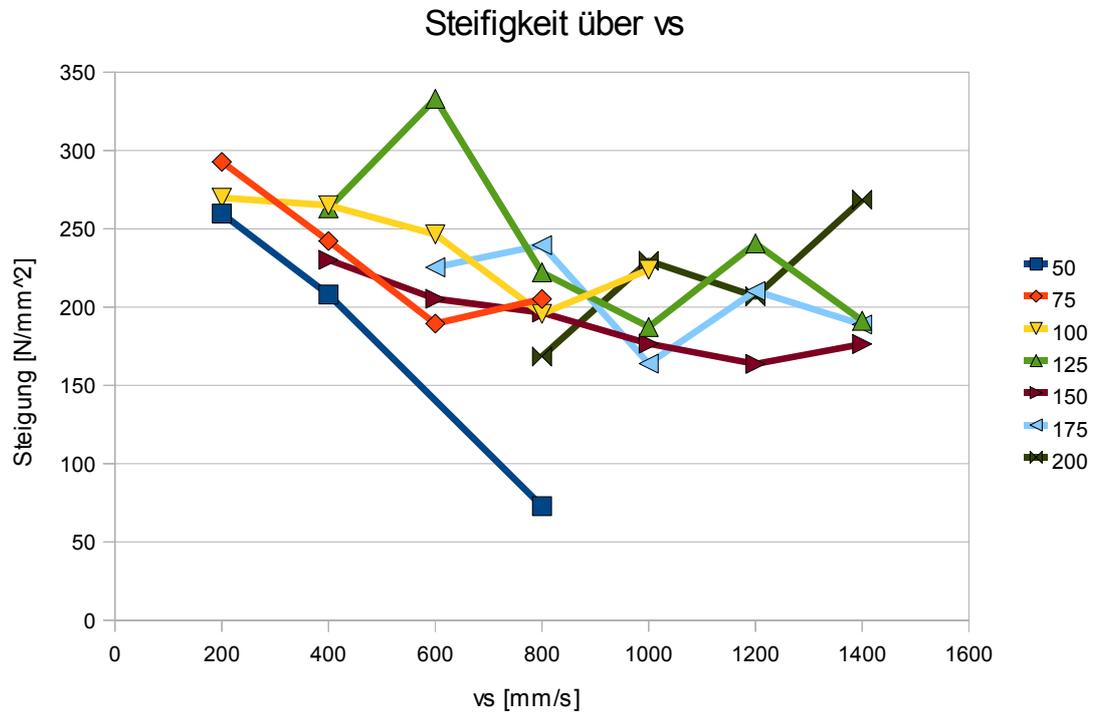


## Positionierung der Belichtungsparameter auf der Bauplattform

PI [W]	vs [mm/s]	Em [mJ]	LID	Pos
50	200	16,25	158	6
50	400	8,13	159	2
50	600	5,42	160	1
50	800	4,06	161	3
75	200	24,38	171	33
75	400	12,19	170	15
75	600	8,13	169	4
75	800	6,09	168	7
100	200	32,5	172	34
100	400	16,25	173	11
100	600	10,83	174	9
100	800	8,13	175	8
100	1000	6,5	176	12
125	400	20,31	180	28
125	600	13,54	181	22
125	800	10,16	182	14
125	1000	8,13	183	13
125	1200	6,77	184	18
125	1400	5,8	185	24
150	400	24,38	191	32
150	600	16,25	190	17
150	800	12,19	189	21
150	1000	9,75	188	20
150	1200	8,13	187	19
150	1400	6,96	186	29
175	600	18,96	202	23
175	800	14,22	193	16
175	1000	11,38	194	27
175	1200	9,48	195	26
175	1400	8,13	196	25
200	800	16,25	206	31
200	1000	13	197	10
200	1200	10,83	198	5
200	1400	9,29	199	30

zu 5.2.4.4

### Steifigkeit der Zugproben in Abhängigkeit der Belichtungsparameter



zu 5.2.4.5

### Querschnittsflächenkorrektur anhand des E-Moduls

Die Steigung des elastischen Bereiches setzt sich wie folgt zusammen.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{\epsilon \cdot A} \quad (\text{A.1})$$

Die Kraft wird direkt aus dem Kraft/Weg-Diagramm ermittelt und die Dehnung wird über die Probenlänge und den Weg des Kraft/Weg-Diagramms ermittelt. Somit kann, unter der Annahme, dass die Steigung im elastischen Bereich nicht veränderbar ist, nur eine nicht korrekt angenommene Querschnittsfläche die Messwerte verfälschen. Für die Korrektur zwischen angenommener zu wirksamen Querschnittsfläche wird der Korrekturfaktor  $k_A$  eingeführt. Somit ergibt sich die wirksame Querschnittsfläche zu

$$A_{\text{wirk}} = k_A \cdot A_s \quad (\text{A.2})$$

wobei die Fläche der Schmelzspur in Abschnitt 5.1 gemessen wurde. Nach Gleichung (A.1) ergeben sich folgende Zusammenhänge für die experimentell ermittelte und die theoretische Steigung im elastischen Bereich. Die theoretische Steigung ist bei korrekt angenommener, also wirksamer Querschnittsfläche zu erreichen.

$$E_{\text{theo}} \approx \frac{1}{A_{\text{wirk}}} \quad (\text{A.3})$$

Und die experimentell ermittelte Steigung ist abhängig von der Querschnittsfläche, welche angenommen wurde.

$$E_{\text{exp}} \approx \frac{1}{A_s} \quad (\text{A.4})$$

Nun gilt es, aus den gesammelten Versuchsdaten, den Korrekturfaktor zu ermitteln, welcher in den Auswertungen der Kraft/Weg-Diagramme nicht berücksichtigt wurde. Dieser lässt sich durch einsetzen von Gleichung (A.3) und (A.4) in (A.2) wie folgt darstellen.

$$k_A = \frac{E_{\text{theo}}}{E_{\text{exp}}} \quad (\text{A.3})$$

Da die theoretische Steigung ebenfalls nach der Standardliteratur bekannt ist, lässt er sich nach Gleichung A.3 für alle Probekörper berechnen, wobei hier aufgrund des nicht normgerechten Zugversuches die maximale Steigung als theoretische Steigung angesetzt wird.



## Formblatt **Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Bachelorthesis**

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift** (keine Ablichtungen !) **als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Bachelorthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden**.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Bachelor-Abschlusses führen.

### Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: Wiegandt \_\_\_\_\_ Vorname: Nestorius \_\_\_\_\_

daß ich die vorliegende Bachelorthesis – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema

Experimentelle Untersuchung der mechanischen Festigkeit von lasergenerativ hergestellten Stützstrukturen aus Edelstahl \_\_\_\_\_

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorthesis ist erfolgt durch

\_\_\_\_\_ Hamburg \_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_ 27.07.2010 \_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original