
BACHELORARBEIT

Herr
Jinglin Zhang

**Untersuchungen zum
Laserstrahlschweißen der
AlSi10Mg-Mischverbindung
aus stranggepresstem
Rohrmaterial AlMgSi1 am
LPBF-Demonstrator**

Mittweida, 2022

BACHELORARBEIT

Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen der AlSi10Mg-Mischverbindung aus stranggepresstem Rohrmaterial AlMgSi1 am LPBF-Demonstrator

Autor:
Herr Jinglin Zhang

Studiengang:
Maschinenbau

Seminargruppe:
MB16wL-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. Jan Drechsel

Einreichung:
Mittweida, den 25.07.2022

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2022

BACHELOR THESIS

Study on laser welding joining of AlMgSi1 extruded tube material and AlSi10Mg additive manufactured demonstrator

author:

Mr. Jinglin Zhang

course of studies:

Mechanical Engineering

seminar group:

MB16wL-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

second examiner:

Dipl.-Ing. Jan Drechsel

submission:

Mittweida, 25. July 2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Angaben

Zhang, Jinglin:

Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen der AlSi10Mg-Mischverbindung aus stranggepresstem Rohrmaterial AlMgSi1 am LPBF-Demonstrator. – 2022. – 47 S.

Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2022

Referat:

Die vorliegende Arbeit wurden die Untersuchungen zur Laserstrahlschweißen einer Mischverbindung aus stranggepresstem Rohrmaterial AlMgSi1 an additiv hergestelltem Aluminiummaterial AlSi10Mg mit einem an der Hochschule Mittweida vorhandenen 10 kW Monomode Faserlaser durchgeführt. Ziel der Forschungen war geeignete Parameter herauszufinden, um einen prozesssicheren Fügeprozess mit möglichst wenigen Nahtunregelmäßigkeiten, vor allem mit geringer Porosität und hoher Einschweißtiefe, zu realisieren. Dazu wurden Schweißversuche mit verschiedenen Parametern, wie beispielsweise Leistung, Schweißgeschwindigkeit sowie Fokusslage durchgeführt. Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde anschließend die Festigkeit der erzeugten Schweißnähte mittels Zugversuchs bewertet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I-II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Formelverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V-VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Selektives Laserschmelzen	3
2.2 Schweißbarkeit.....	4
2.3 Laser als Werkzeug	6
2.3.1 Faserlaser.....	7
2.3.2 Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Materie	8
2.4 Laserstrahlschweißen	10
2.4.1 Wärmeleitschweißen	10
2.4.2 Tiefschweißen.....	11
2.5 Aluminiumschweißen und Schweißnahtfehler	12
3 Versuchsvorbereitung.....	15
3.1 Versuchsaufbau.....	15
3.1.1 Strahlenquelle	16
3.1.2 Optische Komponente	16
3.1.3 Schutz- und Spannvorrichtungen	17
3.1.4 Zusätzliche Vorrichtungen	19
3.2 Strahlcharakteristika	21
3.2.1 Leistungsmessung	21
3.2.2 Strahlvermessung	21
3.3 Charakterisierung der Schweißproben	22
3.3.1 AlSi10Mg.....	23
3.3.2 AlMgSi1	23
3.3.3 Geometrie.....	25
4 Experimentelle Untersuchungen.....	27
4.1 Versuchsübersicht der Blindnaht	27
4.2 Versuchsübersicht der I-Naht	28
5 Ergebnisse und Auswertung.....	30
5.1 Vormerkungen	30
5.2 Charakterisierung der Versuche	31
5.2.1 Versuchsreihe 40A	31
5.2.2 Versuchsreihe 40B	32
5.2.3 Versuchsreihe 41A.....	33
5.2.4 Gegenüberstellung der Versuchsreihe 40A 40B 41A.....	34

5.3	Zugprüfung	38
5.3.1	Dummy-Probe aus AlMgSi1 und AlSi10Mg.....	39
5.3.2	Grundwerkstoff aus AlSi10Mg.....	40
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	43
	Literaturverzeichnis	45
	Anlagen	VIII-XI
	Selbstständigkeitserklärung	XII

Abkürzungsverzeichnis

SLM	Selektives Laserschmelzen
LHM	Laserinstitut Hochschule Mittweida
TEM	Transversal Elementar Mode
cw	Dauerstrichbetrieb
pw	Pulsbetrieb
WSO	Werkstückoberfläche
FL	Fokuslage
P_L	Strahlleistung
v_s	Schweißgeschwindigkeit
NB	Nahtbreite
ET	Einschweißtiefe
ORB	Oberraupenbreite
NÜ	Nahtüberhöhung
#NV	nicht vorhandene Messerwerte
AM	additive manufactured (engl. additiv gefertigt)
MM	mechanical manufactured (engl. mechanisch gefertigt)
LPBF	Selektives Laserschmelzen
Al	Aluminium
Mg	Magnesium
Si	Silizium
AC	Aluminiumgusslegierungen
AW	Aluminiumknetlegierungen

Formelverzeichnis

A	Absorptionsgrad
R	Reflexionsgrad
T	Transmissionsgrad
P	Leistung
α_{opt}	Absorptionskoeffizient
d	Eindringtiefe
$A_{d0,86}$	Strahlfleckquerschnitt
$d_{0,86}$	Fokusbereich
λ	Wellenlänge des Lasers
Z	Abstand zur Fokusebene
$d_{0,86}(Z)$	Spotdurchmesser bei Abstand zur Fokusebene
M^2	Beugungsmaßzahl
Z_R	Rayleighlänge

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Metall-Laserstrahlschmelzens	3
Abbildung 2: Schweißbarkeit.....	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Faseraufbaus	8
Abbildung 4: Wellenlängeabhängige Absorption verschiedener Werkstoffe.....	9
Abbildung 5: Schematische Darstellung vom Wärmeleitschweißen.....	11
Abbildung 6: Einkoppelverhalten und Tiefschweißeffekt.....	11
Abbildung 7: Röntgenaufnahme der Entstehung einer Prozesspore	13
Abbildung 8: Entstehung eines Schmelzbadauswurfes.....	14
Abbildung 9: Versuchsaufbau	15
Abbildung 10: Strahlenquelle	16
Abbildung 11: Optische Komponente	17
Abbildung 12: Cross-Jet Düse und Schutzgasdüse.....	18
Abbildung 13: Schraubstock	19
Abbildung 14: Netzteil und Rotor.....	20
Abbildung 15: Steuerrechner	20
Abbildung 16: Blindschweißprobe	25
Abbildung 17: Geometrie der I-Naht Proben	26
Abbildung 18: Maße im Nahtquerschnitt.....	30
Abbildung 19: Querschliffe Versuchsreihe 40 A	31
Abbildung 20: Querschliffe Versuchsreihe 40 B	32
Abbildung 21: Querschliffe Versuchsreihe 41 A	33
Abbildung 22: ET in Abhängigkeit der Leistung bei verschiedenen Fokuslagen und Geschwindigkeiten.....	35

Abbildung 23: ET in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei verschiedenen Fokuslagen und Leistungen.....	36
Abbildung 24: ET in Abhängigkeit der Fokusslage bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Leistungen	37
Abbildung 25: Zugmaschine.....	38
Abbildung 26: Zugprobepräparation der Dummy-Probe.....	39
Abbildung 27: Spannungs-Dehnungsdiagramm für AlSi10Mg; d = 9,67 mm.....	40
Abbildung 28: Spannungs-Dehnungsdiagramm für AlSi10Mg; d = 9,97 mm.....	41
Abbildung 29: Zugprobepräparation der Grundwerkstoffe AlSi10Mg	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung AlMgSi1	24
Tabelle 2: Eigenschaften der Legierung AlMgSi1	24
Tabelle 3: Versuchsübersicht Blindschweißen 40A	27
Tabelle 4: Versuchsübersicht Blindschweißen 40B und 41A.....	28
Tabelle 5: Übersicht über die Versuche beim I-Naht Schweißen.....	28
Tabelle 6: Übersicht über die Parameter von Zugproben.....	29
Tabelle 7: Bemaßung der Schliffbilder 40A	31
Tabelle 8: Bemaßung der Schliffbilder 40B	32
Tabelle 9: Bemaßung der Schliffbilder 41A	33
Tabelle 10: Messwerte bei verschiedenen Leistungen	34
Tabelle 11: Messwerte bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten	35
Tabelle 12: Messwerte bei verschiedenen Defokussierungen.....	37
Tabelle 13: Festigkeitswerte des Zugversuchs.....	40

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mit rasanter Entwicklung der Lasertechnik gewinnt das Laserschweißen in der industriellen Fertigung verstärkt an Bedeutung. Im Gegensatz zu anderen Schweißverfahren ist es sehr vorteilhaft. Die wesentlichen Vorteile sind beispielweise ein geringer Wärmeeintrag und ein daraus resultierender geringer thermischer Verzug, gute Automatisierbarkeit in Kombination mit der Robotertechnik und eine hohe Schweißgeschwindigkeit. Überdies besitzen die moderne Laseranlagen durch verbessertes Equipment zur Strahlführung und -formung eine hohe Genauigkeit, Strahlqualität und Leistungseffizienz. Somit können sie bei hohen Stückzahlen und kurzen Taktzeiten relative hochwertige Schweißnähte erzeugen, was die Unternehmen im Wettbewerb begünstigt. Bisher scheuten moderne Unternehmen immer noch die großen Investitionskosten der Anlagen und hohe Energieverbrauch. Durch den Einsatz der Faserlaser besteht eine Möglichkeit, mit geringen Fokusburchmessern (unter 100 µm) hohe Leistungen im Kilowattbereich auf dem Werkstück umzusetzen. Aufgrund solcher Vorteile hat sich das Laserschweißen innerhalb kürzester Zeit in Anwendungsfeldern wie dem Automobilbau, den Anlagenbau und den Karosseriebau etabliert. Auch in den Bereichen der Medizin und der Biotechnologie ist es heute nicht mehr wegzudenken.

Der 3D-Druck ist heutzutage ein Schwerpunkt für Lasertechnik. Da der Trend immer mehr zum Leichtleitbau geht, wird zunehmend auch Aluminiummaterial verarbeitet. Problematisch ist, dass dieser Bereich noch nicht ausreichend erforscht wurde und somit wenig fundiertes Wissen zur Verfügung steht. Andererseits kann die Aluminiumbearbeitung viele Probleme hervorgerufen, da das Aluminiummaterial eine hohe thermische Leitfähigkeit, Wärmeausdehnung und einen Reflexionsgrad von 0,8 besitzt. Dies kann Porosität, Heißrisse und Versprödung der Bauteile zur Folge haben und zu instabilen Prozessen führen. Durch eine Mischbauweise von additiv hergestellten Bauteilen (AM) und mechanisch hergestellten Bauteilen (MM) könnten die Vorteile der beiden Varianten vereint und die Wirtschaftlichkeit verbessern werden.

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Blindschweißuntersuchungen an AlSi10Mg und Stumpfstoßschweißung an AM-AlSi10Mg und MM-AMgSi1 durchgeführt, welche auf eine maximale Einschweißtiefe und eine hohe Nahtqualität abzielen.

1.2 Aufgabenstellung

In der Bachelorarbeit sollen Untersuchungen zur Anwendbarkeit des am Laserinstitut der Hochschule Mittweida vorhandenen 10 kW Monomode Faserlasers zum Laserstrahlschweißen an additiv hergestelltem AlSi10Mg-Material durchgeführt werden. Beim Laserschweißen von additiv hergestelltem Aluminiummaterial wurde bei früheren Schweißversuchen verstärkt die Entstehung von Poren in der Schweißnaht beobachtet.

Um Poren und anderer Nahtdefekte zu reduzieren sowie die Anwendung von LPBF-generierten Knotenstücken für größere Bauteilstrukturen zu demonstrieren sollen Versuche zum Schweißen von Mischverbindungen durchgeführt werden. Dazu werden experimentelle Untersuchungen angestellt, in denen durch eine Variation verschiedener Parameter wie beispielweise Schweißgeschwindigkeit, Leistung und Defokussierung das Ziel der Optimierung des Schweißergebnisses erreicht werden soll.

Zur Verifikation und Auswertung der ermittelten Schweißparameter und der entstehenden Schweißverbindungen sind Schliffproben anzufertigen sowie Festigkeitsuntersuchungen der Schweißnähte durchzuführen.

Durchzuführende Arbeiten sind:

- Literaturrecherche zum Stand der Technik
- Planung und Organisation der Versuche und des Versuchsaufbau
- Versuchsdurchführung
- Versuchsauswertung

2 Stand der Technik

2.1 Selektives Laserschmelzen

In dieser Bachelorarbeit wurde für den Demonstrator ein Knotenstück aus Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) durch Metall-Laserschmelzen (SLM) hergestellt. SLM, auch LPBF genannt, gehört zu einem additiven Fertigungsverfahren. Die Struktur des Bauteils wurde dabei durch den schichtweisen Aufbau und das laserinduzierte Umschmelzen der Metallpulvers erreicht. Jedes Bauteil wird dabei direkt aus den Konstruktionsdaten des CAD erzeugt, weshalb es häufig als 3D-Druck bezeichnet wird. Die SLM-Bauteile weisen eine hohe Stabilität und ein geringes Gewicht auf, was vorteilhaft in der Anwendung. Abbildung 1 zeigt das Prinzip des SLM. [8]

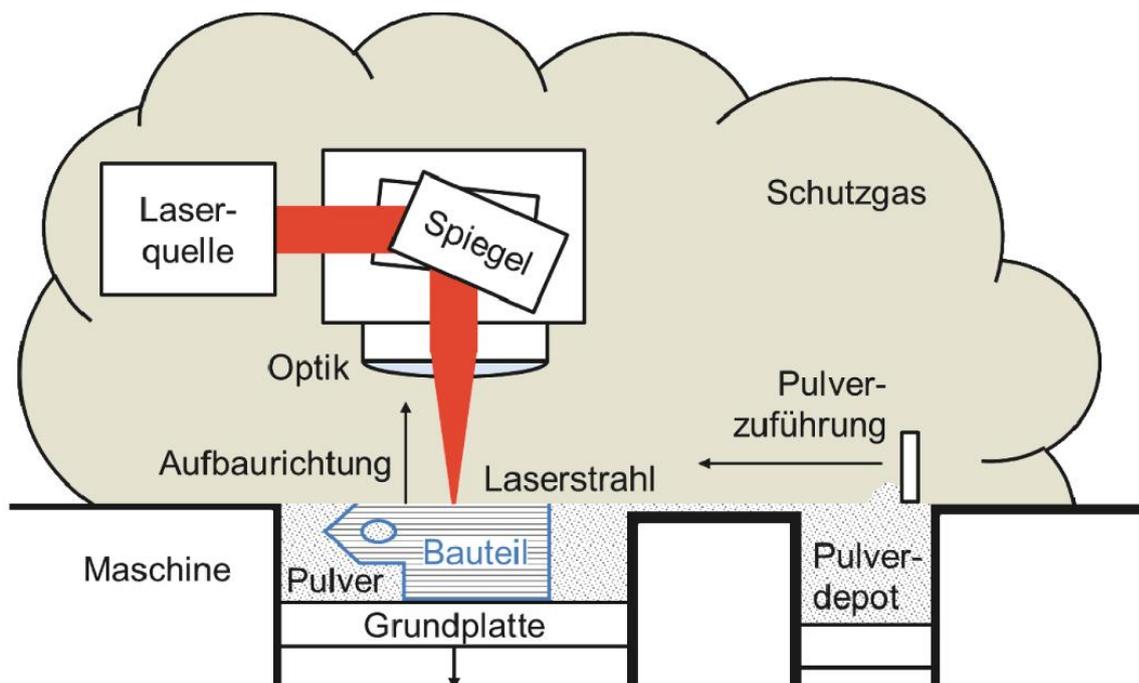


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Metall-Laserstrahlschmelzens [6]

Im Gegensatz zum konventionellen Fertigungsverfahren erfolgt das SLM werkzeuglos. Das Bauteil kann ohne Berücksichtigung von prozessbedingten Restriktionen, wie z.B. bei Guss-Bauteilen die Hinterschneidung oder Hohlräume usw., vollständig funktionsorientiert gestaltet werden. Außerdem entstehen fast keine Abfälle. Wie in [6] gezeigt, haben die mit den dort angewendeten Parametern additiv hergestellten SLM-Bauteile vergleichbare chemische und

mechanische Eigenschaften wie Druckguss-Bauteile. Somit ist eine Substitution von konventionellen Fertigungsverfahren möglich. Allerdings wird die Einsatzmöglichkeit wegen der hohen Anlagenkosten und der niedrigen Aufbaugeschwindigkeit stark begrenzt. Das größte Problem liegt darin, dass die Prozessgüte und Reproduzierbarkeit im Allgemein noch nicht ausreichend gesichert werden, um eine zuverlässige Bauteilqualität zu garantieren. Deshalb wird SLM heutzutage häufig im Leichtbau, wie beispielsweise Luft- und Raumfahrt sowie Prototypenbau und bei Serienbauteilen mit nur geringeren Stückzahlen eingesetzt. Trotzdem zeigt SLM eine große Potenziale und Einsatzmöglichkeiten in der zukünftigen Fertigung. [6]

2.2 Schweißbarkeit

Das Schweißen wird nach [1] in der Fertigungstechnik in die Hauptgruppe 4 „Fügen“ eingeordnet. Gemäß DIN 1910-100 bezeichnet das Schweißen einen Fügeprozess, welcher den Werkstoffen unter Anwendung von Wärme oder Kraft ohne oder mit Schweißzusatzwerkstoffen vereinigen. Die hergestellten Verbindungen sind dadurch unlösbar und stoffschlüssig. Das Laserschweißen zählt zu einem Schmelzschweißverfahren, dabei werden die Fügepartner durch lokales laserinduziertes Aufschmelzen im Verbindungsbereich vollständig vermischt, nach dem Abkühlen und Verfestigen des Schmelzbades sind sie verbunden. Heutzutage lassen sich zwar viele technische und wirtschaftliche Bauteile häufig nur als Schweißkonstruktion herstellen, jedoch lassen sich nicht alle Fügepartner problemlos verbinden. Dabei müssen verschiedene Randbedingungen erfüllt sein. Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen die Schweißbarkeit und entsprechender Einflussfaktoren. [3]

Der genauere Begriff der Schweißbarkeit wird nach [3] wie folgt definiert: „Die Schweißbarkeit eines Bauteils aus metallischem Werkstoff ist vorhanden, wenn der Stoffschluss durch Schweißen mit einem gegebenen Schweißverfahren bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufes erreicht werden kann. Dabei müssen die Schweißungen hinsichtlich ihrer örtlichen Eigenschaften und ihres Einflusses auf die Konstruktion, deren Teil Sie sind, die gestellten Anforderungen erfüllen.“ Die Schweißbarkeit ist von den drei Einflussgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung abhängig, allerdings sind die Abhängigkeiten indirekt. Nachstehend werden die einzelnen Faktoren erläutert.

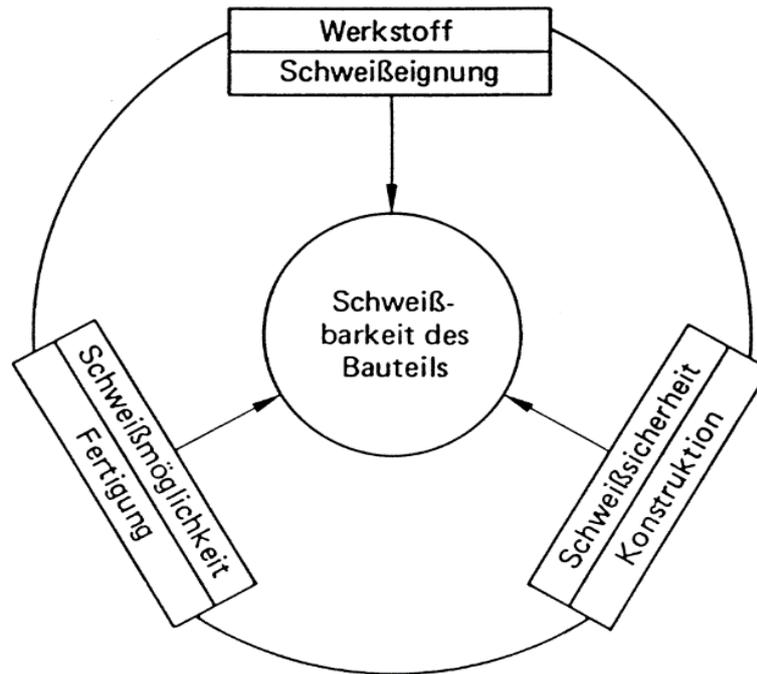


Abbildung 2: Schweißbarkeit [3]

Schweißeignung

Die Schweißeignung wird meistens von den Werkstoffeigenschaften entschieden. Darüber hinaus sind ihre Chemische Zusammensetzung, metallurgische Eigenschaften und physikalische Eigenschaften relevante Einflussfaktoren. Da der Schweißprozess zu einer Wärmebehandlung zählt, treten die dazugehörigen Phänomene, wie Zustandsänderungen und Strukturveränderungen der Werkstoffe, bei der Bearbeitung immer auf. Daraus folgen einige Eigenschaftsänderungen, wie beispielsweise Härte, Festigkeit, Gefügeumwandlung, Phasenumwandlung, Sprödbrech- und Rissneigung. Bei Aluminiummaterial ist insbesondere das Aushärtungsverfahren zu beachten. Für das Laserschweißen sind vor allem die thermophysikalischen Eigenschaften am wichtigsten. Dabei spielen die Wärmeleitfähigkeit, Dichte, der Schmelz- und Verdampfungspunkt sowie das Ausdehnungsverhalten der Werkstoffe wichtige Rollen, da die Wärmeübertragung der Fügepartners sowie die Qualität der Schweißnähte stark davon beeinflusst werden. Außerdem sollten die metallurgischen Eigenschaften, das Schmelzbadverhalten, das Gefüge unter Einwirkung der Schweißwärme, der Festigkeitszustand, Kalt- oder Warmrissneigung beachtet werden, um die durch Laser- und Materialwechselwirkung entstehende unerwünschte Nebenerscheinungen zu vermeiden.

Schweißmöglichkeit

Die Schweißmöglichkeit wird von der schweißtechnischen Fertigung beeinflusst. Dabei sind die Gesichtspunkte, wie Nahtvorbereitung, Ausführung der Schweißarbeiten und Nahtnachbehandlung zu beachten. Verunreinigungen, wie Öl, Schmutzfilm oder Oxidschicht können beim Schweißen häufig zu Poren oder Humping führen, da sie Quellen des Wasserstoffs sind und somit die Porenbildung begünstigen. Außerdem werden auch die Schweißgeschwindigkeit und Absorptionsverhalten der Fügepartner davon beeinflusst. Daher ist die Reinigung der Fügepartner, z.B. Ätzen oder Beizen, vor dem Schweißen notwendig, um die unerwünschten Einflüsse zu beseitigen bzw. um die Wasserstoffporosität im Bereich der Schweißnaht zu minimieren. Eine Wärmebehandlung, wie das Spannungsarmglühen, wird häufig vor/nach dem Schweißen des Aluminiummaterials genutzt, um Eigenspannungen abzubauen, da Aluminiummaterial immer eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen.

Schweißsicherheit

Der Einfluss der Konstruktion wird als Schweißsicherheit bezeichnet. Eine geeignete Gestaltung des Bauteils garantiert eine verzugsfreie und rissfreie Schweißung. Dabei sind die Gesichtspunkte der Art von Stoß und Naht sowie die Fugenvorbereitung zu beachten. Die Bauteile sollten so gestaltet werden, dass die Eigenspannungen oder örtliche Spannungskonzentrationen möglichst verkleinert werden können. [3, 4, 21]

2.3 Laser als Werkzeug

Die theoretischen Grundlagen des Lasers stammen von Albert Einstein. Er beschrieb erstmals im Jahre 1916 den Zusammenhang zwischen stimulierter und spontaner Emission von Atomen. Danach wurde im Jahre 1960 der erste Laser mit einer Wellenlänge von 694,3 nm durch Experimente von Theodore Maiman realisiert. Seitdem hat Lasertechnik sich stark weiterentwickelt. [7] Die häufigsten angewandten Fertigungsprozesse bei Lasermaterialbearbeitung sind Schweißen, Bohren, Schneiden, Beschriften und Oberflächenbehandlung. Aufgrund der einzigartigen Eigenschaften des Laserlichts, beispielsweise seine Kohärenz und als monochromatisches Licht sowie seine geringere Divergenz, lässt sich das Laserlicht in einem Punkt fokussieren. Somit ermöglicht es zur Bearbeitung eine sehr hohe Energie zu erzeugen. Dabei verursacht es eine geringe Wärmeeinflusszone, woraus ein relativ geringer Verzug des Bauteils resultiert. [5] Deshalb gewinnt die Lasertechnik in der Industrie immer mehr an Bedeutung, insbesondere für das Laserstrahlschweißen. In den 1970er Jahren

wurde das Laserschweißen hauptsächlich zum Schweißen von dünnwandigem Material mit niedriger Geschwindigkeit in Industrie angewendet. Heutzutage können aber durch die steigende Automatisierungsmöglichkeit und wegen der besseren Strahlqualität bei hohen Stückzahlen und kurzen Taktzeiten relative hochwertige Schweißnähte erzeugt werden. Um Laser zur Materialbearbeitung nutzen zu können, wird ein Lasersystem benötigt. Das Lasersystem besteht im Allgemeinen aus einem Lasergerät bzw. der Strahlungsquelle, einer Strahlformung und Strahlführung. Abhängig vom laseraktiven Medium der Laserquelle ergeben sich unterschiedliche Lasertypen, die hauptsächlich Festkörperlaser, Gaslaser und Diodenlaser genannt werden. Je nach Funktionsweise geschieht die Versorgung mit Energie auf verschiedenen Wegen. Festkörperlaser können durch Blitzlampen oder Pump laser, hingegen Gaslaser durch elektrische Entladung bzw. Elektronen- und Ionenstöße angeregt werden, Diodenlaser werden elektrisch betrieben. Bei Laserschweißanlagen werden am häufigsten Festkörperlaser in verschieden Bauform, wie z.B. Faser- oder Scheibenlaser, und CO₂-Laser eingesetzt. Nachfolgend wird einen Überblick über den in dieser Arbeit angewendeten Faserlaser geben. [9,10]

2.3.1 Faserlaser

Der Faserlaser gehört zu einer speziellen Form des Festkörperlasers. In dieser Bachelorarbeit wurde einer diodengepumpter 10 kW Singlemode Faserlaser von IPG eingesetzt, dessen Faserkern nur den transversale Grundmode (TEM 00) ausbreiten lässt. Aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften, wie beispielsweise der hohen Strahlqualität (Beugungsmaßzahl $M^2 = 1,1$), dem hohen Wirkungsgrad (bis zu 30%), der Robust- und Kompaktheit und der einfachen Leistungskalierung durch den modularen Aufbau, gewinnt der Faserlaser in der industriellen Fertigung immer an Bedeutung und etabliert sich in der Metallbearbeitung, der Drucktechnik und der Medizintechnik. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Faserlasers. [11]

Die Pumpstrahlung eines Diodenlasers wird über eine Koppeloptik in den Wellenleiter eingekoppelt. Der Faserlaser besitzt einen Doppelkern, wobei der innere Kern das aktive Medium ist. Dieser Doppelkern wird von einem Mantel umhüllt, damit die Strahlung nicht heraustreten kann. Die Faserkerne sind so konzipiert, dass Laserkern und Pumpkern einen hohen Brechungsindex besitzen, der Mantel hingegen einen geringeren, um möglichst viel von der Pumpstrahlung durch das aktive Medium zu leiten. Die Faserenden sind in diesem Fall der Resonatorspiegel. So tritt an der Grenzfläche von Kern zum Mantel eine Totalreflexion auf. Die Pumpstrahlung wird durch einen der beiden Spiegel von außen eingekoppelt. Anschließend wird die Strahlung der Faser durch eine Transportfaser zum

benötigten Bearbeitungsprozess weitergeleitet. Wegen seines Aufbaus bedarf der Faser meist keiner externen Kühlung. Weitere Vorteile sind hohe Flexibilität und Gesamteffizienz. Faserlaser nehmen eine rasche Entwicklung und sind heute in nahezu allen Industriezweigen nicht mehr wegzudenken. [4, 9, 11]

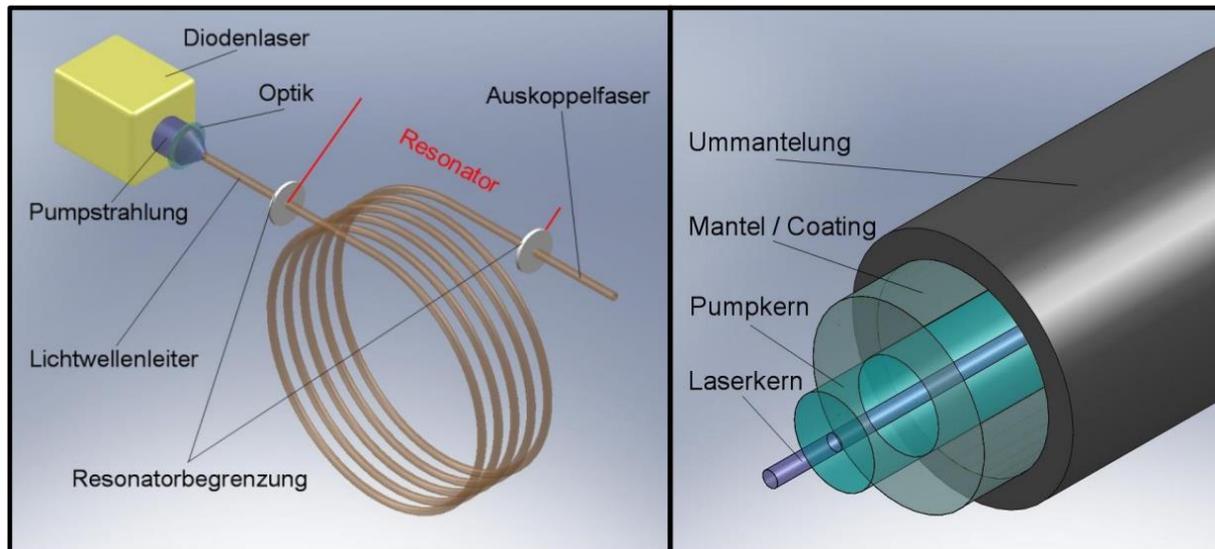


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Faseraufbaus [4]; links: Prinzip eines endgepumpten Lasers, rechts: Doppelkernfaser

2.3.2 Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Materie

Bei der Lasermaterialbearbeitung findet eine Umwandlung von elektromagnetischer Strahlungsenergie in Wärmeenergie im Werkstück statt. Wenn der Laserstrahl auf die Oberfläche des Werkstücks auftritt, wird ein Anteil davon reflektiert. Dieser Anteil wird über den Reflexionsgrad (R) beschrieben und ist u.a. abhängig von Einfallswinkel, der Polarisation der Strahlung und von den Stoffwerten des Materials. Der Rest ($P - P_R$) wird in das Werkstück eingekoppelt und wird dort absorbiert oder transmittiert. Diese werden als Absorptionsgrad (A) und Transmissionsgrad (T) bezeichnet. Laut des Energieerhaltungssatzes ergibt sich folgende Gleichung:

$$1 = \frac{P_R}{P} + \frac{P_A}{P} + \frac{P_T}{P} \quad \text{Gleichung (1)}$$

Darüber hinaus kann die Einkopplung der Energie auch durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$1 = A + R + T \quad \text{Gleichung (2)}$$

Die Absorptionsgrad spielt für die Einkopplung der Energie beim Schweißen eine bedeutende Rolle. Diese Größe ist neben der Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur sowohl von den Wellenlängen der Strahlung, als auch von den Werkstoffen abhängig (Abb.4). Sie ist der entscheidende Mechanismus für die Lasermaterialbearbeitung und kann durch den Lambert-Beersche-Gesetz beschreiben werden als:

$$I(z) = (1 - R) * I_0 * e^{-\alpha_{opt} * d} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Daraus ergibt sich die Eindringtiefe zu:

$$d = \frac{1}{\alpha_{opt}} \quad \text{Gleichung (4)}$$

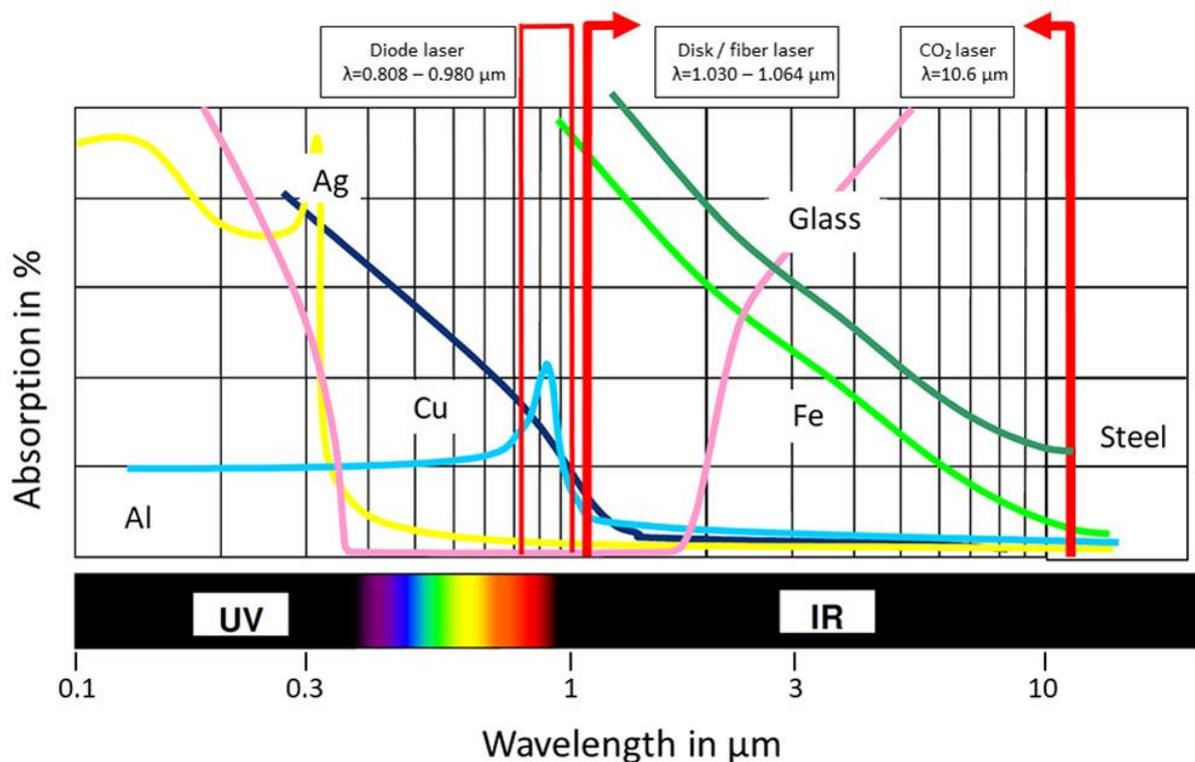


Abbildung 4: Wellenlängenabhängige Absorption verschiedener Werkstoffe [15]

Durch die Absorption der Laserstrahlung wird das Material erwärmt, geschmolzen und zum Teil verdampft. Bei höheren Intensitäten bildet sich eine Plasmawolke. Diese Plasmawolke kann die Bearbeitung beeinflussen, da diese zur Abschirmung des Laserstrahls auf die Bearbeitungszone führt. Außerdem spielen die Leistungsdichte des Laserstrahls, die Einwirkdauer und die beaufschlagte Geometrie für den Wechselwirkungsprozess bedeutende Rollen. Im Allgemeinen wird nur ein Teil der Strahlenergie aus dem Resonator zum Schmelzen des Werkstoffs bzw. zu der eigentlichen Materialbearbeitung umgesetzt. Zuvor wird ein Teil (2,5 - 12,5%) bereits im Strahlführungssystem durch die Optiken absorbiert. Ein weiterer Teil geht durch Reflexion (5%) oder Transmission (10%) verloren. Der Rest wird durch Prozesse, wie beispielweise Wärmeleitung und Konvektion sowie Metaldampf oder Plasma (ca.40%) reduziert und endlich ca.30% als Schmelzenergie genutzt. Durch Einstellen der Intensität bzw. der Fokussierung des Lasers zur Materialoberfläche entsteht eine geringere Wärmeeinflusszone und macht den Laser zu einem flexiblen, berührungslosen Werkzeug. [4, 5, 12, 13, 14]

2.4 Laserstrahlschweißen

Das Laserschweißen gehört zu der Gruppe des Schmelz-Verbindungsschweißens. Die Art des Schweißprozesses sowie die Energieübertragung sind von der Leistung bzw. der Intensität und der Wellenlänge des Lasers abhängig. Je nach Prozessausprägung kann das Laserschweißen in Wärmeleitschweißen und Tiefschweißen unterteilt werden.

2.4.1 Wärmeleitschweißen

Beim Wärmeleitschweißen wird normalerweise eine Energiedichte von größer 10^5 W/cm^2 angewendet, um das Werkstück an der Oberfläche aufzuschmelzen. Dabei tritt im Vergleich zum Tiefschweißen jedoch keine Verdampfung des Werkstoffs auf. Die Strahlungsenergie wird an Werkstückoberfläche absorbiert und durch Wärmeleitung und Konvektion in das Innere des Werkstücks transportiert, wodurch ein bestimmtes Schmelzbad gebildet wird. Üblicherweise kann die Schweißtiefe bei diesem Verfahren nur bis maximal von 2 mm erreichen. Die Schweißnahtoberfläche bildet sich sehr glatt und der Nahtquerschnitt linsenförmig aus. Aufgrund der geringen Absorption wird das Verfahren häufig im Dünnschichtbereich eingesetzt. Abbildung 5 zeigt den Prozess vom Wärmeleitschweißen. [18, 19]

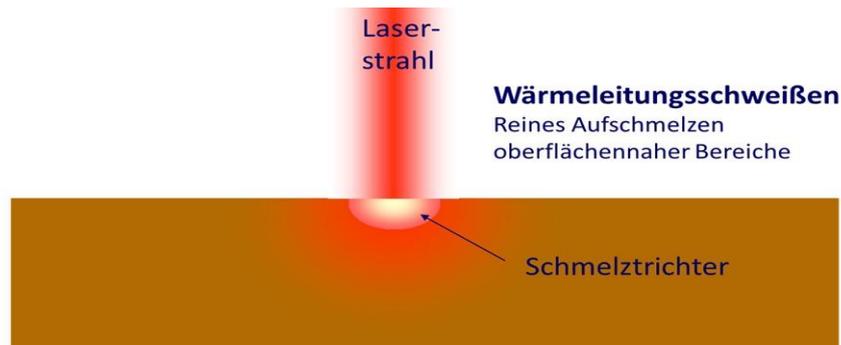


Abbildung 5: Schematische Darstellung vom Wärmeleitschweißen [16]

2.4.2 Tiefschweißen

Wenn beim Laserschweißen die Intensität der Laserstrahlung über die Schwellintensität von 10^6 W/cm^2 bei Stahl oder 10^7 W/cm^2 bei Aluminium erhöht wird, steigt die Bearbeitungstemperatur über die Verdampfungstemperatur an und der Prozess geht ins Tiefschweißen über. Durch die eingebrachte Energie wird der Werkstoff verdampft, der Dampf übt den Druck auf die Schmelze aus und drückt sie nach unten und zur Seite. Infolgedessen kann eine Dampfkapillare (Keyhole) entstehen. Der Durchmesser dieser Dampfkapillare hat die annähernde Größe wie Strahldurchmesser (0,2 - 1 mm). Die Metallschmelze umfließt die Dampfkapillare und durch den Druck des verdampfenden Materials wird das Schließen des Kanals verhindert. Der Laserstrahl kann in diesem Kanal tief in das Werkstück eindringen und an den schmelzflüssigen Wänden des Kanals mehrfach reflektieren. Somit absorbiert die Strahlungsenergie fast vollständig. Wenn der Laserstrahl relativ zum Werkstück bewegt wird, kann sich so der Dampfkanal durch das Werkstück bewegen. Das Tiefschweißen ermöglicht tiefe und schlanke Schweißnähte. Dabei beträgt das Tiefe- zu Breiterehältnis (Aspektverhältnis) mehr als 10. Abbildung 6 zeigt den Prozess des Tiefschweißens und die Einkopplung der Laserenergie. [18, 20]

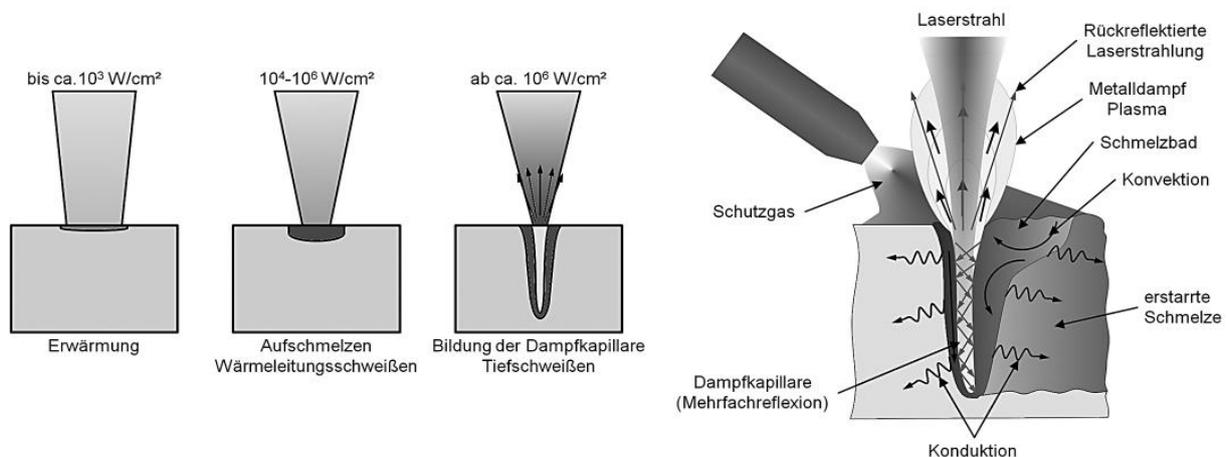


Abbildung 6: Einkoppelverhalten und Tiefschweißeffekt [17]; Intensitätsabhängiges Einkoppelverhalten (links) – Laserstrahlschweißen im Tiefschweißeffekt (rechts)

2.5 Aluminiumschweißen und Schweißnahtfehler

Aufgrund der Vorteile des Aluminiums, beispielweise seine geringe Dichte, große Korrosionsbeständigkeit und gute Schmelzschweißbarkeit hat es ein breites Anwendungsfeld im Maschinenbau, Fahrzeugbau, Bauwesen sowie bei Gegenständen des täglichen Bedarfs. Im Vergleich zu Kupfer besitzt das Aluminium zwar eine geringere elektrische Leitfähigkeit (62% von Kupfer). Jedoch kann es wegen seiner geringeren Dichte (ca. 1/3 von Kupfer) und seines günstigeren Preises je Kilogramm das Kupfer aus Anwendungen der Elektrotechnik verdrängen. Die Korrosionsbeständigkeit beruht auf die Ausbildung einer oxidischen Deckschicht, da das Aluminium eine hohe Affinität zu Sauerstoff besitzt. Andererseits kann es durch diese Reaktion mit Wasserdampf den Wasserstoff erzeugen, durch den eine Porosität der Schweißnaht hervorgerufen werden kann. Deshalb muss diese Oxidschicht beseitigt werden und während des Schweißens inerte Schutzgas wie Argon oder Helium eingesetzt werden. Außerdem besitzt Aluminiummaterial eine sehr gute thermische Leitfähigkeit und eine große thermische Ausdehnung. Diese bedingen eine gewisse Riss- und Verzugsgefahr sowie Zugeigenspannungen im Bereich der Schweißnaht. Damit ist eine große und schnelle Wärmezufuhr notwendig, um den Schweißprozess realisieren zu können. Um die Vorteile des Aluminiums zu nutzen, spielt die technische Entwicklung der Aluminiumlegierung eine bedeutende Rolle. Da Aluminium in reiner Form für die meisten Einsatzgebiete jedoch zu weich ist, wird es deshalb oft mit weiteren Metallen, wie beispielweise Mangan, Magnesium, Kupfer, Silicium oder Zink legiert, um seine Festigkeit und Härte zu erhöhen. [23] Je nach der chemischen Zusammensetzung und der Eigenschaften werden Al-Legierungen in zwei Hauptgruppen von Gusslegierungen (AC) und Knetlegierung (AW) unterteilt. In dieser Arbeit wurden Fügepartner die aus den beiden Typen bestehen und ihre Schweißverhalten untersucht. In Abschnitt 2.2 wurde erwähnt, dass sich nicht alle Werkstoffe problemlos verbinden lassen. Das Hauptproblem bei dem Laserschweißen von Aluminium sind die Schweißnahtfehler, wie Risse, Poren und Schmelzbadauswürfe. In den folgenden Abschnitten wird auf diese Fehler eingegangen.

Wasserstoffporen bezeichnet eine nahezu gleichmäßige Verteilung der kugelrunden Poren. Normalerweise besitzt Aluminium eine hohe Wasserstofflöslichkeit in flüssigem Zustand. Aufgrund der Abkühlung bzw. sinkender Temperaturen im Schmelzbad nimmt die Wasserstofflöslichkeit ab. Demzufolge wird der übersättigte Wasserstoff in Form von Gasbläschen aus der Schmelze ausgeschieden. Wenn die Erstarrung der Schmelze schneller ist, als die Bläschen entweichen können, verbleiben diese als Poren in der Schweißnaht. Die Quelle von Wasserstoff kann unterschiedlich sein. Beispielweise der Wasserdampf in der Atmosphäre,

der Anteil an Wasserstoff im Grundwerkstoff, die Oxidschicht sowie an der Oxidschicht adsorbierte Fette, Öle und Wasserdampf. Sie sind ebenfalls wasserstoffhaltig (als Hydrid verbunden) und kann sich beim Schweißprozess zersetzen und damit den Wasserstoff in die Schmelze freisetzen. Als Gegenmaßnahme sind beispielweise die Beseitigung der Oxidschicht und des Schmutzfilms vor dem Schweißen, die Erhöhung der Erstarrungszeit damit der Wasserstoffe abgesaugt werden kann, eine geeignete Werkstoffauswahl und Nahtvorbereitung sehr nützlich. Die chemische Zusammensetzung der Fügepartner spielt bei der Erzeugung des Wasserstoffes eine wichtige Rolle. [21, 22]

Prozessporen und Schmelzbadauswürfe sind auf Prozessinstabilitäten beim Tiefschweißen zurückzuführen, da beim Tiefschweißen die Dynamik der Dampfkapillare deren Einschnürung zur Folge haben kann. D.h. die flüssige Schmelze im unteren Bereich der Kapillare wird abgeschnürt und vom oberen Teil getrennt. Wenn bei der Erstarrung keine flüssige Schmelze in dem Hohlraum der Schmelzbadbrücke auffüllen kann, können als Resultat schlauchförmige Poren auftreten. Insbesondere Aluminiumlegierungen sind aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und der dünnflüssigen Schmelze für die Bildung von Prozessporen anfällig. Je tiefer die Einschweißtiefe und je größer die Schmelzbäder sind, desto ist größer die Gefahr dieser Porenbildung. Die Ursachen der Prozessporen sind noch nicht vollständig geklärt. Wie in [22] gezeigt, haben Forschergruppen viele Untersuchungen gemacht und die Ergebnisse zeigten, dass die Prozessporen häufig im unteren Teil der Kapillare auftraten und dass das Schutzgas ein Einfluss darauf hatte. [22]

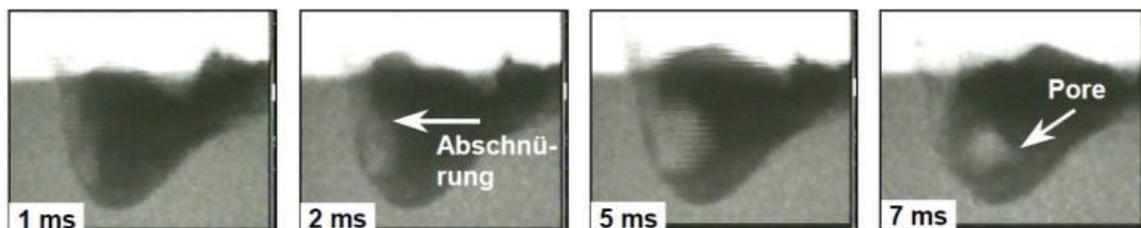


Abbildung 7: Röntgenaufnahme der Entstehung einer Prozesspore bei $P_L = 4,0$ kW [22]

Schmelzbadauswürfe stellen die stochastischen und explosionsartigen Auswürfe des geschmolzenen Nahtvolumens dar. Im Gegensatz zur Bildung von Prozessporen entsteht ein Auswurf durch die Abschnürung im oberen Bereich der Dampfkapillare. Ursache dieses Fehlers können sowohl Verunreinigungen der Fügepartner und in Al-Druckgussbauteilen eingeschlossene Gaspartikel, als auch die ungeeignete Nahtvorbereitung sowie Materialauswahl sein. Weitere Ursache wurden durch detaillierte Untersuchungen zur Fehlerentstehung in

Arbeit [22] geliefert. Diese sind bspw. dem hohen Dampfdruck, geringer Oberflächenspannung, geringer Viskosität der Schmelze sowie der Legierungselemente geschuldet. [22]

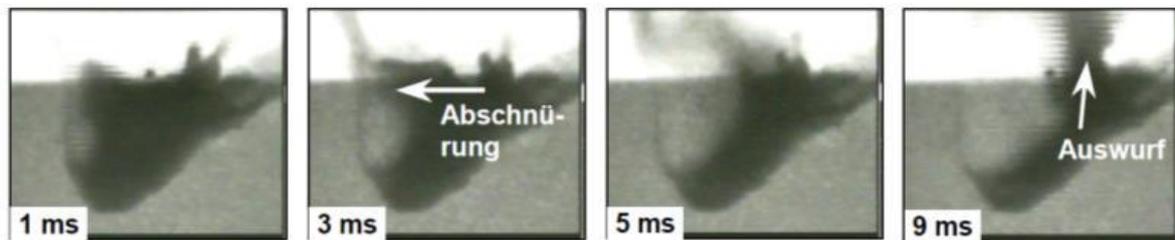


Abbildung 8: Entstehung eines Schmelzbadauswurfes bei $P_L = 3,0 \text{ kW}$ [22]

Heißrisse bezeichnen einen typischen Fehler des erstarrenden Schmelzgutes. Da die Aluminiumlegierungen normalerweise auf Mehrstoffsysteme beruhen, findet der Übergang der flüssigen in die feste Phase nicht direkt statt, sondern in einem Erstarrungsintervall. Das Volumen nimmt während der Erstarrung durch Schrumpfvorgang ab, wobei Fehlerstellen entlang der Korngrenzen hervorgerufen werden. Wenn kein flüssiges Material die entstehenden Werkstofftrennungen ausfüllen kann, entstehen dann beim weiteren Erstarrungsvorgang die Heißrisse. Das flüssige Material wird in Form von Korngrenzeutektikum bezeichnet und kann die Fehlerstellen ausgleichen. Es ist stark von der Legierungszusammensetzung abhängig und somit ein entscheidender Faktor für die Heißrissanfälligkeit. Wie in [22] gezeigt, kann durch den Einsatz eines hochlegierten Zusatzwerkstoffes oder einer Al-Legierung, welche hohe Legierungsanteile besitzt (z.B. Gusslegierungen), diese Gefahr vergleichsweise reduziert werden. Beim Schweißen treten die Heißrisse häufig bei großen Vorschubgeschwindigkeiten bzw. kleinen Streckenenergie auf. Grund dafür ist die rasche Abkühlung, da dies zu unterschiedlichen Gefügestrukturen und zu sehr hohen Schrumpfspannungen führt. [22]

3 Versuchsvorbereitung

3.1 Versuchsaufbau

In der Abbildung 9 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Im Allgemeinen besteht der Aufbau aus optischen Komponenten zur Strahlführung und -formung, der mechanischen Komponenten zum Spannen der Fügepartner, der Z-Achse zur Einstellung der Fokuslage sowie der Schutzgase. Die Strahlquelle und der Steuerrechner liegen außerhalb des Arbeitsraumes. Die Vorschubbewegung wurde durch eine angetriebene Linearachse realisiert und die Rotationsbewegung mithilfe einer Drehachse erreicht. Schraubstock und Drehachse sind in diesem Bild nicht abgebildet. Um die Versuche mit den verschiedenen Randbedingungen durchzuführen, mussten jeweils Anpassungen am Versuchsaufbau vorgenommen werden. In den nachstehenden Punkten wird auf alle beteiligten Komponenten eingegangen und der Laserstrahl näher charakterisiert.

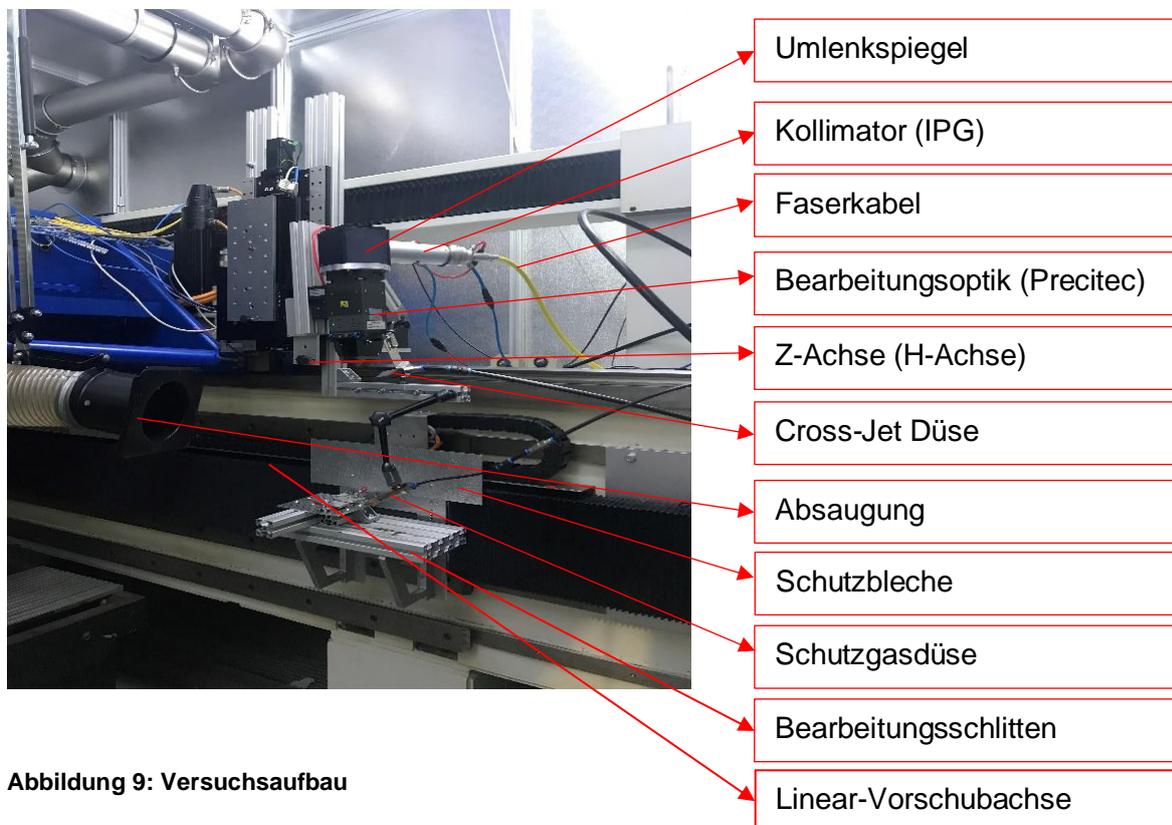


Abbildung 9: Versuchsaufbau

3.1.1 Strahlenquelle

Die Versuche wurden mithilfe einer wassergekühlten, diodengepumpten 10 KW Monomode Faserlasers mit der Bezeichnung YLS-10000-SM der Firma IPG Photonics durchgeführt. Bei dieser Laserquelle handelt sich um eine Ytterbium dotierte Doppelkernfaser und ist laut Hersteller so konzipiert, dass sie in Kombinationen mit anderen Maschinen sowohl in der Materialbearbeitung, wie dem Schweißen, Bohren und Präzisionsschneiden, als auch im Forschungsbereich anwenden kann. Der Faserlaser erzeugt Laserstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1070 nm und 1080 nm und kann sowohl im Dauerstrichbetrieb (cw) als auch im Pulsbetrieb (pw) bei einer Modulationsrate von 5 KHz getrieben werden.



Abbildung 10: Strahlquelle

Wie in Abschnitt 2.3.1 erläutert, kann durch den modularen Aufbau die Laserleistung skaliert werden, d.h. jedes Lasermodul kann als eigenständiger Laser verstanden werden und besitzt damit eine typenabhängige Ausgangsleistung zwischen 400 W und 1200 W. Je nach dem Arbeitsbedarf wird die Anzahl der Lasermodule im Laser ausgewählt, demzufolge stellt der Leistungsbereich zwischen 100 W und 10000 W zur Verfügung. Die Strahlqualität wird mit der Beugungsmaßzahl $M^2 = 1,5$ (typisch) bis maximal 2,0 angegeben. Die Ansteuerung des Prozesses erfolgte über die Steuersoftware LaserNet. Abbildung 10 zeigt die Strahlquelle. [24, 25]

3.1.2 Optische Komponente

In der Abbildung 11 werden alle Optischen Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung gezeigt. Hauptsächlich bestehen diese aus einem Kollimator und einer Fokussieroptik. Der Schweißkopf vereint den Kollimator, Umlenkspiegel und Fokussieroptik in einer kompakten Baugruppe. Der Zweck dieser Komponente liegt darin, dass sie die Laserstrahlung auf die Bearbeitungsoberfläche zu leiten.

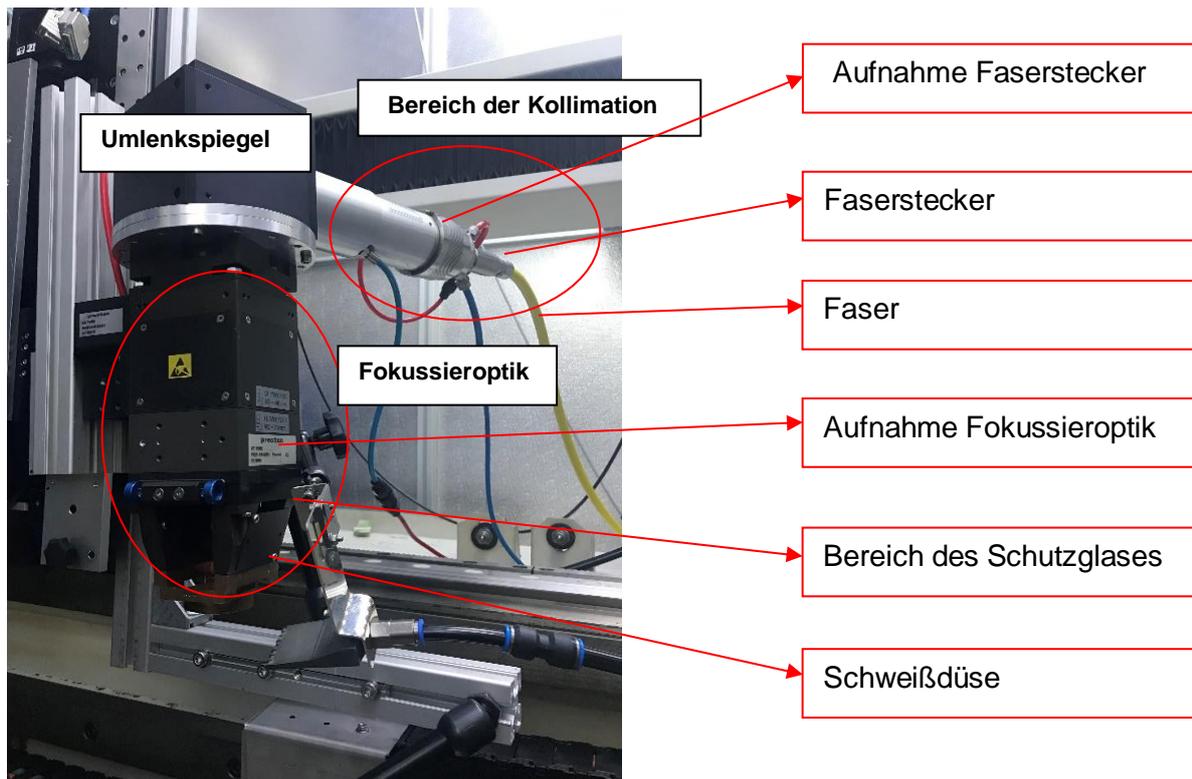


Abbildung 11: Optische Komponente

Zur Übertragung der erzeugten Strahlung aus der Strahlenquelle zur Optik wird ein Faserkabel (gelb) eingesetzt. Die dort austretende Laserstrahlung wird dann durch einen Kollimator (Fa. IPG Photonics) mit einer Brennweite von 160 mm geformt und kollimiert. Dieser ist für den Wellenlängenbereich zwischen 1030 nm und 1090 nm geeignet. Anschließend wird die kollimierte Strahlung durch einen Umlenkspiegel um 90 Grad in die Fokussieroptik umgelenkt und dort fokussiert. Letztlich wird die Strahlung durch die Fokussieroptik von dem Modell YW50 des Herstellers PRECITEC mit Brennweite 500 mm und das Schutzglas auf die Werkstückoberfläche geführt. [25]

3.1.3 Schutz- und Spannvorrichtungen

Absaugung

Um die Gesundheit der Arbeiter, Umwelt sowie die Maschine zu schützen, muss eine Absaugung mit entsprechendem Erfassungselement nahe der Bearbeitungsstelle eingesetzt werden. Einerseits werden während der Laserbearbeitung die Metallstäube, Rauch, Nebel, Gerüche sowie Feinstäube frei, welche unter Umständen giftig sind und somit Atemwegserkrankungen beim Menschen hervorrufen können. Andererseits können alle Komponenten dadurch beschädigt und verschmutzt werden. Die Produktivität und Bearbeitungsqualität

würden durch verschmutzte Bauteile stark beeinflusst werden. Außerdem kann es zur chemischen Reaktion zwischen Laserdampf und Maschine führen. [26] Daher ist es zwingend notwendig, eine Absaugung einzusetzen.

Cross-Jet Düse und Schutzgasdüse

Als Schutzgas wurde Argon eingesetzt. Der Zweck dieses Inertgases ist die Verhinderung der Oxidation im Bereich der Schweißnaht während der Bearbeitung. Wie in Abbildung 12 gezeigt, ist die Schutzgasdüse entlang der Vorschubachse in einem 45 Grad Winkel schlep- pend mit Öffnung direkt auf die Schweißstelle ausgerichtet.



Abbildung 12: Cross-Jet Düse (Links) und Schutzgasdüse (Rechts)

Ein Cross-Jet bezeichnet eine Düsenanordnung, die einen breit gefächerten Luftstrom über der Bearbeitungsstelle quer zur Laserstrahlung erzeugt. Hierfür wurde eine Flachstrahldüse vom Typ 920 der Firma Silvent zur Verfügung gestellt. Der Zweck dieses Luftstroms ist einerseits Schutz der optischen Komponenten vor Materialpartikeln, Schweißspritzern, Funken sowie Schmauch während der Bearbeitung und andererseits eine Manipulation der Dampfpackel und der Materialdämpfe, damit der Bearbeitungsprozess effizienter wird. Der Cross-Jet wird ergänzend zum Schutzglas eingesetzt. [26]

Schraubstock

Die Blindschweißnähte auf den Probenplatten wurden mit Hilfe eines Schraubstockes geschweißt. Er wurde auf dem Bearbeitungstisch aufgeschraubt und dient zur Probenaufnahme. Die Probe wurde dabei auf dem planen Absatz zwischen den Spannbacken des Schraubstocks aufgelegt und mittels Spindel festgezogen. Somit war die Probe durch die

Spannbacken fixiert. Außerdem kann die Probe durch eine Drehung von 90 Grad an die jeweilige Nahtform angepasst werden und somit eine variable Einlegbarkeit realisiert werden. In Abbildung 13 wird der Schraubstock gezeigt.

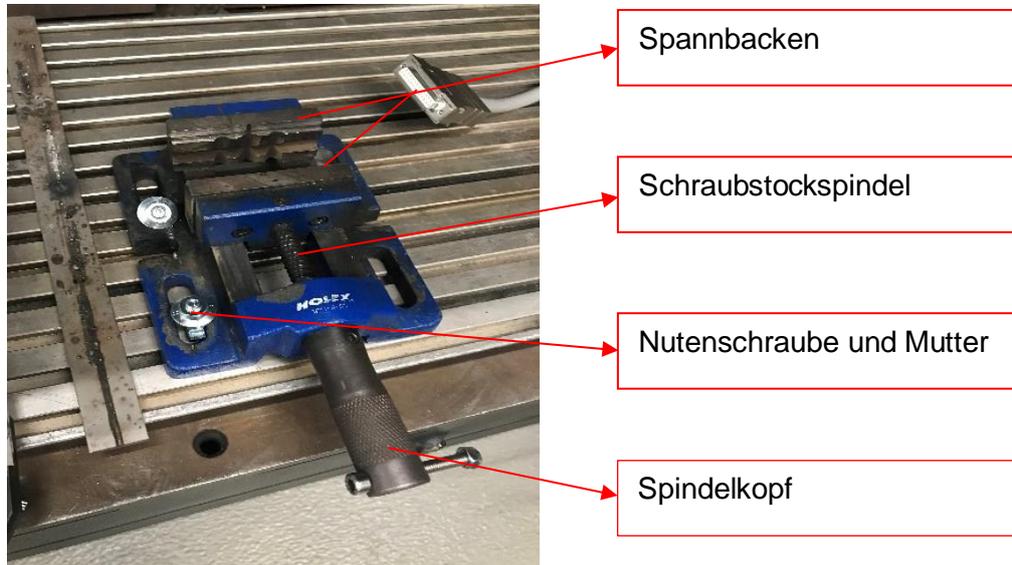


Abbildung 13: Schraubstock

3.1.4 Zusätzliche Vorrichtungen

Rotor und Netzgerät

Da der Laserbearbeitungskopf während des Schweißvorgangs unbeweglich war, musste für die Naht am Umfang des Demonstrators ein Rotor (Drehachse) eingesetzt werden, um die Rotationsbewegung der Probe zu realisieren. Im Spannfutter der Drehachse wurde der zylindrische Teil des Demonstrators durch 3 Spannbacken fixiert. Für die Spannungsversorgung der Drehachse wurde ein Netzgerät PS 7060 genutzt, welches in Kombination mit einem Voltmeter genutzt wurde. Somit konnte über die eingestellte Spannung die Rotationsgeschwindigkeit der Drehachse manipuliert werden. Dieses Netzgerät verfügt über 2 Ausgänge. Es konnten Spannungen von 0 bis 60 V mit einem Ausgangsstrom bis 1 A eingestellt werden. Die Einstellung der exakten Rotationsgeschwindigkeit konnte allerdings nur durch ein zusätzliches Drehzahl-Messgerät realisiert werden. Abbildung 14 zeigt den Aufbau der Drehachse.

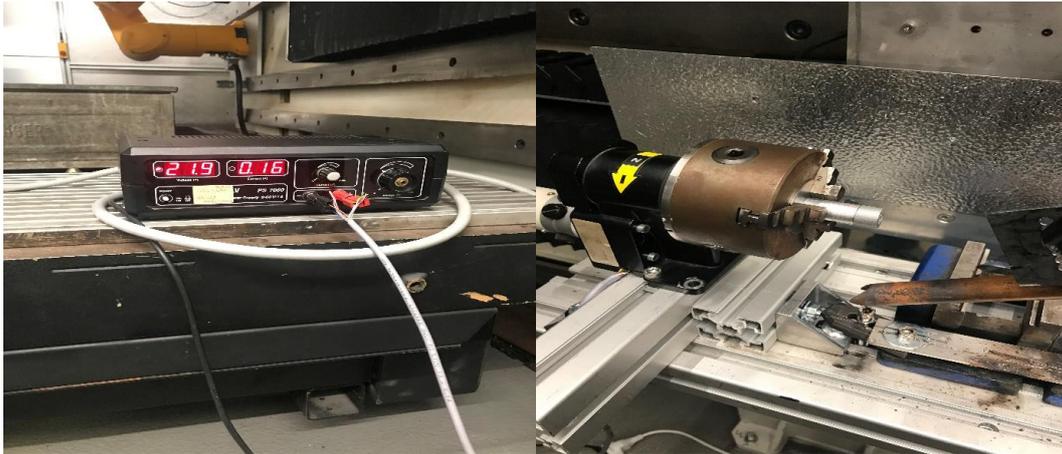


Abbildung 14: Netzteil (Links) und Drehachse (Rechts)

Vorschubachse und Z-Achse

Die Vorschubbewegung der Plattenprobe wurde durch eine Linearachse LMX1L-27-1-1850-A1BC der Firma HIWIM realisiert. Daran wurde ein Bearbeitungsschlitten angebracht, um die Probe zu bewegen und zu fixieren. Diese Achse stellt eine maximale Geschwindigkeit von 4 m/s bei einer maximalen Beschleunigung von 50 m/s^2 und 1850 mm Verfahrweg zur Verfügung. Um den Verfahrweg zu messen, besitzt sie ein optisches Wegmesssystem und induktive Endlagenschalter. [25] Zur Positionierung des Fokus zur Materialoberfläche wurde eine Z-Achse bzw. eine H-Achse der Firma NANOTEC verwendet, diese Achse wurde durch einen Elektromotor betrieben und bietet 450 mm Verfahrweg. Je nach der Fokusslage wurde der Schweißkopf mithilfe einer Bearbeitungsschiene, die an der Z-Achse angebracht wurde, nach oben oder unten verschoben. Außerdem konnte der Einfallswinkel durch diese Schiene eingestellt werden. Die Bewegungen der Vorschubachse und der Z-Achse wurden mittels des Steuerrechners gesteuert. [26]

Steuerrechner mit Steuersoftware

Der Steuerrechner mit der Steuersoftware LaserNet dient zur Fernsteuerung allen Prozessen, die für die Bearbeitung relevant waren. Dies sind beispielweise An- oder Ausschalten des Lasers, des Schutzgases, das Einstellen der Leistung, der Zeit und der Verfahrgeschwindigkeit der Vorschubachse, das Einstellen der Fokusslage durch Einstellen der Z-Achse. Außerdem konnte an dieser

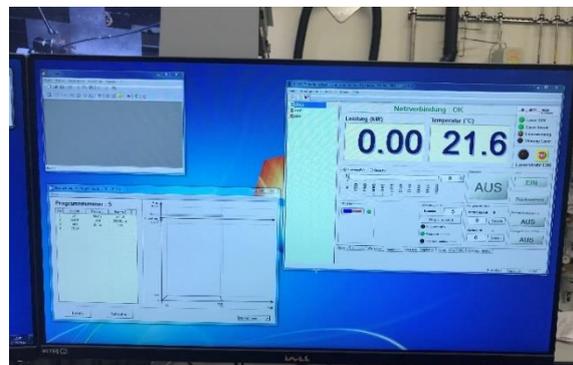


Abbildung 15: Steuerrechner

Software der aktuellen Arbeitszustand der Versuche bzw. alle Parameter im Bildschirm visualisiert und im Diagramm analysiert werden. Mithilfe des ausgewählten Programmtyps konnten die Versuche automatisch durchgeführt werden. Abbildung 15 zeigt die Bedienoberfläche des Steuerrechners.

3.2 Strahlcharakteristika

3.2.1 Leistungsmessung

Die vom Hersteller angegebene Leistung beziehen sich normalerweise auf die Messungen direkt am Ausgang des Lasers. Durch die Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung bzw. alle Komponenten, die am Strahlgang beteiligt sind, wird Laserstrahlung absorbiert und somit geht die Leistung verloren. Darum muss eine Leistungsmessung vor Beginn der Versuche durchgeführt werden, um die tatsächliche applizierte Laserstrahlleistung auf die Werkstückoberfläche zu bestimmen. Hierfür werden verschiedene Leistungsstufen eingestellt und jeweils mit der tatsächlichen Leistung bzw. gemessenen Leistung im Diagramm verglichen, somit kann der Leistungsverlust ermittelt werden. Aus zeitlichen Gründen wurde die Leistungsmessung in dieser Arbeit nicht durchgeführt, alle Leistungen bezogen sich direkt auf die Leistungen, welche in der Software eingegeben wurden. Das Ergebnis der Leistungsmessung ist in [26] angegeben.

3.2.2 Strahlvermessung

Um die Strahlkaustik bzw. die räumlichen Strahleigenschaften des Laserstrahles zu quantifizieren, muss eine Strahlvermessung auch vor Beginn der Schweißversuche durchgeführt werden. Anhand der Strahlvermessung wird den Fokussdurchmesser ermittelt, welcher an der Position der stärksten Fokussierung liegt, der als Strahltaile bezeichnet wird. Auf Grund der gaußförmigen Intensitätsverteilung des Laserstrahls wird das Durchmessersymbol mit dem Index „0,86“ erweitert, was daraufhin weist, dass 86 % der applizierten Intensität innerhalb des Strahlfleckquerschnittes eingebracht wird [26]. Der Strahlfleckquerschnitt kann nach Gleichung 5 berechnet werden.

$$A_{d0,86} = \left(\frac{d_{0,86}}{2} \right)^2 * \pi \quad \text{Gleichung 5}$$

Mit $A_{d0,86}$... Strahlfleckquerschnitt
 $d_{0,86}$... Fokussdurchmesser

Ebenso wie der Strahlfleckquerschnitt ist die Rayleighlänge Z_R und Beugungsmaßzahl M^2 für Laserbearbeitung sehr wichtig. Darum müssen sie auch gemessen werden. Die Rayleighlänge gibt an, mit welchem Abstand zur Fokusebene sich die Fläche des Strahlquerschnittes verdoppelt. [5] Da der gaußverteilte Laserstrahl entsprechend der hyperbolischen Form propagiert, d.h. je größer der Abstand zur Fokusebene ist, desto größer ist die Divergenz der Laserstrahlung. Darum hat die Laserstrahlung im Bereich der Rayleighlänge $2 \cdot Z_R$ eine relative gute Parallelität bzw. Kollimation. Die Beugungsmaßzahl M^2 ist eine dimensionslose Größe. Je höher sie ist, umso schlechter lässt sich der Strahl fokussieren. Aus zeitlichen Gründen wurde die Strahlmessung in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Diese Untersuchung wurde in [26] oder anderen Arbeiten angegeben. Unter Anwendung von (Gl. 5) mit Beugungsmaßzahl und der Wellenlänge des Lasers kann der Fokusedurchmesser bei jedem Abstand zur Strahltaile berechnet werden.

$$d_{0,86}(Z) = d_{0,86} * \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda * M^2 * Z}{\pi * d_{0,86}^2} \right)^2} \quad \text{Gleichung 6}$$

Mit: $d_{0,86}(z)$... Spotdurchmesser bei Abstand zur Fokusebene
 λ ... Wellenlänge des Lasers
 M^2 ... Beugungsmaßzahl
 z ... Abstand zur Fokusebene

3.3 Charakterisierung der Schweißproben

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Aluminiumlegierungen verwendet. Im Folgenden wird auf die Bezeichnung, Verwendung, chemische Zusammensetzung sowie die mechanischen Eigenschaften der Legierungen eingegangen. Anschließend wird die Geometrie der Proben erläutert und veranschaulicht.

3.3.1 AlSi10Mg

Die Aluminiumlegierung EN AC-43000 (AlSi10Mg) mit der Werkstoffkennzahl 3.2381 ist eine aushärtbare Gusslegierung der 40000 Serie, für welche ein T6 Zyklus zur Wärmebehandlung anwendbar ist. Bei dieser Legierung liegt, im Gegensatz zu der AlMgSi-Legierung, ein Überschuss an Silizium vor und das Gefüge besteht aus dem Aluminiummischkristall, Silizium und Magnesiumsilicid (Mg_2Si). Diese Legierung zeichnet sich eine gute gießtechnologische Eigenschaft und ermöglicht die Herstellung dünnwandiger Bauteile und der komplexen Geometrien mit guter Festigkeit, dynamischer Belastbarkeit und Härte aus. Die häufigsten Anwendungsgebiete sind Automotive, Funktionsprototypen, Serienteile, Luft- und Raumfahrt sowie Motorsport. [27, 28] Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften mit den Richtwerten wurden in Anlage 1 der Firma rauleder angegeben. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, wurden die Probenkörper aus dieser Legierung mithilfe der Maschine SLM 280 HL im LHM hergestellt. Deshalb stellt der Pulverhersteller m4p für den 3D-Druck eine eigens erstellte chemische und mechanische Analyse zur Verfügung. Dieses Datenblatt ist in Anlage 2 angegeben. Damit könnte es mit Anlage 1 verglichen werden.

3.3.2 AlMgSi1

Die Aluminiumlegierung EN AW-6082 (AlMgSi1) mit der Werkstoffnummer 3.2315 ist eine aushärtbare Knetlegierung der 6000 Serie, welche in den Behandlungszuständen T6 vorliegen kann. Diese Legierungen lassen sich durch Umformen wie Walzen oder Strangpressen in die gewünschte Form bringen, ähnlich wie bei den AlSiMg-Legierungen besteht das Gefüge aus Aluminiummischkristall mit Magnesium und Magnesiumsilicid. Aber an der Reihenfolge der Symbole Al-Mg-Si ist zu erkennen, dass der Anteil von Magnesium größer ist als der Anteil von Silizium. In Tabelle 1 ist die chemische Zusammensetzung dargestellt. Hierbei liegen die Herstellerangaben der Firma Batz-Burgel zu Grunde [29].

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung AlMgSi1

Element	Herstellerangaben [%]
Al	Basis
Si	0,7 - 1,3
Fe	0,5
Cu	0,1
Mn	0,4 - 1,0
Mg	0,6 – 1,2
Cr	0,25
Zn	0,2
Ti	0,1
Andere Elemente	0,15

Neben ihrer Festigkeit und Härte besitzen diese Legierungen eine hohe Bruch- oder Risszähigkeit und eine gute Seewasserbeständigkeit. Darüber hinaus lässt sie sich gut umformen und besitzen eine hohe Biegefestigkeit. Durch die Beifügung von Silizium ist sie auch für eine Bearbeitung wie Löten oder Schweißen geeignet, da der Schmelzpunkt dadurch erniedrigt ist. Außerdem sorgt Silizium dafür, dass die Schmelze dünnflüssig wird. Somit verbessert es die Gießbarkeit des Rohmaterials. [28] Weitere Eigenschaften und Kennwerte der Legierungen werden in Tabelle 2 [29] dargestellt. Aufgrund seiner Eigenschaften werden sie sehr vielfältig eingesetzt. Beispiele hierfür sind Apparatebau, Anlagenbau, Dekoration, Fahrzeugbau, Schiffbau, Hochsee, Brückenbau, Hoch- und Bergbau, Nukleartechnik, Nahrungsmittelindustrie. [28]

Tabelle 2: Eigenschaften der Legierung AlMgSi1

Formelzeichen	Bezeichnung	Wert	Maßeinheit
R _m	Zugfestigkeit	310 (min.)	MPa
R _{p0,2}	Dehngrenze	260 (min.)	MPa
A ₅₀	Bruchdehnung	7 (min.)	%
-	Härte	94	HBS
E	Elastizitätsmodul	70.000	N/mm ²
δ	Dichte	2,70	g/cm ³

3.3.3 Geometrie

Als Vereinfachung der experimentellen Untersuchungen wurde der Demonstrator (AlSi10Mg) zunächst von einer Dummy-Probe ersetzt, welche das identische Material und teilweise die gleiche Größe wie der Demonstrator hatte. Die Abmessungen der Probenteile richtete sich einerseits nach der umsetzbaren Schweißlänge, Anzahl der Schweißspur, erreichbaren Schweißtiefe und andererseits nach der Probenart. Hierbei wurden die Proben mit unterschiedlicher Geometrie für die Blind- und I-Naht Versuche eingesetzt. Im Folgenden werden sie gegenübergestellt.

Blindnaht Proben

Um die idealen Parameter der Laserstrahlung für das Schweißen des Demonstrators zu finden, sollten zunächst Blindschweißversuche am Plattenmaterial AlSi10Mg durchgeführt werden. Dieses 40 x 40 x 5 mm Plattenmaterial hatte durch Nachbearbeitung nach dem SLM eine glatte Oberfläche. Die Schweißnähte wurden parallel nebeneinander in ausreichendem Abstand, beginnend vom Probenrand ausgeführt. Abbildung 16 zeigt die Probemaße.

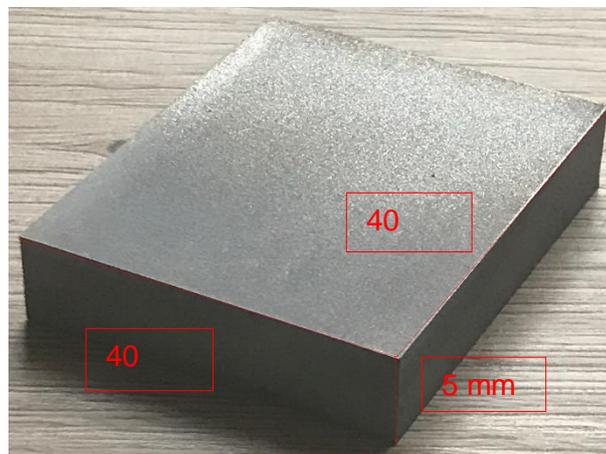


Abbildung 16: Blindschweißprobe

I-Naht- und Zugversuchsproben

Die I-Naht Proben sind so konzipiert, dass sie aus zwei verschiedene Aluminiumlegierungen derselben rohrförmigen Geometrie mit einem Durchmesser von 14 mm bestehen. Vor dem Schweißen wurden sie durch eine Schraube miteinander verbunden und danach zusammengeschweißt. Dabei beträgt die Gesamtlänge ca. 30 mm. Die I-Naht am Umfang befindet sich somit ca. in der Mitte der Probe. In der folgenden Abbildung 17 sind die Probenmaße

ersichtlich. Für die Zugfestigkeitsprüfung wurde an den Enden jeweils ein Feingewinde (M14 x 1,5) angebracht, damit dort Verlängerungen aus Radmuttern angebracht werden konnten. Die Länge der Gesamtprobe (gedruckter Bereich + Schweißnaht + Rohr) sollte bei ca. 100 mm liegen, damit sie in der Shimadzu-100KN-Zugprüfmaschine aufgenommen und somit die Prüfung durchgeführt werden konnte. Als Zugproben wurden drei Probekörper aus den vorhandenen Materialrohlingen generiert.

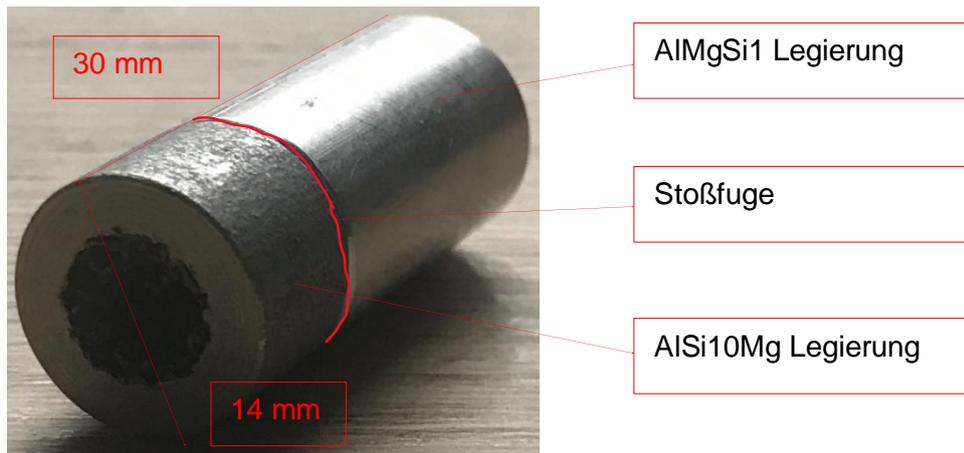


Abbildung 17: Geometrie der I-Naht proben

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Versuchsübersicht Blindnahtschweißen

Der Zweck dieses Blindschweißens war die besten Parameter für das I-Naht Schweißen herauszufinden. Als Vorbehandlung wurden alle Proben vor dem Schweißen durch Isopropanol (Iso) gereinigt, damit sichergestellt wurde, dass keine störende Einflussfaktoren, wie Rückstand oder Verunreinigungen, vorlagen. Die Brennweite der Optik war für alle Versuche unverändert gelassen. In den folgenden Tabellen 3 und 4 sind alle Versuchsparameter der einzelnen Versuchsreihen aufgelistet. In der rechten Spalte wird die jeweilige Zielstellung des Versuchs sowie ihre Parametereinflüsse hinsichtlich Einschweißtiefe und Nahtaussehen gegeben. Der Arbeitsabstand ist dabei die Entfernung der Fokusebene zur Werkstückoberfläche. Dieser Abstand wurde zunächst so eingestellt, dass die Position des Fokus gerade auf die Werkstückoberfläche lag. In den weiteren Untersuchungen wurde der Abstand/ Fokusslage in vertikaler Richtung vergrößert oder verkleinert. Bei dem Versuch Nr. 5 wurde die Spur mit der Spur von Versuch Nr. 5* überschweißt, also doppelgeschweißt.

Tabelle 3: Versuchsübersicht Blindschweißen, Probe 40 A

Versuchsreihe Nr. 40 A								
Material: AISi10Mg								
Nr.	PL [W]	FL [mm]	Vs [mm/s]	Brennweite/Arbeitsabstand [mm]	Einstrahlwinkel [°] (stechend)	Schutzgas (schleppend)	Ziel	
1	1000	WSO	166	F500/498	3	Ar	Einfluss PL	Einfluss FL
2	1000	WSO	166	F500/498				
3	2000	WSO	166	F500/498				
4	3000	WSO	166	F500/498				
5*	3000	-2	166	F500/496				
5	3000	-5	166	F500/493				
6	3000	-5	166	F500/493				
7	3000	-2	166	F500/496				
8	4000	-4	250	F500/494			Einfluss FL	
9	4000	-5	250	F500/493				

Tabelle 4: Versuchsübersicht Blindschweißen: Proben 40 B und 41 A

Versuchsreihe Nr. 40 B											
Material: AISi10Mg											
Nr.	PL [W]	FL [mm]	Vs [mm/s]	Brennweite/Arbeitsabstand [mm]	Einstrahlwinkel [°] (stechend)	Schutzgas (schleppend)	Ziel				
1	3000	-5	166	F500/493	3	Ar	Einfluss Vs	Einfluss PL	Einfluss PL		
2	4000	-5	166	F500/493					Einfluss FL		
3	4000	-5	100	F500/493					Einfluss PL		
4	4000	-10	100	F500/488			3	Ar	Einfluss Vs	Einfluss PL	Einfluss FL
5	3000	-10	100	F500/488							Einfluss FL
6	2000	-10	100	F500/488							Einfluss Vs
7	2000	-5	100	F500/493							Einfluss FL
Versuchsreihe Nr. 41 A											
Material: AISi10Mg											
Nr.	PL [W]	FL [mm]	Vs [mm/s]	Brennweite/Arbeitsabstand [mm]	Einstrahlwinkel [°] (stechend)	Schutzgas (schleppend)	Ziel				
1	1000	WSO	166	F500/498	3	Ar	Einfluss FL	Einfluss Vs	Einfluss Vs		
2	1000	WSO	100	F500/498					Einfluss Vs		
3	1000	-3	100	F500/495			Einfluss PL	Einfluss FL	Einfluss Vs	Einfluss Vs	
4	1000	-3	83	F500/495						Einfluss Vs	
5	2000	-3	83	F500/495						Einfluss FL	
6	2000	-3	100	F500/496			Einfluss Vs	Einfluss FL	Einfluss Vs	Einfluss Vs	
7	2000	-6	100	F500/492						Einfluss Vs	
8	2000	-6	83	F500/492						Einfluss Vs	

4.2 Versuchsübersicht der I-Naht

Zum Schweißen der Dummy-Probe wurden die Parameter mithilfe der Ergebnisse aus den in Abschnitt 4.1 durchgeführten Versuchen ausgewählt, die beim Blindnahtschweißen ein relativ gutes Nahtaussehen aufwiesen. Anschließend wurde einer des Parametersätze ausgewählt und die Zugproben generiert, um daran die Festigkeit der generierten Schweißnähte prüfen zu können. Ähnlich wie bei 4.1 sind in Tabelle 5 die eingestellten Parameter der I-Naht Schweißversuche aufgelistet.

Tabelle 5: Übersicht über die Versuche beim I-Naht Schweißen

Demonstrator bzw. Dummy-Probe									
Material: AISi10Mg/AlMgSi1									
Laserprogramm 5/Steuerungsprogramm 5									
Nr.	PL [W]	FL [mm]	Vs	U [V]	Rampe Ein [ms]	In Time ON [ms]	Rampe Aus [ms]	Parametersatz	Bemerkung
1	2000	-5	100		50	500	20	40 B7	Nicht so doll
2	4000	-5	100		50	500	20	40 B3	Naja
3	3000	-10	100	15	50	500	20	40 B5	Gut, breiter
4	3000	-5	166	22	50	500	20	40 A6	Sehr gut, aber am Demonstrator: Loch!

Der ausgewählte Parametersatz aus den Ergebnissen der Versuche am Dummy war zwar gut, allerdings entstand an den Demonstrator-Bauteilen zu Beginn der Schweißung oftmals ein Loch. Das konnte auch beim anschließenden Überschweißen mit voller Laserleistung nicht mehr geschlossen werden. Eine Ursache konnte zunächst auf Grund der wenigen Vorversuche nicht ermittelt werden. Deshalb wurde die Einfahrrampe auf 150 ms verlängert. Somit konnte das Loch am Anfang der Schweißnaht bis auf wenige Ausnahmen weitestgehend verhindert werden. Die Einfahrrampe ist dabei der Zeitraum der Schweißnaht mit steigender Leistung von Null bis auf Maximalwert. Danach sollte die Schweißzeit mit voller Laserstrahlleistung 500 ms betragen, so dass mit einer Schweißgeschwindigkeit von 166 mm/s und einem vorhandenen Umfang von 44 mm fast 2 Umdrehungen geschweißt wurden. Das Ende des Schweißprozesses bildete eine 50 ms lange „Auslauframpe“ mit abnehmender Strahlleistung bis auf null. Die Parameter für die Zugproben werden in folgender Tabelle 6 gezeigt.

Tabelle 6: Übersicht über die Parameter von Zugproben

Nr.	P_L [W]	FL [mm]	V_s	Rampe Ein	In Time ON	Rampe Aus
1	2000	-10	166	150 ms	500 ms	50 ms
2	3000	-10	166	50 ms	500 ms	20 ms
3	2000	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV

5 Ergebnisse und Auswertung

5.1 Vormerkungen

Für die Auswertung der Ergebnisse aller Versuche wurden die Nahtquerschnitte begutachtet. Darüber hinaus waren die Messung der Nahtbreite (NB), Einschweißtiefe (ET), Oberraupenbreite (ORB) sowie Nahtüberhöhung (NÜ) von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden alle Proben metallografisch präpariert und anschließend mikroskopisch vermessen. Die Vermessung der Schliffbilder erfolgt mit dem Digitalmikroskop „VH-S30“ der Firma Keyence unter 20-facher Vergrößerung. Dieses Mikroskop wird in Kombination mit der Software „MicroCapture Plus“ verwendet. Die Ergebnisse der Versuche werden anhand von Schliffbildern, Tabellen und Diagrammen gegenübergestellt und die Merkmale der Schweißnaht zusammengefasst. Abbildung 18 zeigt die gesetzten Messmarken im Nahtquerschnitt.

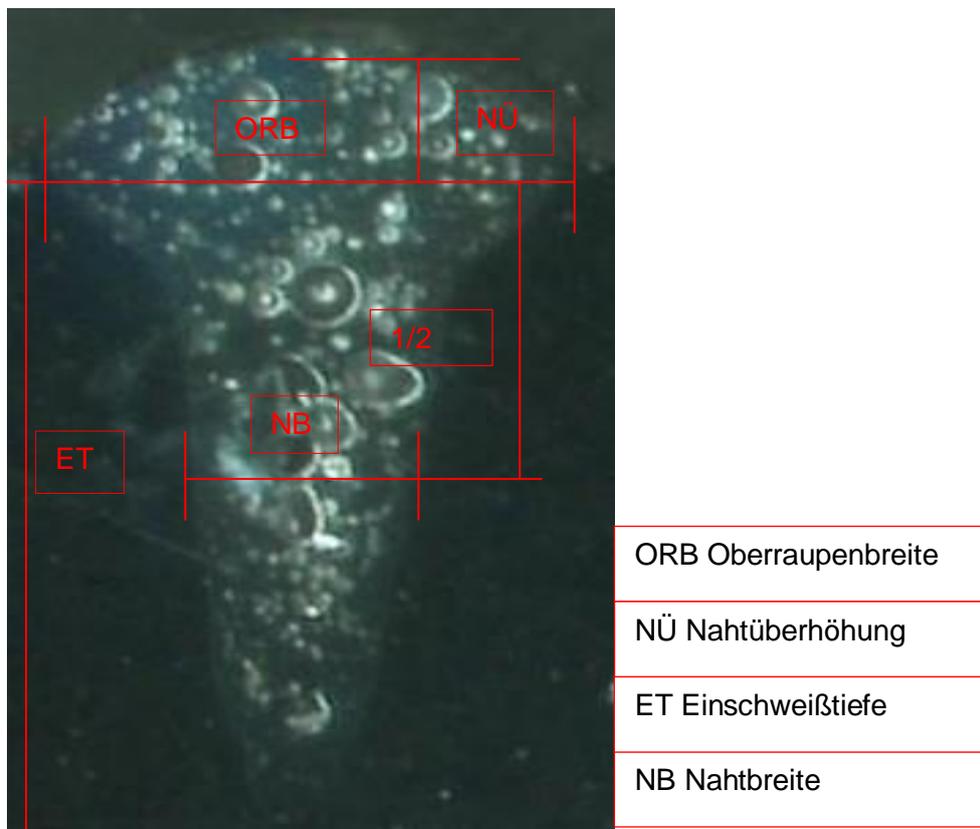


Abbildung 18: Maße im Nahtquerschnitt

Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels werden die Parametereinflüsse auf die Ergebnisse untersucht. Dabei werden einige Versuche ausgewählt, die nur eine unterschiedlich Variable haben. Mithilfe von Diagrammen werden sie gegenübergestellt und ausgewertet. Im letzten Abschnitt wird die Schweißnahtfestigkeitsprüfung ausgewertet.

5.2 Charakterisierung der Versuche

5.2.1 Versuchsreihe 40 A

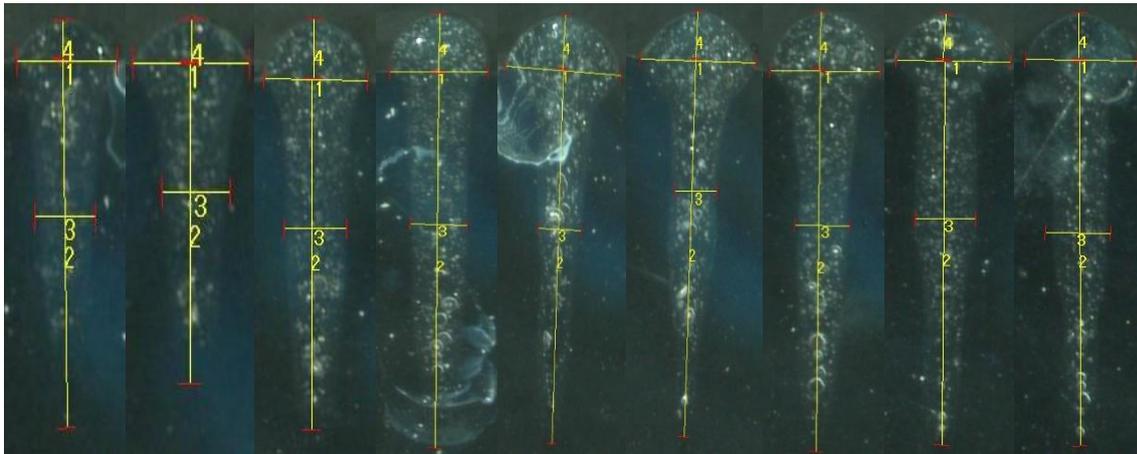


Abbildung 19: Querschliffe Versuchsreihe 40 A

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ET [mm]	2,2	1,85	2,97	4,61	4,37	3,85	4,32	4,15	4,16
NB [mm]	0,53	0,52	0,59	0,62	0,66	0,6	0,65	0,63	0,73
ORB [mm]	0,87	0,89	0,98	1,07	1,77	1,66	1,3	1,2	1,26
NÜ [mm]	0,22	0,25	0,51	0,74	0,65	0,49	0,67	0,5	0,5
P [KW]	1	1	2	3	3	3	3	4	4
FL [mm]	WSO	WSO	WSO	WSO	-2/-5	-5	-2	-4	-5
V [mm/s]	166	166	166	166	166	166	166	250	250

Tabelle 7: Bemaßung der Schlibbilder 40 A

Diese Versuchsreihe wurde mit einer Strahlleistung im Bereich von 1 - 4 kW durchgeführt. Aus der Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die Einschweißtiefe, die Oberraupebreite sowie die Nahtüberhöhung der Versuche von Nr.1 – 4, bei gleicher Fokusslage und Geschwindigkeit, mit zunehmender Strahlleistung kontinuierlich zunehmen. Auffällig ist, dass beim Versuch Nr. 4 eine deutliche Nahtüberhöhung und leicht wellig Humping auftrat, wobei die Einschweißtiefe hier auch am größten ist. Die ET steigt dabei um ca. 109% von 2,2 mm auf 4,61 mm an. In den Versuchen Nr. 5 – 9 wurden mit unterschiedlicher Defokussierung von 5 mm, 2 mm und 4 mm gearbeitet. Ab Versuch Nr. 5 ist die Nahtoberraupe merkliche breiter; nimmt dann aber ab Versuch Nummer 7 etwas ab. Alle Versuche dieser Versuchsreihe zeigen ein gleichmäßiges Aussehen, wobei in den Querschliffen keine Risse gefunden wurden und die Poren nur

vereinzelt zu erkennen sind. Auch im Grundmaterial sind vereinzelte, wenige Poren erkennbar. Die Poren treten bei dieser Versuchsreihe bevorzugt im höheren Leistungsbereich auf.

5.2.2 Versuchsreihe 40 B

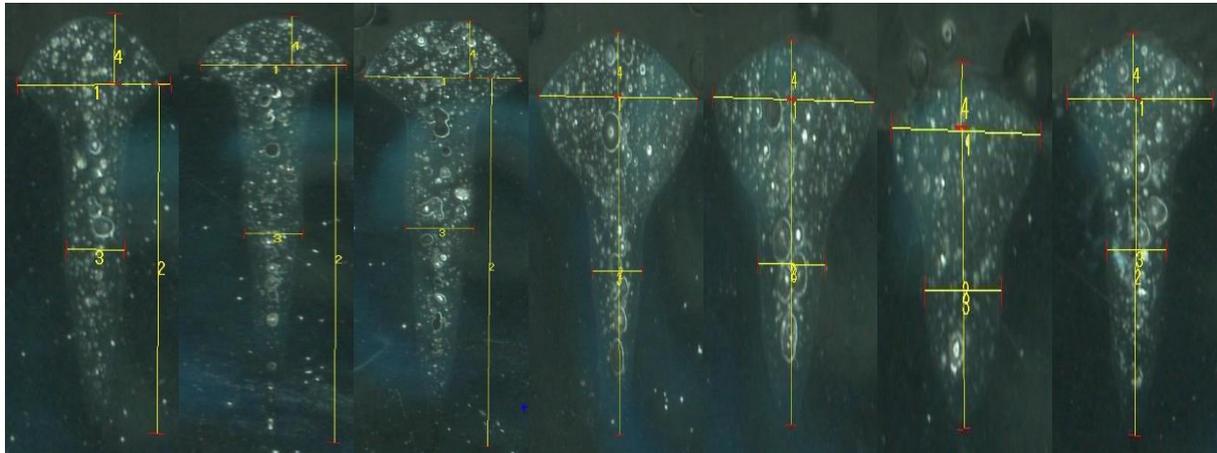


Abbildung 20: Querschliffe Versuchsreihe 40 B

Nr.	1	2	3	4	5	6	7
ET [mm]	3,23	5,92	6,27	3,43	2,44	1,77	2,78
NB [mm]	0,64	0,66	1,07	1,07	1,15	1,01	0,80
ORB [mm]	1,70	1,66	2,45	3,43	2,77	1,96	1,96
NÜ [mm]	0,65	0,78	0,97	0,64	0,45	0,38	0,53
P [KW]	3	4	4	4	3	2	2
FL [mm]	-5	-5	-5	-10	-10	-10	-5
V [mm/s]	166	166	100	100	100	100	100

Tabelle 8: Bemaßung der Schliffbilder 40 B

Im Vergleich zu der Versuchsreihe 40 A weist diese Versuchsreihe viele Poren auf, fast in allen Nähten sind Poren erkennbar. Die Nahtoberrauen aller Versuche haben zwar sehr gutes Aussehen. Auffällig ist aber, dass beim Versuch Nr. 3 eine deutliche Nahtüberhöhung auftritt und beim Versuch Nr. 4 wenige Löcher vorliegen. Ab Versuch Nr. 3 wird die Schweißnaht deutlich flacher und die Oberrauenbreite nimmt stark zu, wohingegen die Einschweißtiefe wesentlich sinkt. Beim Versuch 6 zeigt die Naht sogar kaum noch ein Nahtüberhöhung. Das Querschnittsbild wandelt sich dabei ab Versuch Nr. 3 von nagelförmig zu pilzförmig. Der Maximalwert der Einschweißtiefe ist beim Versuch Nr. 3 zu finden.

5.2.3 Versuchsreihe 41 A

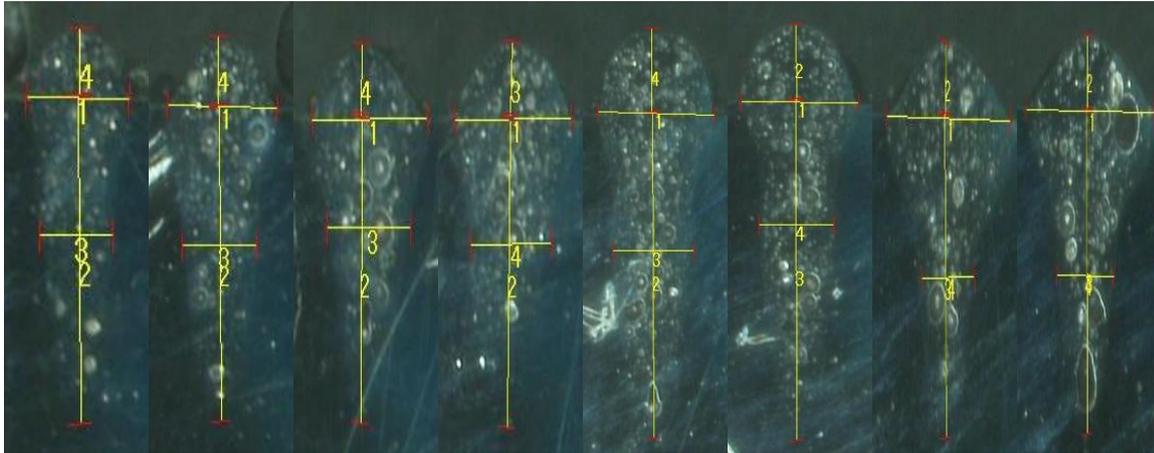


Abbildung 21: Querschliffe Versuchsreihe 41 A

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
ET [mm]	1,72	1,99	1,63	1,80	2,89	3,03	1,98	2,26
NB [mm]	0,52	0,66	0,79	0,79	1,01	0,83	0,80	0,93
ORB [mm]	0,72	0,97	1,09	1,14	1,46	1,29	1,89	2,08
NÜ [mm]	0,35	0,44	0,38	0,43	0,74	0,67	0,44	0,52
P [KW]	1	1	1	1	2	2	2	2
FL [mm]	WSO	WSO	-3	-3	-3	-3	-6	-6
V [mm/s]	166	100	100	83	83	100	100	83

Tabelle 9: Bemaßung der Schlibilder 41 A

Die Versuchsreihe wurde mit Strahlleistung im Bereich von 1 - 2 kW durchgeführt. Anhand der einzelnen Versuche aus Tabelle 9 kann gesagt werden, dass die Einschweißtiefe mit zunehmender Geschwindigkeit merklich abnimmt. Auffällig ist, dass die Einschweißtiefe beim Versuch Nr. 5 und 6 mit einer Defokussierung von 3 mm doppelt so tief war, wie beim Versuch Nr. 7 und 8 mit einer Defokussierung von 6 mm. Ähnlich wie beim Versuch Nr. 2 und Nr. 3 ist zu erkennen, dass die Einschweißtiefe bei einer Defokussierung von 3 mm im Vergleich zur Fokusslage WSO sinkt. Dieses Phänomen ist unnormal, da die Schweißungen mit höher Defokussierung in der Regel höhere Einschweißstiefen haben. Zum Beispiel beim Versuch Nr. 3 liegt die Fokusslage anfangs unter der Werkstückoberfläche. Dadurch soll der Schweißprozess im Gegensatz zur FL: WSO 3 mm tiefer beginnen. Der Grund dafür ist, dass bei einer zu hohen Defokussierung der Fokus der Strahlentaille zu tief im Werkstück liegt, wodurch die Intensität auf der Werkstückoberfläche deutlich sinkt. [26] Da der Laserstrahl entsprechend der hyperbolischen Form propagiert, ist die Leistung zwar unverändert, jedoch vergrößert sich der Strahlenfleckdurchmesser auf der Oberfläche mit steigender Defokussierung. Außerdem zeigt diese Versuchsreihe ein gleichmäßiges Aussehen. Poren sind in allen Nahtbereichen zu erkennen.

5.2.4 Gegenüberstellung der Versuchsreihe 40A, 40B, 41A

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der Leistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokuslage in Bezug auf die Einschweißtiefe und Nahtbreite ausgewertet. Dazu werden einige Parameter mithilfe der Ergebnisse aus den im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Versuchen ausgewählt und gegenübergestellt.

Abhängigkeit der Leistung

Versuchsreihe	ET [mm]	NB [mm]	P [kW]	FL [mm]	V [mm/s]
40A - 1	2,2	0,53	1	WSO	166
40A - 3	2,97	0,59	2		
40A - 4	4,61	0,62	3		
40B - 1	3,23	0,64	3	-5	166
40B - 2	5,92	0,66	4		
40B - 6	1,77	1,01	2	-10	100
40B - 5	2,44	1,15	3		
41A - 4	1,80	0,79	1	-3	83
41A - 5	2,89	1,01	2		

Tabelle 10: Messwerte bei verschiedenen Leistungen

Die Tabelle 10 und Abbildung 22 zeigen die Verläufe der ET in Abhängigkeit der Leistung bei verschiedenen Fokuslagen und Schweißgeschwindigkeiten. Daraus geht hervor, dass die ET mit zunehmender Leistung bei allen Versuchsreihen nahezu linear ansteigt. Bei der Versuchsreihe 40B - 1/2 ist ein markanter Anstieg der ET zu sehen. Die höchste ET wurde dabei mit der Defokussierung von 5 mm bei 4 kW erreicht. Durch den Vergleich mit allen Versuchsreihen lassen sich feststellen, dass weniger Defokussierung einen größeren Anstieg der ET bewirkt, wohingegen bei der Versuchsreihe 40B – 6/5 eine zu hohe Defokussierung von 10 mm einen negativen Einfluss auf ET, sowohl auf am Beginn als auch auf den Anstieg der ET. Wie im Abschnitt 5.2.3 erläutert, dies ist auf eine zu hohe Defokussierung zurückzuführen, da die Intensität wegen der Vergrößerung von Strahlenfleckdurchmesser auf die Werkstückoberfläche sinkt.

Die Auswirkung der Schweißgeschwindigkeit ist in diesem Abschnitt nicht aussagekräftig, da die Anzahl der Versuche zu wenig sind. Generell lässt sich aber sagen, dass die Schweißung mit langsamer Geschwindigkeit in der Regel höhere ET bedingen. Dies ist durch die vorhergehenden Untersuchungen schon bekannt.

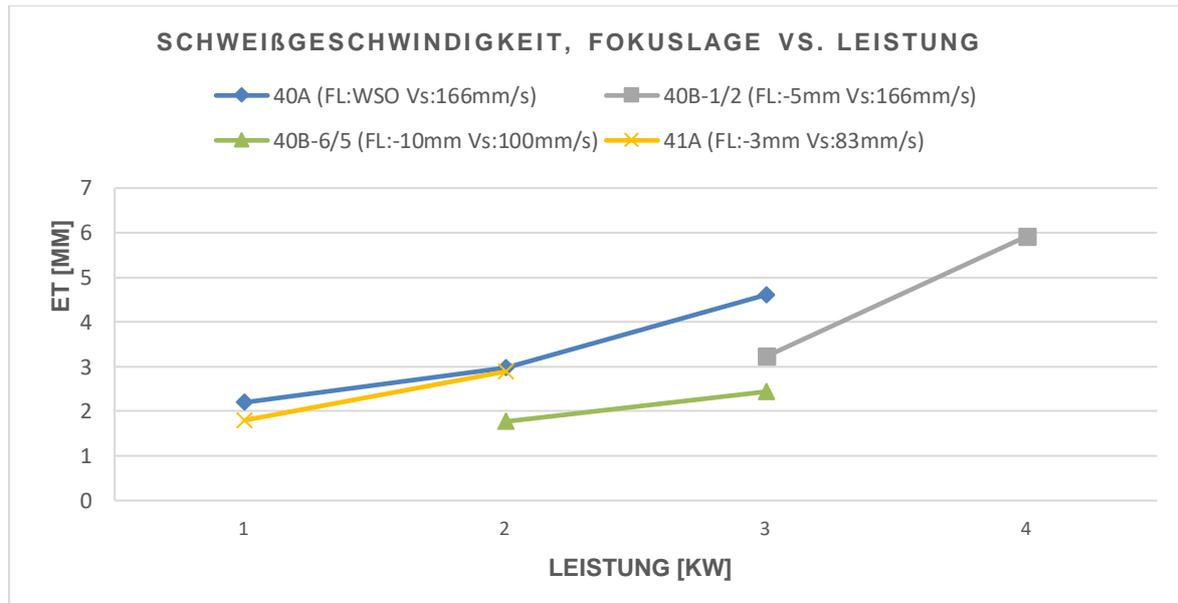


Abbildung 22: ET in Abhängigkeit der Leistung bei verschiedenen Fokusslagen und Geschwindigkeiten

Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit

Versuchsreihe	ET [mm]	NB [mm]	Vs [mm/s]	P [KW]	FL [mm]
40B - 2	5,92	0,66	166	4	-5
40B - 3	6,27	1,07	100		
41A - 1	1,72	0,52	166	1	WSO
41A - 2	1,99	0,66	100		
41A - 3	1,63	0,79	100	1	-3
41A - 4	1,80	0,79	83		
41A - 6	3,03	0,83	100	2	-3
41A - 5	2,89	1,01	83		
41A - 7	1,98	0,80	100	2	-6
41A - 8	2,26	0,93	83		

Tabelle 11: Messwerte bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten

Die Abbildung 23 stellt die ET in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit bei verschiedenen Fokusslagen und Leistung dar. Die ET der Versuchsreihe 40B ist am größten, welche die hohe Leistung zu begründen ist, die Leistung hat dabei eine große Auswirkung auf die ET. Generell lassen sich feststellen, dass die Einschweißtiefe mit zunehmender Geschwindigkeit merklich sinkt, dies ist auf die Streckenenergie ($E = Q/V$) zurückzuführen, da die Leistung gleichgeblieben ist, steigt die Streckenenergie mit sinkender Geschwindigkeit an. Aber tritt bei der Versuchsreihe 41A – 6/5 eine Ausnahme auf, die ET nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu, dies kann einem Messfehler oder dem Spiking-Effekt geschuldet sein. Der Einfluss der Defokussierung ist im diesem Abschnitt aufgrund des Unterschiedes der Leistung bei aller Versuchsreihe nicht aussagekräftig.

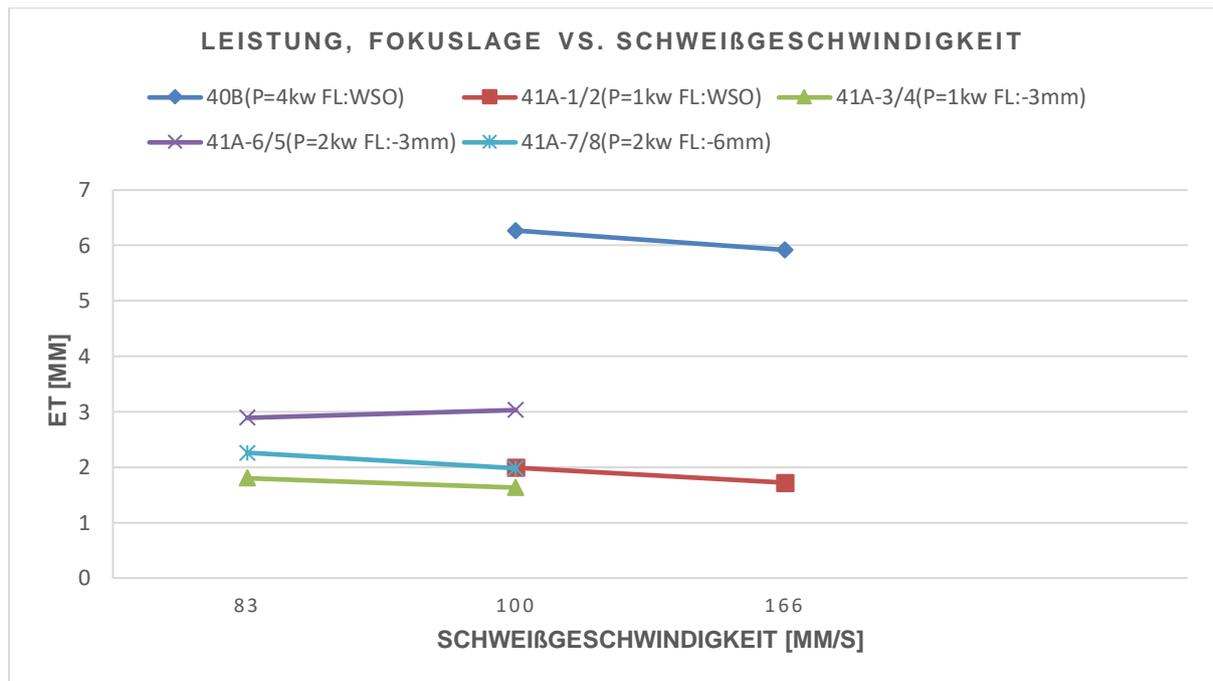


Abbildung 23: ET in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei verschiedenen Fokusslagen und Leistungen

Abhängigkeit der Fokusslage

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Fokusslage bei verschiedenen Leistungen und Schweißgeschwindigkeit diskutiert. Aus der Abbildung 24 ist zu erkennen, dass die ET aller Versuchsreihen, außer 40A(8/9), mit zunehmender Defokussierung deutlich abnimmt. Zu begründen ist dies mit der unter Abschnitt 5.2.3 verwendeten Argumentation.

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Untersuchungen hat die hohe Leistung und eine langsame Schweißgeschwindigkeit eine positive Auswirkung auf die ET. Dies wurde hier durch die Versuchsergebnisse nochmal bestätigt. Im hohen Geschwindigkeitsbereich ist der Anstieg der ET geringfügig. Zu erkennen ist auch, dass der Anstieg der ET stark von der Differenz der Fokusslage zwischen beiden Versuche abhängig ist. Somit lassen sich sagen, umso größer die Differenz der FL ist, umso größer ist der Anstieg der ET.

Versuchsreihe	ET [mm]	NB [mm]	FL [mm]	P [kW]	Vs [mm/s]
40A-4	4,61	0,62	0	3000	166
40A-7	4,32	0,65	-2		
40A-6	3,85	0,60	-5		
40A-8	4,15	0,63	-4	4000	250
40A-9	4,16	0,73	-5		
40B-3	6,27	1,07	-5	4000	100
40B-4	3,43	1,07	-10		
40B-7	2,78	0,80	-5	2000	100
40B-6	1,77	1,01	-10		
41A-6	3,03	0,83	-3		
41A-7	1,98	0,80	-6		
41A-2	1,99	0,66	0	1000	100
41A-3	1,63	0,79	-3		

Tabelle 12: Messwerte bei verschiedenen Defokussierungen

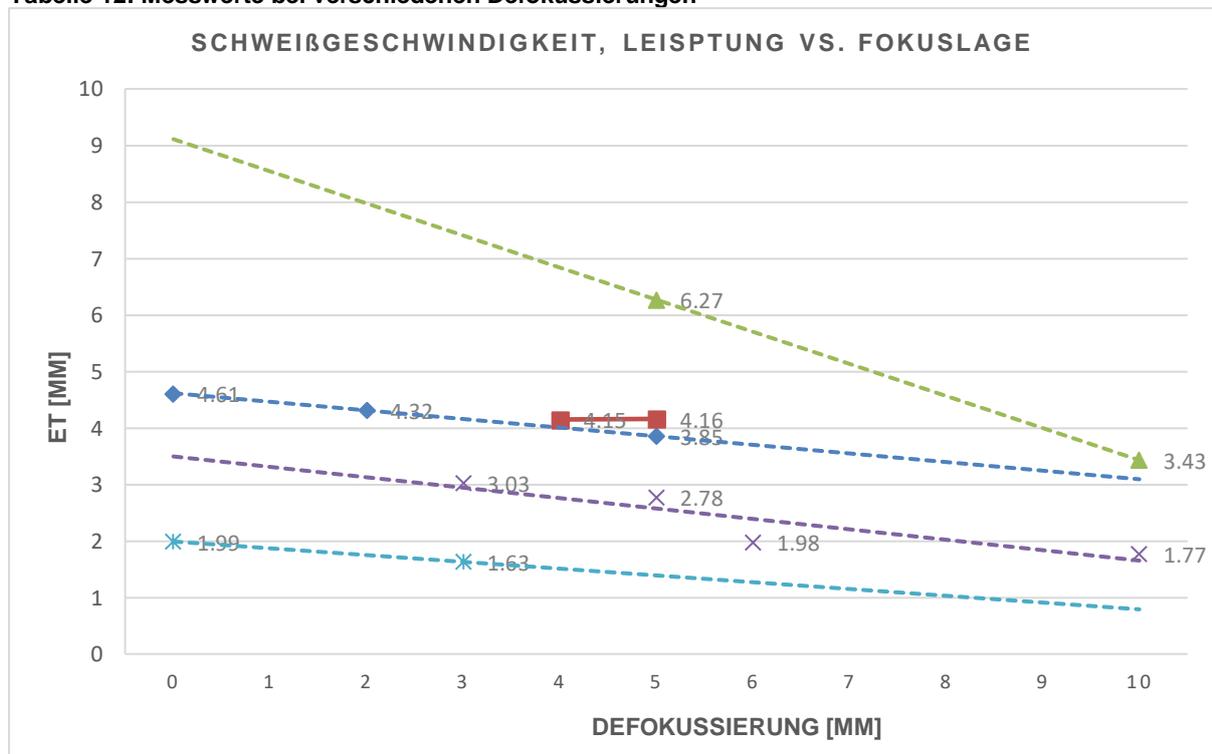


Abbildung 24: ET in Abhängigkeit der FL bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Leistungen

5.3 Zugprüfung

Der Zugversuch hat die Aufgabe Werkstoffkennwerte, wie die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung zu bestimmen. Dabei können auch die Festigkeit des Grundmaterials und die der generierten Schweißnähte untersucht werden. Dieses Verfahren gehört zu einem zerstörenden Prüfverfahren.

Die Zugversuche wurden sowohl an den Proben der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Versuchsreihen als auch an Grundmaterial aus AlSi10Mg nach DIN EN ISO 6892-1 [30] durchgeführt. Alle Proben wurden dabei mit der Zugmaschine „Inspekt retrofit 100kN MFX“ der Firma Hegewalt & Peschke der



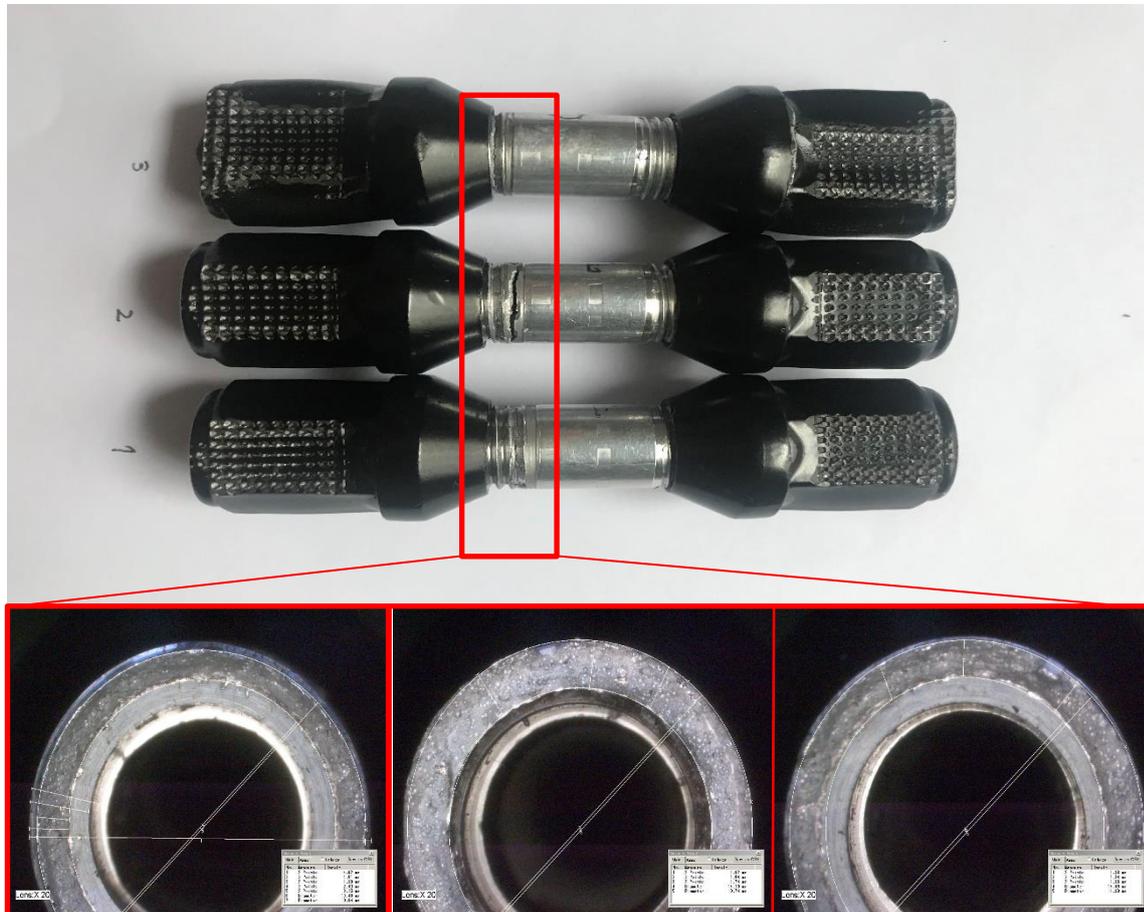
Abbildung 25: Zugmaschine

Hochschule Mittweida bis zum Versagen des Materials bzw. der Schweißnaht gezogen. Abbildung 25 zeigt diese Maschine. Die ermittelten Daten wurden anschließend über eine entsprechende Software ausgewertet.

5.3.1 Dummy-Probe aus AlMgSi1 und AlSi10Mg

Da die Geometrie dieser Proben und somit auch der Querschnitt der Schweißnähte nicht wie nach [30] wie eine typische Zugprobe ausgeprägt waren, sollte auf eine Spannungs-Dehnungs-Messung verzichtet werden. Außerdem waren diese Proben zu klein, so dass nicht direkt mit Feindehnungsmessung gearbeitet werden könnte. Deshalb waren für diese Bauteilprüfung nur die Festigkeit und Bruchlage interessant. Um dennoch aussagekräftig zu sein, wurden die Kräfte und die zurückgelegte Strecke beim Ziehen gemessen und in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgenommen. Dabei wurde die Kraft in eine technische Spannung umgerechnet, wobei die Kraft unabhängig von der Querschnittsänderung auf den Anfangsquerschnitt bezogen wird. Die Querschnittsfläche wurde mit einer Formel $A = \text{Pi}/4(d_a^2 - d_i^2)$ berechnet. Dabei betrug der Außendurchmesser 14 mm und der Innendurchmesser ca. 9,2 mm. In Anlage 3 wird somit das Spannung-Weg-Diagramm dargestellt. Die Graphen zei-

gen die Zugfestigkeit R_m . Die Werte der Zugfestigkeit liegen dabei von ca. 97 – 146 N/mm². Die nachfolgende Abbildung 26 zeigt das Bruchbild und die Rissverläufe auf.



Links: Probe 1(150 ms EIN-Rampe, 2 kW (500ms), 50 ms AUS-Rampe), Mittel: Probe 2 (50 ms EIN-Rampe, 3 kW (500ms), 20 ms AUS-Rampe), rechts: Probe 3 (2 kW Laserleistung)
Abbildung 26: Zugprobepräparation der Dummy-Probe

An allen Proben konnte bei der Begutachtung der Bruchflächen ein grobkristallines, zerklüftetes und körniges Bruchbild festgestellt werden. Dies wies ein typisches, sprödes Bruchverhalten auf. Anhand der Bruchbilder ist zu erkennen, dass sich der Bruch entlang der Schweißnaht ausgebildet hat. Dabei zeigte sich ein senkrechter Anriss in der Schweißnaht. Aufgrund dieser Tatsache, dass alle Proben im Bereich der Schweißnaht gebrochen sind, kann darauf geschlossen, dass die Nähte eine niedrigere Festigkeit als das Grundmaterial sowohl aus AlMgSi1 wie auch aus AlSi10Mg haben, obwohl alle Proben genügend durchgeschweißt wurden. Die mögliche Ursache für ein Reißen direkt in der Naht können die typische Schweißnahtfehler sein, wie beispielweise Poren, Lunker und nichtmetallische Einschlüsse, welche die Naht entsprechend Schwächen und zur Rissinitiation führen.

5.3.2 Grundwerkstoff aus AlSi10Mg

Beim Zugversuch an Grundmaterial aus AlSi10Mg wurde nach Norm DIN 50125 [31] eine Rundprobe mit zylindrischen Probenköpfen (Form A) genommen. Dabei wurde die Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min gezogen. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse aus den Zugversuchen zu finden. Die entsprechenden Spannung-Dehnung-Diagramme sind in Abbildung 27 und 28 dargestellt.

Name	d [mm]	LOH [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
Probe 2	9,97	35	77,91	31489,8	404	259	6,505
Probe 1	9,67	35	73,75	29620,8	402	246	6,850

Tabelle 13: Festigkeitswerte Zugversuch

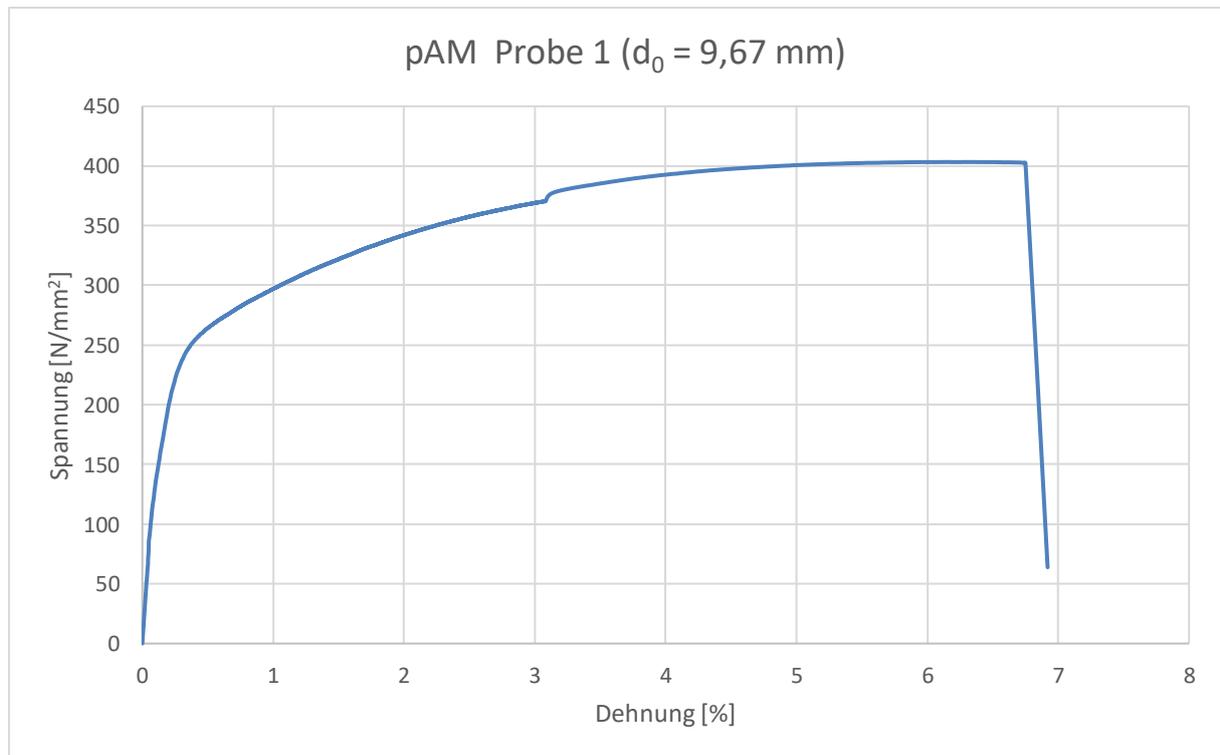


Abbildung 27: Spannungs-Dehnungsdiagramm für AlSi10Mg; Durchmesser = 9,67 mm

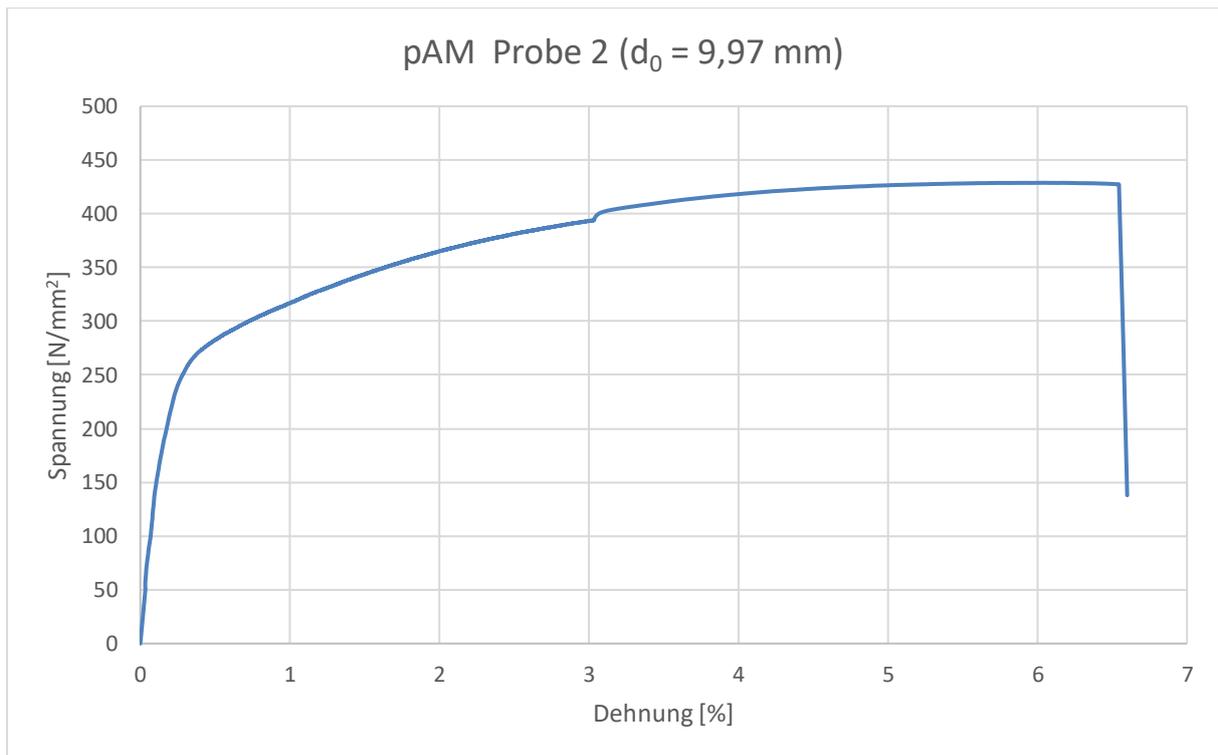


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungsdiagramm für AlSi10Mg; Durchmesser = 9,97 mm

Aus diesem Diagramm lässt sich sagen, dass die Dummy-Proben mit durchschnittlich 128 N/mm^2 nicht die Zugfestigkeiten der SLM-Grundwerkstoffe AlSi10Mg erreicht haben bzw. die Zugfestigkeiten des SLM-Grundwerkstoffes AlSi10Mg fast dreifach so groß ist als bei den Dummy-Proben. Außerdem rissen die Dummy-Proben bei einer wesentlich geringeren Dehnung. Dies könnte, wie Abschnitt 5.3.1, auf die Schweißfehler zurückzuführen sein. Außerdem sind die Querschnitte der Dummy-Probe an Schweißnaht sehr klein (Hohlraum), so dass sie mit geringer Kraft leicht zum Bruch gezogen werden konnten sowie durch den Hohlraum auch eine Kerbwirkung auftreten könnte. Anhand des hierzu erstellten Spannungs-Dehnungs-Diagramms ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes mit zunehmender Querschnittsfläche bzw. Durchmesser ansteigt, wohingegen der Dehnungswert geringfügig sinkt.

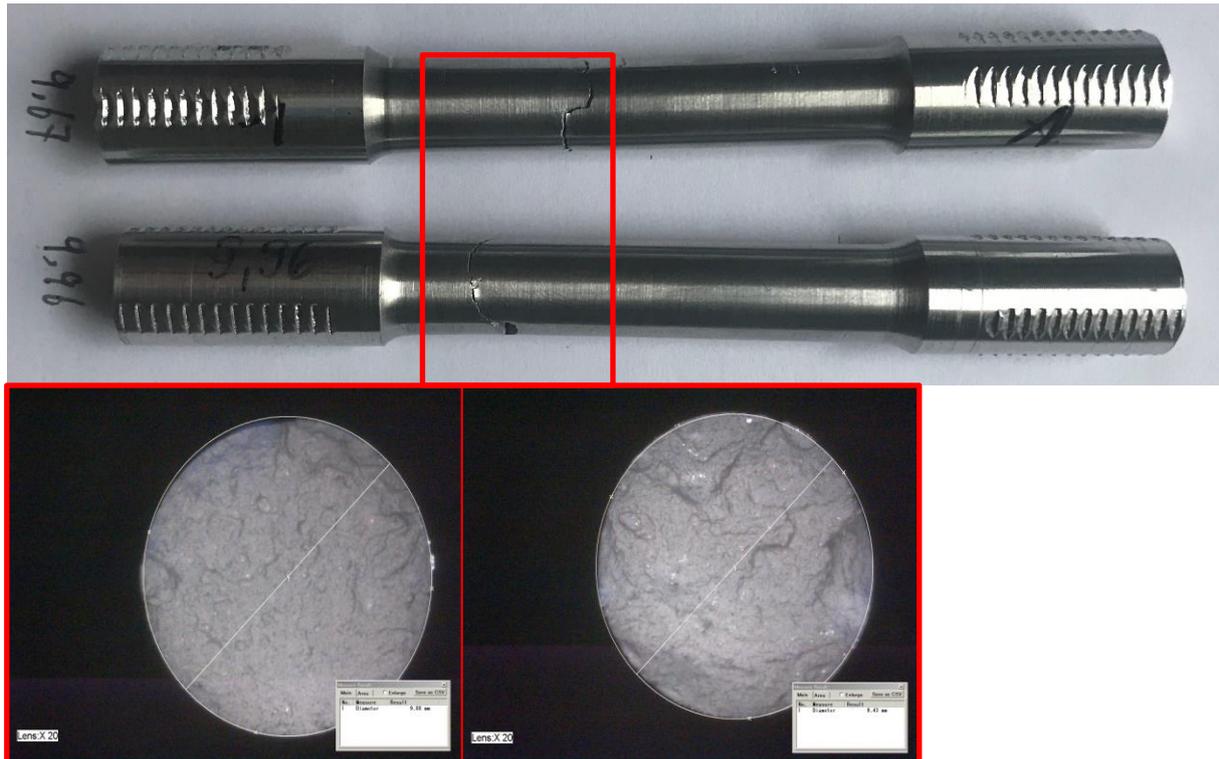


Abbildung 29: Zugprobepreparation der Grundwerkstoffes AISi10Mg

Ähnlich wie bei den Dummy-Proben zeigte sich an dem Grundwerkstoff ein zerklüftetes quasi-sprödes Bruchbild. Im Gegensatz dazu ist das Bruchbild feinkörniger als bei den Dummy-Proben. Auffällig ist, dass der Grundwerkstoff einen diagonalen Bruch aufweist, wohingegen die Dummy-Probe einen senkrechten Bruch zeigte. Dies ist ein typisches Bruchverhalten und es kann darauf geschlossen werden, dass sich die Bruchebene in der Ebene der größten Schubspannung im Metallgitter ausbreitet. Die Bruchebene sollte normalerweise in einem 45 Grad Winkel zur die Belastungsrichtung liegen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde das Schweißverhalten an der durch SLM additiv hergestellte Aluminiumlegierung AlSi10Mg und an Dummy-Teilen aus AlSi10Mg und AlMgSi1 mit einem 10 kW Monomode-Faserlaser untersucht. Ziel dabei war es, die Einflüsse der Leistung, der Geschwindigkeit und Fokusbildung herauszufinden, um bessere Schweißergebnisse zu erzielen. Aus diesem Grund wurden hauptsächlich Blindschweißversuche durchgeführt. Anschließend wurden mit ausgewählten Parametern Stumpfstoßschweißungen an Dummy-Teilen durchgeführt. Ergänzend dazu wurden Zugfestigkeitsuntersuchungen sowohl an den geschweißten Proben als auch an den Grundwerkstoffen durchgeführt, damit sie miteinander verglichen werden konnten. Bei der Bewertung der Schweißergebnisse wurde sich einerseits auf die Nahtgeometrie insbesondere bezüglich der erreichten Einschweißtiefe und andererseits auf die Kennwerte sowie Bruchverhalten aus der Zugprüfung bezogen. Als Fazit werden wesentlichsten Erkenntnisse bzw. Optimierungsmöglichkeiten zum Verbessern des Schweißergebnisses zusammengefasst.

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden der Stand der Schweißtechnik unter Bezugnahme auf die einschlägige Literatur dargestellt und die allgemeinen Randbedingungen für die Schweißversuche definiert, um zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu garantieren. Darüber hinaus waren die Beschreibung der verwendeten Anlage, die Charakterisierung der genutzten Proben sowie Schweißprozessparameter von Bedeutung.

In Verbindung mit den Ergebnissen aus den Blindschweißversuchen lässt sich feststellen, dass eine Steigerung der Leistung zu einer drastisch höheren Einschweißtiefe führt. Dies ist normal, da eine höhere Leistung sowieso eine höhere Intensität der Laserstrahlung bedingt. Außerdem ist dies nach Abschnitt 5.2.4 auf eine höhere Streckenenergie zurückzuführen. Ebenso wurde herausgefunden, dass eine Verringerung der Schweißgeschwindigkeit zwangsläufig zu einer Steigerung der Einschweißtiefe führt. Dies ist auch mit der erhöhten Streckenenergie zu begründen. Zusätzlich ist bei Beobachtung der Schweißnähte und anhand der Schweißparameter zu erkennen, dass die höhere Leistung und langsame Schweißgeschwindigkeit die Entstehung von Poren verstärkt, welche sehr nachteilig für den Einsatz des Laserschweißens bei Fügeverbindungen an additiv hergestelltem Material sind und somit die spröden Schweißnähte verursacht. Im Gegensatz dazu weist das Grundwerkstoff aus

AlSi10Mg wesentlich geringere Poren auf. Somit lässt sich sagen, dass die Porosität hauptsächlich von den Schweißparametern abhängig ist und dieses Aluminiummaterial die Anforderungen für den Laserschweißprozess erfüllt. Die Fokusslage wurde als weitere Parameter untersucht. Dabei wurde in den Schweißversuchen mit verschiedener Defokussierung gearbeitet. Anhand der Ergebnisse lässt sich sagen, dass die Defokussierung bei allen Versuchen zwar eine drastische Verringerung der ET zur Folge hatte, jedoch ist dies wegen der geringen Anzahl von Schweißversuchen nur begrenzt aussagekräftig. Wie Abschnitt 5.2.3 erklärt, ist der Grund für die Vergrößerung des Strahlfleckdurchmessers und somit Verringerung der Intensität der Laserstrahlung auf der WSO. Daher sollten die zukünftigen Versuche das Ziel haben, das beste Ergebnis für das Verhältnis von Leistung zu der Strahlfleckgröße herauszufinden und eine größere Anzahl von Schweißversuchen mit verschiedener Brennweite durchzuführen, da das Ergebnis auch von der Brennweite und der Rayleighlänge abhängig ist. Wie Abschnitt 3.2.2 erläutert, ist innerhalb der Rayleighlänge die Laserstrahlung gute Parallelität bzw. geringe Divergenz und somit eine gute Qualität. Außerdem wäre es empfehlenswert, die Beziehung zwischen diesem Verhältnis und der Plasmaabschirmung zu untersuchen. Dennoch hat die Defokussierung eine positive Auswirkung auf die Nahtbreite und das Aussehen von Nahtberraupe.

Zum Abschluss wurde mittels der Zugprüfung nachgewiesen, dass die erzeugte Mischverbindung aus stranggepresstem Rohrmaterial AlMgSi1 und SLM additiv hergestelltem Material aus AlSi10Mg eine wesentliche geringere Zugfestigkeit als der Grundwerkstoffe aus AlSi10Mg besitzt und ein sprödes Bruchverhalten aufweist. Dies ist neben den Schweißfehlern, wie Poren, hauptsächlich auf die ungünstige Gestaltung bzw. Konstruktion des Bauteiles zurückzuführen, da die Dummy-Rohr-Probe eine Bohrung hat. Dies begünstigt eine örtliche Spannungskonzentrationen und Kerbwirkung. Somit besitzen sie eine geringere Zugfestigkeit. In Folgeversuchen sollte diese Gestaltung geändert werden und alle konstruktiv bedingten äußeren Kerben berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN Norm 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.
- [2] Alfred Herbert Fritz.: Fertigungstechnik: Bedeutung der Schweißtechnik. 12. Auflage. Berlin: Springer, 2018.
- [3] J. Ruge.: Handbuch der Schweißtechnik: Begriff der Schweißbarkeit. Bd.1: Werkstoffe. 3.Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer, 1991.
- [4] Schwind, Sascha: Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit einem 3 kW Monomode Faserlaser, Masterarbeit, LHM, 2013.
- [5] Exner, Horst: Begleitheft zur Vorlesung Laserbearbeitung: Für den Studiengang Maschinenbau, Mittweida, 2011.
- [6] Hans Albert Richard, Britta Schramm, Thomas Zipsner.: Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer, 2017. - ISBN 978-3-658-17780-5 (eBook).
- [7] Silvia: Meilensteine aus der Geschichte des Lasers. Axel Springer SE, veröffentlicht am 16.05.2010.-URL: https://www.welt.de/welt_print/wissen/article7649341/Meilensteine-aus-der-Geschichte-des-Lasers.html, verfügbar am 20.01.2022.
- [8] N.N.: Laser Metal Fusion: Vorteile, Funktionsprinzipen und Anwendungen der additiven Technologie. Mitteilung der Fa. TRUMPF GmbH. – URL: https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion/, verfügbar am 20.01.2022.
- [9] Exner, Horst: Begleitheft zur Vorlesung Lasergerätetechnik: Für den Studiengang Maschinenbau, Mittweida, 2011.
- [10] N.N.: Wieso Laserschweißen. Mitteilung der Fa. TRUMPF GmbH. – URL: https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/maschinen-systeme/laserschweissanlagen-und-lichtbogenschweisszelle/laserschweissen/wieso-laserschweissen, verfügbar am 24,01,2022.
- [11] Micheal Grupp: Strahlquelle: Der Faserlaser als Werkzeug in der Materialbearbeitung Effizient, brillant und wirtschaftlich. Mitteilung der Fa. IPG Laser GmbH. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/latj.200790094>, verfügbar am 30,01,2022.
- [12] Helmut Hügel, Thomas Graf.: Laser in der Fertigung. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. - ISBN 978-3-8351-0005-3.
- [13] Ulrich Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [14] Dr.-Ing. Detlef Breitling.: Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2010. - ISBN 978-3-8316-0960-4.

- [15] Brett Thompson.: What makes the laser metal fabrication's indispensable tool. The Fabricator. – URL: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/what-makes-the-laser-metal-fabrication-s-indispensable-tool>, verfügbar am 04.02.2022.
- [16] N.N.: Laserschweißen: Ein Schwerpunkt bei BBW Lasertechnik: Abbildung 1: Schemadarstellung vom Wärmeleitungsschweißen. Die Intensität der Laserstrahlung schmilzt nur oberflächennahe Materialbereiche auf. Fa. BBW Lasertechnik GmbH, veröffentlicht am 19.11.2020. – URL: <https://www.bbw-lasertechnik.de/blog-article/laserstrahlschweissen-ein-schwerpunkt-bei-bbw-lasertechnik/>, verfügbar am 10.02.2022.
- [17] Stefan Jakobs, Uwe Reisgen.: Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik Laserstrahlschweißen im Vakuum: Abbildung 2 Einkopplungsverhalten und Tiefschweißen. RWTH- Aachen University. -URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/stab.201510306>, verfügbar am 10.02.2022.
- [18] Beyer Eckhard.: Schweißen mit Laser. 1.Auflage. Berlin: Springer, 1995.
- [19] N.N.: Wärmeleitungsschweißen. Fa. TRUMPF GmbH. - URL: https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/laserschweissen/waermeleitungsschweissen/, verfügbar am 11.02.2022.
- [20] N.N.: Tiefschweißen. Fa. TRUMPF GmbH. – URL: https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/laserschweissen/tiefschweissen/, verfügbar am 11.02.2022.
- [21] Jürgen Rapp.: Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau. Fachmedien Wiesbaden: Springer, 1996. - ISBN 978-3-663-12209-8 (e-Book).
- [22] Gref, Wolfgang.: Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik. Dissertation, Stuttgart: Herbert Utz Verlag, 2005.
- [23] Hans-Jürgen Bargel.: Werkstoffkunde. 9. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-29250-0 (eBook).
- [24] IPG Photonics.: Benutzerhandbuch, Ytterbium Laser System, YLS10000-SM, SN – 15048851, 2015.
- [25] Tim Langer.: Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit 10 kW Faserlaser an gegossenem AlSi10Mg, Diplomarbeit, Mittweida, 2021.
- [26] Florian Hüttinger.: Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen an AlSi12 mit einem 10 kW Singlemode Faserlaser zur Optimierung des Schweißergebnisses, Bachelorarbeit, Mittweida, 2018.

- [27] N.N.: Materialdatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Fa. 3D-Laserdruck GmbH. – URL: https://www.3d-laserdruck.de/files/my_files/pdf/downloads/datenblaetter/3D-Laserdruck_Materialdatenblatt_AlSi10Mg.pdf, verfügbar am 09.04.2022.
- [28] N.N.: AlMgSi – Aluminium-Magnesium-Silicium-Legierungen. Fa. Alufritze. – URL: <https://www.alufritze.de/info/aluminiumlegierung-almgsi0-5.html>, verfügbar am 09.04.2022.
- [29] N.N.: EN AW-6082 (AlMgSi1 – 3.2315). Fa. Batz-Burgel. – URL: <https://batz-burgel.com/metallhandel/lieferant-aluminium/en-aw-6082/>, verfügbar am 9,4,2022
- [30] Norm DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- [31] Norm DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugprobe



rauleder

aluminiumsandguß

Umschmelz-Legierung	Bezeichnung nach DIN 1725	Bezeichnung Euro Norm	Kurzbezeichnung							
	G-ALSi10Mg G-ALSi10MgT6	3.2381.01 3.2381.61 EN-AC-43000	239 239T6							
Zusammensetzung Massenanteile in %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	ZN %	Ti %	Ni %	Sn %	PB
	9 - 11	0,5	0,05	0,001 - 0,4	0,2 - 0,5	0,1	0,15	max. 0,05 %	max. 0,05 %	max. 0,05 %
Festigkeitswerte	Streckgrenze Rp 0,2 N/mm ²	Zugfestigkeit RM N/mm ²	Bruchdehnung A %	Brimelhärte HB 5/250 - 30	Biegewechsel- Festigkeit BW N/mm ²					
239 239 T6	80 - 110 180 - 260	160 - 210 220 - 320	2 - 6 1 - 4	50 - 60 80 - 110	50 - 70 70 - 100					
Physikalische Eigenschaften	Dichte kg/dm ³	Elastizitätsmodul KN/mm ²	Wärmeausdehnung Koeffizient 1/K x 10 - 6	Wärmeleitfähigkeit $\frac{W}{K \times M}$	Elektrische Leitfähigkeit $\frac{m}{Ohm \times mm^2}$	Lineares Schwindmaß %				
	2,65	74	22	1,3 - 1,9	17,26	1,0 - 1,2				
Werkstoffeigen- schaften	Beständigkeit gegen Witterung	Beständigkeit gegen Seewasser	Bearbeitung Spanbarkeit	Bearbeitung Schweißbarkeit	Oberflächen mechanische Polierbarkeit	Oberflächen Dekorative anodische Ox.				
	sehr gut	gut	sehr gut	ausgezeichnet	gut	nicht angewandt				
Hinweise für die	allgemeine Eigenschaften	Verwendung	Anwendung							
	Nahutekische Legierung, mit sehr guten Gleiteigenschaften	Formschwierige, dünn- wandige, druckdichte, schwingungsste- schlagbeanspruchte Güßteile	Geräte-, Maschinen-, Fahrzeug-, Schiffs- und Apparatebau; Gehäuse; Saugrohre; Flügelränder							T6 = wärmegehärtet ta = teilausegehärtet g = gegläht und abgeschreckt

TECHNISCHES DATENBLATT

Rev.
V05/
5-16
DE



1 / 1

m4p AlSi10Mg

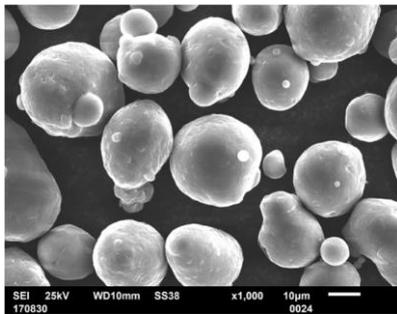
Metallpulver für das laserbasierte Pulverbettverfahren

Beschreibung und Eigenschaften

m4p™ AlSi10Mg stellt eine Aluminiumbasislegierung dar, die aufgrund des Si- und Mg-Gehaltes eine gute **Schweißbarkeit** aufweist. In der regulären gießtechnischen Verarbeitung zeichnet sich die Legierung durch ihre ausgezeichneten Gießeigenschaften aus und ermöglicht die Herstellung dünnwandiger Bauteile mit guten **Festigkeitseigenschaften**.

Bauteile aus m4p™ AlSi10Mg weisen gute mechanische Festigkeiten auf und können nachträglich maschinell bearbeitet werden. Eine **Wärmebehandlung** entsprechend dem T6 Zyklus ist anwendbar.

Pulverkenngrößen



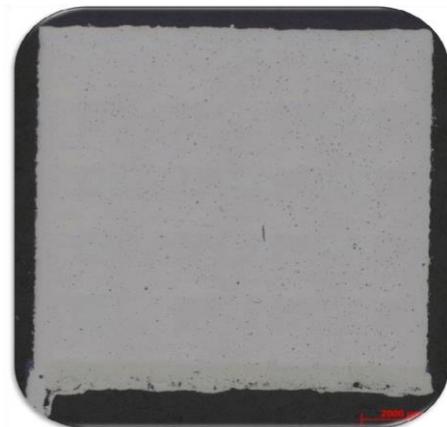
Chemische Richtanalyse [Gew. %]

Element	Min	Max
S	9,00	11,00
Mg	0,20	0,45
Al	Basis	

Korngröße Laser PBF

Füllichte ~1,4 g/cm³

Additive Fertigung und Festigkeitseigenschaften



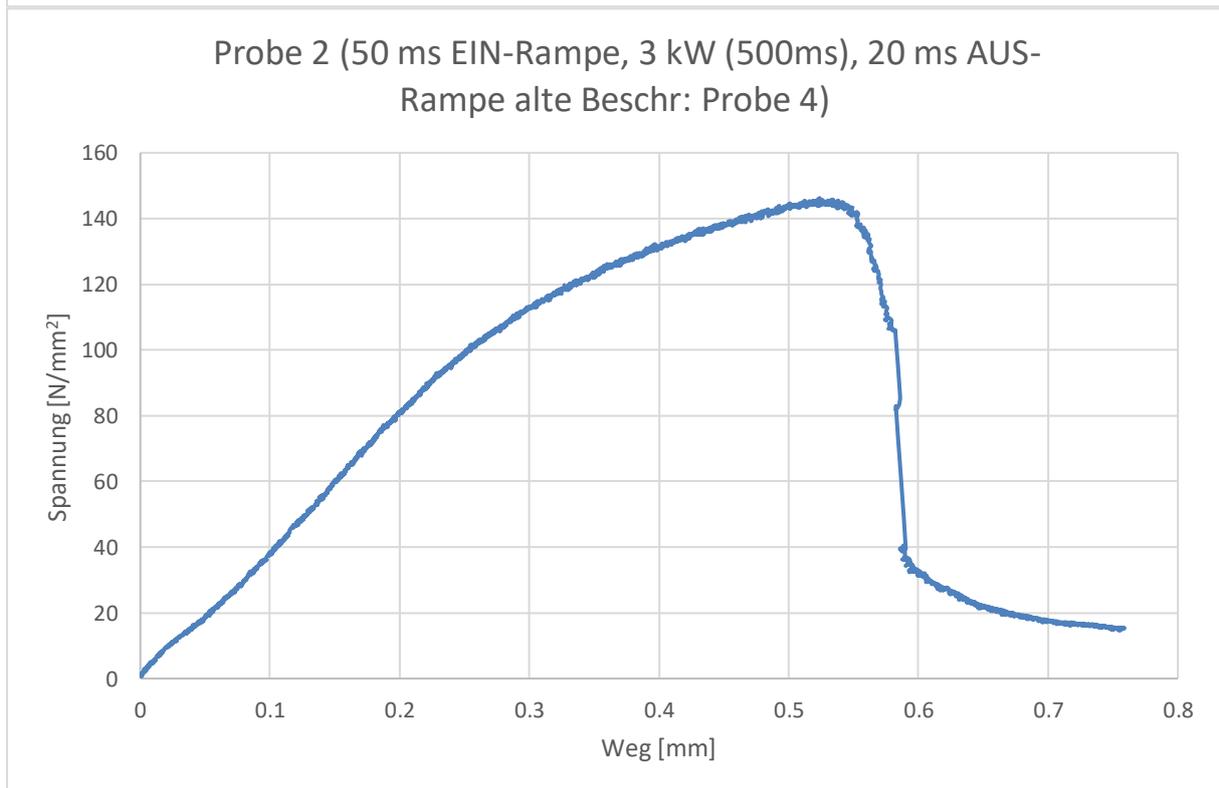
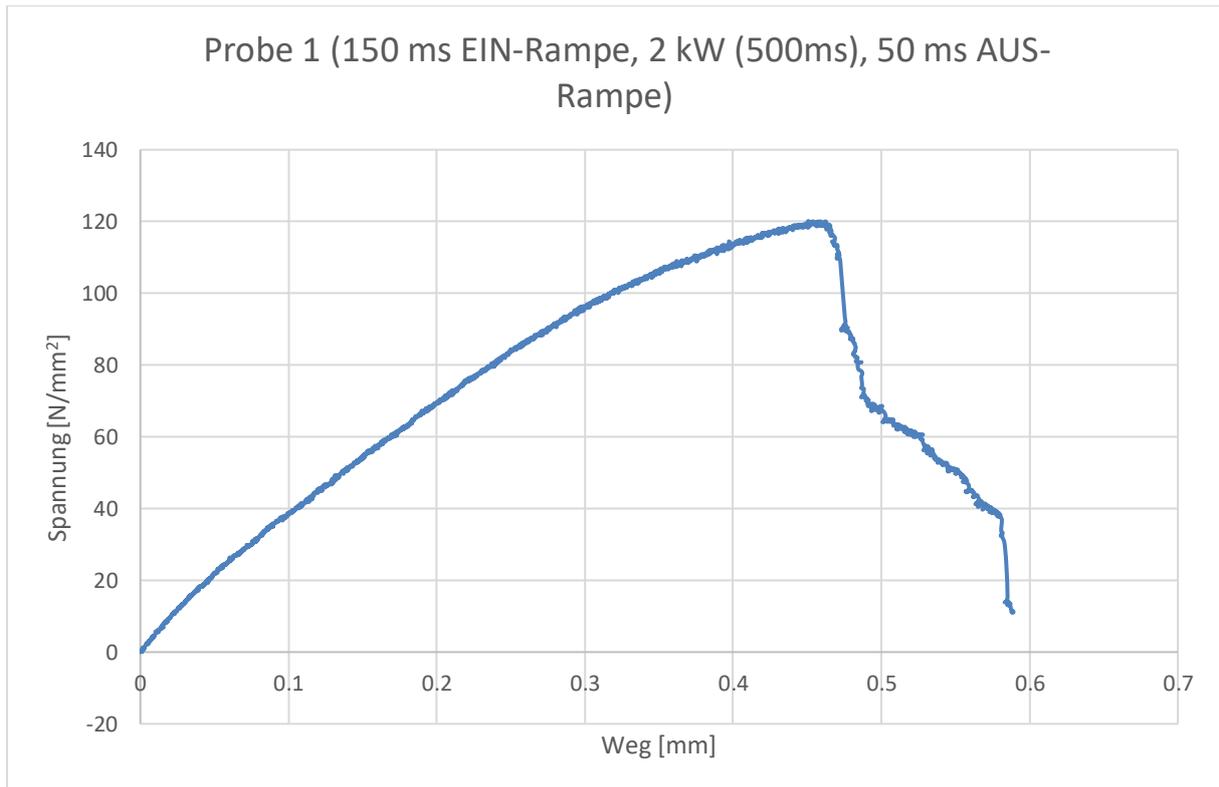
99,76%

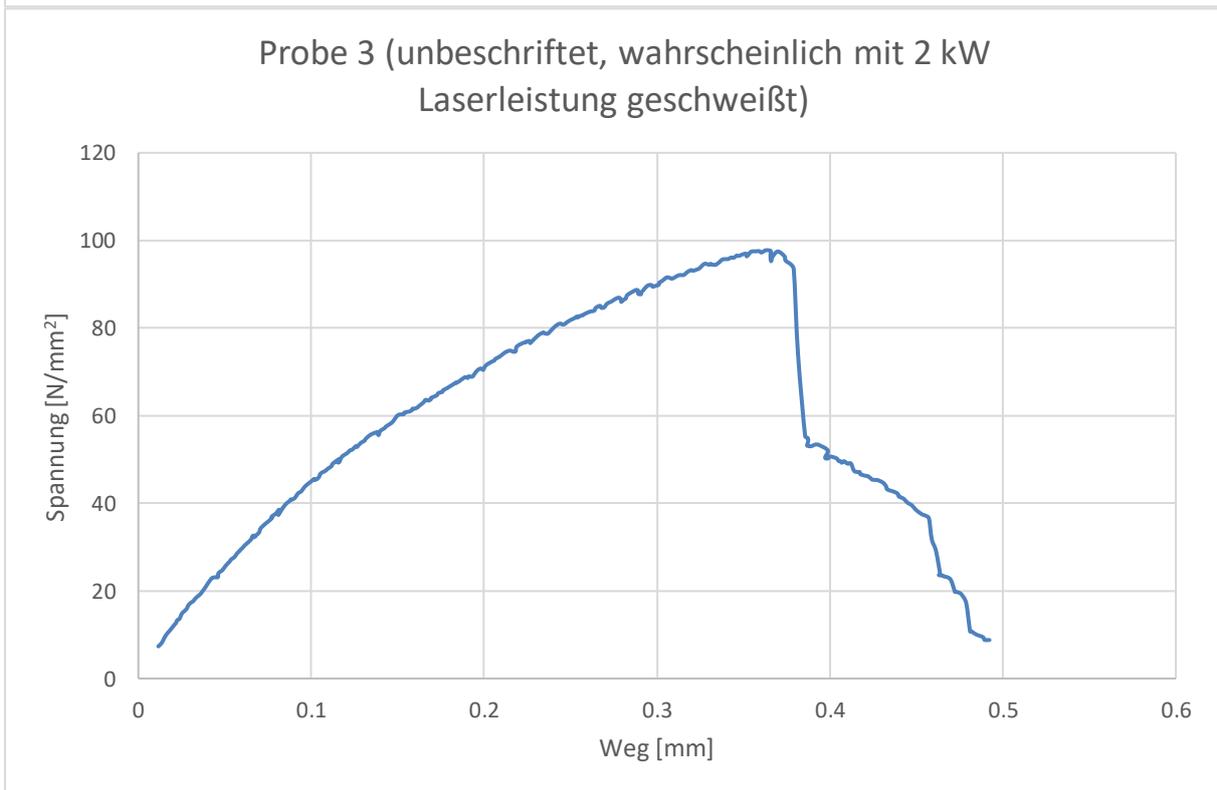
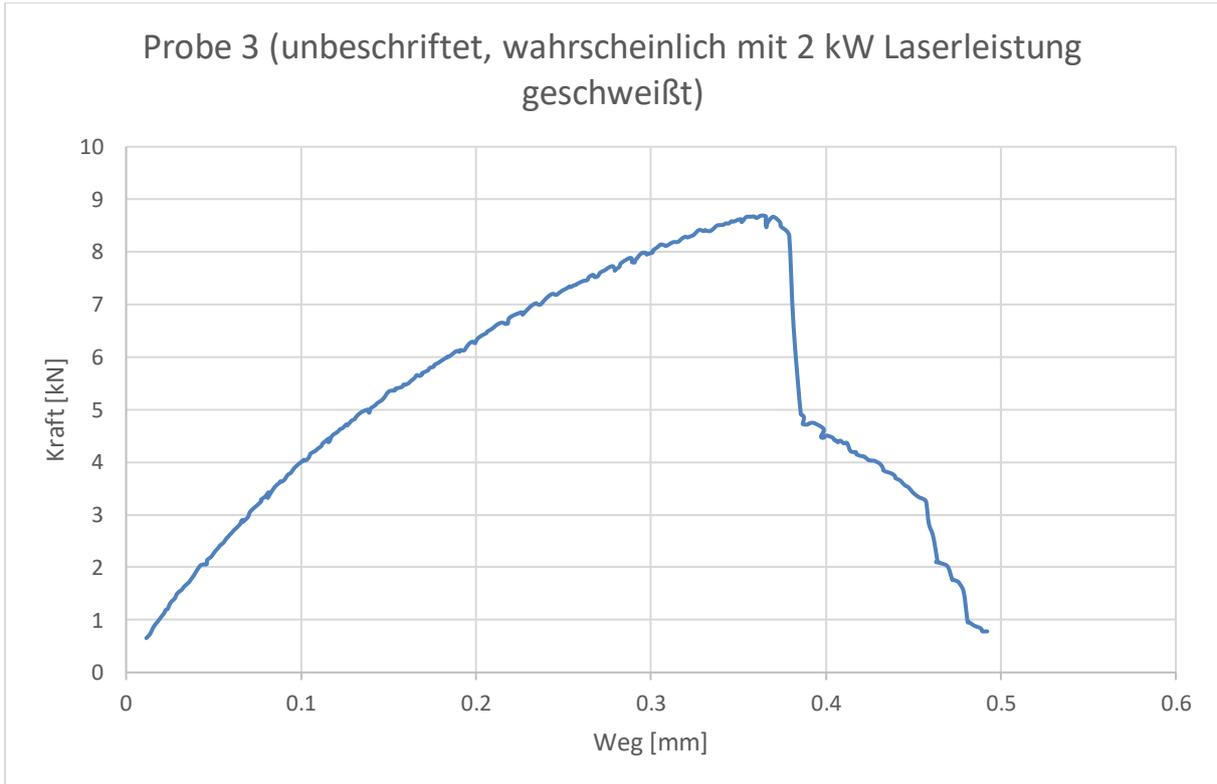
Typische Kennwerte vom Zugversuch

(Bauteildichte: 2,67g/cm³, wie gebauter Zustand)

Zugfestigkeit	R_m =	400 ± 5 N/mm ²
Streckgrenze	R_e =	239 ± 4 N/mm ²
Bruchdehnung	A =	7 ± 3%

Am **Probeklotz** „10x10x10mm“ metallographisch bestimmte Dichte:





Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 12. Juli 2022

Zhang Jinglin