



BACHELORARBEIT

Herr
Gan Liu

**Untersuchung zum Einfluss
der Laserspotgröße beim
Blindnahtschweißen an additiv
hergestelltem und Guss-Material
aus AlSi10Mg**

Mittweida 2021

Inhalt

Inhalt	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Diagrammverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Aufgabenstellung	2
2. Grundlagen	4
2.1. Lasermaterialbearbeitung	4
2.2. Laserstrahlschweißen vom Aluminium	4
2.3. Tiefschweißen	5
2.4. Materialeigenschaften vom AlSi10Mg	5
2.5. Gegenüberstellung der Materialeigenschaft von pAM- und konventionell (MM)	7
hergestelltem AlSi10Mg	7
2.6. Probleme beim Aluminiumschweißen und Optimierungsmöglichkeiten	11
3. Versuchsvorbereitungen	13
3.1. Versuchsaufbau	13
3.1.1. Strahlquelle	15
3.1.2. Bearbeitungsoptik	15
3.1.3. Cross- Jet	16
3.1.4. Absaugung	16
3.1.5. Spannvorrichtung	17
3.2. Bestimmung der Spotgröße	17
4. Auswertungen	19
4.1. Auswertungsübersicht der Schweißversuche	19
4.2. Ergebnisse am AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten	22
4.3. Schweißergebnisse von AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material mit verschiedener Fokuslage (Defokussierung)	28
4.3.1. Beim AlSi10Mg-Guss	29
4.3.2. Beim pAM-AlSi10Mg Material	34
4.4. Vergleich der Versuchsergebnisse bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material.	39
4.4.1. Vergleich der Ergebnisse mit Fokuslage: WSO	40

4.4.2. Vergleich der Ergebnisse mit Fokusslage: - 6 mm.....	45
4.5. Vergleich der Schweißergebnisse an AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material für verschiedene Brennweiten	50
4.5.1. Ergebnisse beim pAM-AlSi10Mg Material	51
4.5.2. Ergebnisse beim AlSi10Mg-Guss	55
5. Zusammenfassung.....	60
Anhang - Experimentelle Ergebnisse	64
Literaturverzeichnis	88
Selbstständigkeitserklärung	91

Abkürzungsverzeichnis

ET	...	Einschweißtiefe
OB	...	Oberraupenbreite
OH	...	Oberraupenhöhe
NB	...	Nahtbreite
F1000	...	Brennweite der Optik, hier $f = 1000$ mm
F1500	...	Brennweite der Optik, hier $f = 1500$ mm
k.A.	...	keine Angabe
MM	...	mechanisch hergestelltes Material
pAM	...	pulverbasiert additiv hergestellt
SPP	...	Strahlparameterprodukt
vs.	...	in Abhängigkeit von...
abh.	...	in Abhängigkeit von...
FL	...	Fokuslage
WSO	...	Werkstückoberfläche
o.ä.	...	oder Ähnliche
u.a.	...	unter anderem
ca.	...	circa

Physikalische Größen

P_L [kW]	...	Laserstrahlleistung
v_s [m/min]	...	Schweißgeschwindigkeit
Θ [°]	...	Halber Öffnungswinkel des Laserstrahl
ω_0 [mm]	...	Tailen-Radius des Laserstrahls an seiner dünnsten Stelle, halber Fokus-Durchmesser
M^2	...	Beugungsmaßzahl
λ [μm]	...	Wellenlänge

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AlSi10Mg-Guss).....	25
Diagramm 2 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AlSi10Mg-Guss).....	25
Diagramm 3 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AlSi10Mg-Guss).....	26
Diagramm 4 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AlSi10Mg-Guss).....	26
Diagramm 5 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss).....	31
Diagramm 6 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss).....	31
Diagramm 7 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss).....	32
Diagramm 8 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss).....	32
Diagramm 9 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AlSi10Mg).....	36
Diagramm 10 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AlSi10Mg).....	36
Diagramm 11 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AlSi10Mg).....	37
Diagramm 12 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AlSi10Mg).....	37
Diagramm 13 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO).....	42
Diagramm 14 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO).....	42
Diagramm 15 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO).....	43
Diagramm 16 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO).....	43
Diagramm 17 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)	47

Diagramm 18 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)	47
Diagramm 19 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)	48
Diagramm 20 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)	48
Diagramm 21 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg).....	53
Diagramm 22 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg).....	53
Diagramm 23 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg).....	54
Diagramm 24 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg).....	54
Diagramm 25 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AISi10Mg-Guss).....	57
Diagramm 26 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AISi10Mg-Guss).....	57
Diagramm 27 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AISi10Mg-Guss).....	58
Diagramm 28 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AISi10Mg-Guss).....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mechanische Eigenschaften von SLM- Bauteilen und Gussteilen [22][23][24]	8
Tabelle 2 Mögliche Probleme und Lösungen.....	11
Tabelle 3 Komponenten Tabelle.....	14
Tabelle 4 Ermittelte Strahlparameter für unterschiedliche optische Systeme (Brennweiten)	18
Tabelle 5 Schweißversuchs an AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserstrahlleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten bei der Brennweite F1000.....	19
Tabelle 6 Schweißversuche an AlSi10Mg-Guss und pAM mit verschiedener Fokusslage	20
Tabelle 7 Versuche zum Vergleich bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss- und pAM-AlSi10Mg Material.....	20
Tabelle 8 Versuche zu Vergleich der Schweißergebnisse mit verschiedenen Brennweiten an Guss und pAM-AlSi10Mg Material	21
Tabelle 5 Schweißversuchs an AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserstrahlleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten bei der Brennweite F1000.....	22
Tabelle 6 Schweißversuche an AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material mit verschiedener Fokusslage	28
Tabelle 7 Versuche zum Vergleich bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material.....	39
Tabelle 8 Versuche zu Vergleich der Schweißergebnisse mit verschiedenen Brennweiten an pAM-AlSi10Mg Material.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorzüge der Laser beim Schweißen.....	1
Abbildung 2	Schweißnaht; geschweißt mit PL = 10 kW, 33 mm/s, FL: - 6 mm	2
Abbildung 3	Am Tiefschweißprozess beteiligte Größen [7].....	5
Abbildung 4	Chemische Zusammensetzung der AlSi10Mg-Legierung [9]	6
Abbildung 5	Zugversuch Richtungen der Probe [22]	7
Abbildung 6	REM-Aufnahme eines AlSi10Mg SLM-Teils, die die mit Si-Phase dekorierten Al-Matrixzellen zeigt [22]	9
Abbildung 7	Bruchflächen von Zugproben XY- (links), Z-Richtung (rechts) [22]	9
Abbildung 8	<i>Die Mikrostruktur in SLM AlSi10Mg- Legierung [26].</i>	10
Abbildung 9	Versuchsaufbau (oberer Teil)	14
Abbildung 10	Versuchsaufbau (unterer Teil)	14
Abbildung 11	Ytterbium Faserlaser YLS-10000- SM	15
Abbildung 12	Schweißkopfsystem YW50	16
Abbildung 13	Schweißnahtoberraupen bei unterschiedliche Strahlleistung für Optik F1000	22
Abbildung 15	Querschliff und Prozessparameter: PL: 7 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss.....	23
Abbildung 16	Querschliff und Prozessparameter: PL: 9 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss.....	23
Abbildung 17	Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss.....	24
Abbildung 18	Schweißnahtoberraupen bei unterschiedliche FL für AlSi10Mg-Guss.....	29
Abbildung 19	Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss.....	30
Abbildung 20	Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, AlSi10Mg-Guss.....	30
Abbildung 21	Schweißnahtoberraupen bei unterschiedliche FL für pAM-AlSi10Mg Material	34
Abbildung 22	Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, pAM-AlSi10Mg Material	35
Abbildung 23	Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, pAM-AlSi10Mg Material	35

Abbildung 24 Schweißnahtoberräumen bei unterschiedlichem Material für FL: WSO	40
Abbildung 25 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss	41
Abbildung 26 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, pAM-AlSi10Mg Material	41
Abbildung 27 Schweißnahtoberräumen bei unterschiedlichem Material für FL: - 6 mm	45
Abbildung 28 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, AlSi10Mg-Guss	46
Abbildung 29 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, pAM-AlSi10Mg Material	46
Abbildung 30 Schweißnahtoberräumen bei unterschiedlichen Brennweiten für pAM-AlSi10Mg Material	51
Abbildung 31 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO, pAM-AlSi10Mg Material	52
Abbildung 32 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1500, FL: WSO, pAM-AlSi10Mg-Material	52
Abbildung 33 Schweißnahtoberräumen bei unterschiedlichen Brennweiten für AlSi10Mg-Guss	55
Abbildung 34 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, AlSi10Mg-Guss	56
Abbildung 35 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1500, FL: - 6 mm = 1566 mm, AlSi10Mg-Guss [40]	56

1. Einleitung

1.1.Motivation

Laserschweißen ist ein innovatives Verfahren zum Fügen von Metallen und Kunststoffen. Aufgrund der umfangreichen Vorzüge gegenüber den konventionellen Fügeverfahren ist das Laserschweißen zu einer unverzichtbaren Basistechnologie auf dem Gebiet der Schweißtechnik geworden. So ermöglicht die Laserstrahlung das berührungslose Fügen der unterschiedlichsten Werkstoffe mit einer geringen thermischen Beeinflussung des Materials. Der Schweißvorgang erfolgt mit hohen Schweißgeschwindigkeiten und ein hoher Automatisierungsgrad garantiert die Fertigung toleranzgenauer Schweißnähte. Daher wird das Laserschweißen im Automobilbau und Karosseriebau verwendet. Aber auch in den Bereichen der Medizin, der Sicherheit und Umwelt oder der Biotechnologie ist die Lasertechnologie nicht zu ersetzen.

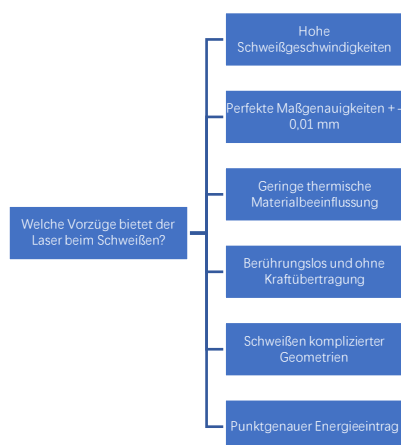


Abbildung 1 Vorzüge der Laser beim Schweißen

Aluminium ist das nach dem Stahl am häufigsten eingesetzten Metall. Vorteile der Aluminiumwerkstoffe sind das geringe Gewicht, günstige Festigkeits- und Verformungseigenschaften, der hohe Korrosionswiderstand sowie die hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Beim Laserschweißen ergeben sich aber vielfach Schwierigkeiten. Einerseits aus werkstofflicher Sicht, da die hochschmelzende Oxidschicht die Schwierigkeit des Laserschweißens erhöht. Die Neigung zur Riss- oder Porenbildung sind höher als bei anderen Werkstoffen. Aber auch aus physikalischer Sicht, weil die starke Warmableitung und der geringe Absorptionsgrad (Nd:YAG Laser: 5%) die Steuerung der Schweißergebnisse erschwert [1]. Hierzu sind hohe Leistungen, Strahlenqualitäten und Schweiß-

geschwindigkeiten und somit ein hoher technischer Standard notwendig, um diese Probleme zu umgehen.

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Blindschweißuntersuchungen an Aluminium Proben durchgeführt, welche auf eine maximale Einschweißtiefe und eine hohe Schweißnahtqualität abzielen.

1.2.Aufgabenstellung

In der Bachelorarbeit soll ein am Laserinstitut der Hochschule Mittweida vorhandener 10 kW Monomode Faserlaser auf seine Anwendbarkeit zum Laserschweißen von pAM- und MM-Bauteilen aus AlSi10Mg-Material hin untersucht werden. Dieser Laser hat die derzeit höchste verfügbare Laserstrahlleistung mit dieser hohen Strahlqualität. Dadurch besteht das Potential sehr hohe Intensitäten im Strahlfokus zu erzeugen und somit beim Laserstrahlschweißen auch an stark wärmeleitendem Material, wie dem AlSi10Mg, große Einschweiß-tiefen mit vergleichsweise hohen Schweißgeschwindigkeiten realisieren zu können. Jedoch wurden bei früheren durchgeführten Laserschweißversuchen an dem additiv (AM) herge-stellten AlSi10Mg-Material festgestellt, dass verstärkt Poren in der Schweißnaht auftraten. Dies war im unteren untersuchten Schweißgeschwindigkeitsbereich insbesondere bei höheren Laserstrahlleistungen (5 – 10 kW) der Fall. Beides deutet dabei auf eine Über-hitzung der Schmelze hin. Poren sind aber für den vorgesehenen späteren Einsatz beim Fügen von AM und MM-Bauteilen sehr nachteilig. Weiterhin zeigte sich, dass auch mit maximaler Laserstrahlleistung von 10 kW die erreichbare Einschweißtiefe auf unter 20 mm limitiert war. Aus diesem Grund soll in der Bachelorarbeit untersucht werden, ob durch Verwendung größerer Brennweiten und daraus resultierender geringerer Strahlintensitäten



im Laserfokus, eine Reduzierung von Poren im Schweißprozess bzw. einer Erhöhung der Einschweißtiefe erreichen lässt. Die Untersuchungen sollen an gegossenem und an pAM-generiertem AlSi10Mg-Material durchgeführt und die Ergebnisse dann entsprechend verglichen werden.

Abbildung 2 Schweißnaht; geschweißt mit PL = 10 kW, 33 mm/s, FL: - 6 mm

Durchzuführende Arbeiten waren:

- Literaturrecherche zum Stand der Technik und den Ergebnissen bereits durchgeführter Versuche am pAM-generierten AlSi10Mg-Material,
- Planung und Organisation der Versuche und des Versuchsaufbaus,
- Konstruktion und Realisierung einer Bearbeitungsoptik zur Verwendung längerer Brennweiten (F1000, F1200, F1500, F2000 o.ä.),
- Laserstrahlcharakterisierung (Kaustik- und Leistungsmessung),
- Probenpräparation mittels Quer- bzw. Längsschliffen,
- Durchführung von Zugversuchen und Härtemessungen bei Verfügbarkeit von porenfreien bzw. porenarmen Schweißergebnissen,
- Auswertung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen.

2. Grundlagen

2.1. Lasermaterialbearbeitung

Beim Laserstrahlschweißen handelt es sich um ein Schmelzschweißverfahren. Die erforderliche Energie wird durch einen Laserstrahl erzeugt [2]. Im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren ist das Laserstrahlschweißen flexibler. Zudem lassen sich höhere Prozessgeschwindigkeiten realisieren und hohe Nahtgüten erzielen. Die Lasermaterialbearbeitung ist ein berührungsloser Prozess und zeichnet sich durch eine hohe Bearbeitungsqualität aus. Das Laserschweißen wird in Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen unterteilt. Dabei kann beim Tiefschweißen die Energiedichte mehr als das Zehnfache derer des Wärmeleitungsschweißens betragen. Durch eine hohe Energiedichte (Intensität) erreicht der Bearbeitungsbereich die Verarbeitungstemperatur in sehr kurzer Zeit und der Werkstoff wird nur lokal aufgeschmolzen, so dass die thermische Verformung des Werkstücks dadurch sehr klein wird. Dies bedeutet, dass es kaum eine mechanische Verformung des Werkstücks gibt. Die Laserbearbeitung ist daher sehr vorteilhaft für die Verarbeitung von Präzisionsteilen. Die Lasermaterialbearbeitung hat eine sehr hohe Flexibilität für verschiedenes Material (Metalle, Kunststoffe, Keramik u.a.), in Form, Größe und Verarbeitungsumgebung (Luft, Schutzgas, Vakuum).

Die Lasermaterialbearbeitung zeichnet sich durch eine hohe Verfahrensvielfalt aus. Sie kann zum Schneiden, Stanzen, Schweißen, Beschichten und anderem eingesetzt werden. Die Laserbearbeitung ist gut automatisierbar. Die Genauigkeit des Bearbeitungsprozesses wird durch das Bewegungssystem (z.B. X-Y-Tisch) präzise gesteuert.

2.2. Laserstrahlschweißen vom Aluminium

Aluminium hat niedrigen Schmelzpunkts und eine starke Affinität zu Sauerstoff. Durch Inertgas kann das Schmelzbad während des Laserschweißens geschützt werden, um die Oxidation des Schweißbades zu vermeiden. Dazu wird in den Versuchen hauptsächlich Argon verwendet.

Die Absorption der Laserstrahlung ist bei Aluminium von der Wellenlänge abhängig. Diese beträgt bei Wellenlängen unter $1\mu\text{m}$ ca. 10%, mit einem Absorptionspeak von 15% bei 808 nm. Über $1\mu\text{m}$ Wellenlänge fällt diese auf unter 5% ab. [3] Deshalb wird für diese Versuche ein Yb:YAG-Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1070 nm eingesetzt.

2.3. Tiefschweißen

Beim Tiefschweißen muss die Intensität auf dem Werkstück eine Schwellintensität überschreiten, um den Tiefschweißprozess einleiten zu können. Diese beträgt bei Stahl ca. 10^6 W/cm^2 und bei Aluminium 10^7 W/cm^2 . Zusätzlich ist diese von der Wellenlänge des Lasers abhängig.

Beim Tiefschweißen setzt durch die hohe Intensität eine lokale Verdampfung ein, wobei der Metaldampf fackelartig nach oben steigt. Dadurch entsteht eine Kraft, welche die Schmelze nach unten und zur Seite drückt und eine Dampfkapillare ausbildet. Die Kapillare hat circa denselben Durchmesser wie der Fokaldurchmesser des Laserstrahls. Der Dampfdruck wirkt dem hydrostatischen und dem hydrodynamischen Druck der umgebenden Schmelze und deren Oberflächenspannung entgegen und hält somit die Dampfkapillare offen. Die Dampfkapillare wird auch Keyhole genannt. Beim Tiefschweißen wird mit Hilfe des Keyhole, die Energie aus dem Strahl in das Schmelzbad eingebracht [4][5][6]. Abbildung 3 verdeutlicht den genannten Prozess.

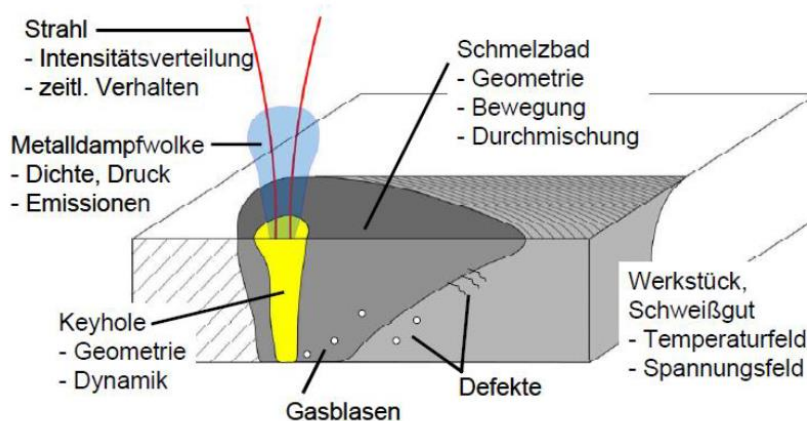


Abbildung 3 Am Tiefschweißprozess beteiligte Größen [7]

2.4. Materialeigenschaften vom AlSi10Mg

Die AlSi10Mg-Legierung hat die Vorteile einer geringen Dichte, einer hohen Festigkeit und einer guten Korrosionsbeständigkeit. Aufgrund der Nachfrage nach Leichtbau wird die Aluminiumlegierung in großem Umfang in der Automobil- und Luftfahrtindustrie verwendet. Es ist eine weit verbreitete Aluminiumgusslegierung. Sie kann je nach dem Gehalt an Si in folgende Legierungen unterteilt werden: untereutektische Legierungen, eutektische und

naheutektische Legierungen, übereutektische Legierungen. In der Al-Si-Legierung ist Silizium ein Hauptlegierungselement, das die Fließfähigkeit der Legierung verbessert, die Neigung zu Heißrissen verringert, die Porosität verringert und die Luftdichtheit verbessert. Die mit Magnesium versetzte AlSiMg-Legierung weist eine gute Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Bruchdehnung auf. AlSiMg-Legierungen mit niedrigem Mg-Gehalt (weniger als 0,3% bis 0,6% Mg) können entweder kalt oder warm ausgehärtet werden. Wenn der Si-Gehalt zwischen 5% ~ 10% Si liegt, wird bei hoher Temperatur zur Festigkeitssteigerung Magnesiumsilicid Mg_2Si ausgeschieden, das in Form von feinteiligen Partikeln vorliegt. Dadurch verbessert sich die Festigkeit. Durch die Erhöhung des Mg-Gehaltes wird die Bruchdehnung erhöht. Diese Legierungen sind auch korrosionsbeständig und leicht zu gießen. [8][9]

Chemische Zusammensetzung [Massenanteil in %] ^[1] Chemical composition [Mass fraction in %] ^[1]	Element	Min.	Max.
	Al	Balance	Balance
	Si	9,00	11,00
	Fe		0,55
	Cu		0,05
	Mn		0,45
	Mg	0,20	0,45
	Zn		0,10
	Ti		0,15
	Ni		0,05
	Pb		0,05
	Sn		0,05
	Other each		0,05
	Other total		0,15

Abbildung 4 Chemische Zusammensetzung der AlSi10Mg-Legierung [9]

Der Einfluss der unterschiedlichen Gehalte der genannten Si und Mg Elemente auf die endgültigen Materialeigenschaften wird kombiniert. In Abb.4 ist die chemische Elementkombination der AlSi10Mg-Legierung zusammengestellt. Der Gehalt an Si liegt zwischen 9%~11% und der Gehalt an Mg zwischen 0,2%~0,45%. Das AlSi10Mg-Material als eine aushärtbare Legierung auf Aluminiumbasis. Sie lässt sich gut verarbeiten und zeichnet sich durch eine gute Korrosionsbeständigkeit mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit sowie einer hohe Festigkeit und gleichzeitiger Belastbarkeit unter dynamischer Beanspruchung aus. Diese Eigenschaft macht AlSi10Mg zur beliebtesten verfügbaren Aluminiumlegierung zu dem Einsatz für hochbelastete Bauteile [10].

2.5. Gegenüberstellung der Materialeigenschaft von pAM- und konventionell (MM) hergestelltem AlSi10Mg

Es ist festzustellen, dass Bauteile aus AlSi10Mg durch SLM-Technologie hergestellt werden können. Grundsätzliche Probleme sind der hohe Reflexionsgrad und der relativ niedrige Schmelzpunkt dieses Pulvers. Mit der Entwicklung der Technologie wurden solche Probleme gut gelöst und eine Massenproduktion ermöglicht [20][21]. Die mechanischen Eigenschaften der mit dem SLM-Verfahren hergestellten AlSi10Mg-Teile sind mit denen von konventionell gegossenem AlSi10Mg vergleichbar oder übertreffen diese sogar [22].

In [22] wurde, um die mechanischen Eigenschaften der mittels SLM hergestellten AlSi10Mg-Teile zu prüfen, ein Bauteil mit einer Dichte von bis zu 99,8% hergestellt. Dazu wurden folgende Parameter verwendet: Laserleistung von 200 W, Vorschubgeschwindigkeit 1400 mm/s und einem Abstand zwischen den Spuren von 105 μm . Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurden Zug-, Härte- und Charpy-Schlagzähigkeitstests durchgeführt. Die detaillierte Zugversuchsrichtung ist in Abb.5 dargestellt.

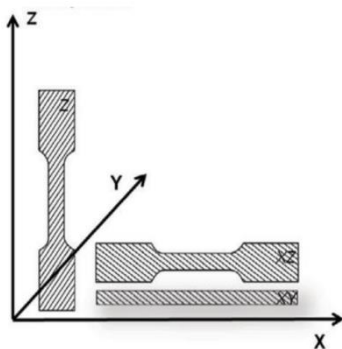


Abbildung 5 Zugversuch Richtungen der Probe [22]

In der nachfolgenden Tabelle sind die mechanischen Eigenschaften von diesen Bauteilen zusammengestellt.

Tabelle 1 Mechanische Eigenschaften von SLM- Bauteilen und Gussteilen [22][23][24]

	E-Modul [GPa]	R _m [MPa]	ε _{Bruch} [%]	HV50	Schlagenergie
XY-Richtung (SLM)	68 ±3	391 ±6	5,55 ±0,4	127	3,94 ±0,5
Z-Richtung (SLM)		396 ±8	3,47 ±0,6		3,69 ±0,48
konventionell gegossen und gealtert	71	300 ~ 317	2,5 ~ 3,5	86	2,5 ~ 3
Hochdruckguss (wie gegossen)	71	300 ~ 350	3 ~ 5	95 ~105	
Hochdruckguss (T6 gealtert)	71	330 ~ 365	3 ~ 5	130 ~133	

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass die SLM- AlSi10Mg -Teile eine höhere oder zumindest mit dem gegossenen AlSi10Mg -Material vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen. Die Vickers-Härte der SLM-Teile ist viel höher (ca. 30 HV50) als die Härte des Hochdruckgusses AlSi10Mg und fast so hoch wie die des Hochdruckgusses AlSi10Mg im gealterten Zustand. Die maximale Zugfestigkeit der SLM-Teile ist immer höher als die des Hochdruckguss. Die Dehnung der SLM-Teile in Z-Richtung ist vergleichbar mit den Hochdruckgussteilen, während die Dehnung für in XY-Richtung fast 2% höher ist. Gleichzeitig ist die Charpy-Schlagenergie der SLM-Teile auch besser, als die des konventionell gegossenem AlSi10Mg Materials. Bei SLM-Teilen wurden im originalen Zustand (ohne Warmbehandlung) signifikant höhere Härten und Festigkeiten erreicht. Dies ist aufgrund der sehr feinen Si-Phase, nach Literaturangaben weist die primäre α -Al-Matrix eine zellulär dendritische Mikrostruktur und eutektische Mikrostruktur mit sehr feinem Si auf [25], die sich im AlSi10Mg SLM-Teil aufgrund der raschen Abkühlung und Verfestigung gebildet hat (siehe Abb. 6). [26]

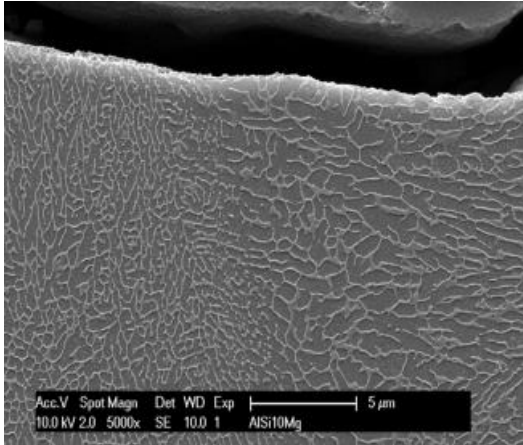


Abbildung 6 REM-Aufnahme eines AISi10Mg SLM-Teils, die die mit Si-Phase dekorierten Al-Matrixzellen zeigt [22]

Es ist auch anzumerken, dass SLM-Proben eine Anisotropie aufweisen. Dies zeigt sich in einem unterschiedlichen Ergebnis in die verschiedenen Richtungen. Die Bruchdehnung in X- und Y-Richtung ist höher als in Z-Richtung (ca. 2%). Bei Betrachtung der Bruchfläche des Zugversuchs, wie in Abb. 7 dargestellt, ist zu sehen, dass große Poren in der Nähe des Randes den Bruch der Probe auslösten. Diese Grenzporen sind bei Teilen, die in Z-Richtung hergestellt werden, zahlreicher als bei Teilen, die in X- bzw. Y-Richtung hergestellt wurden. Wie in der Literatur zu sehen ist, wurden in der SLM-AISi10Mg-Legierung sowohl gleichachsige bzw. in Reihe angeordnete Körner beobachtet. Dies ist auch der Hauptgrund, warum Anisotropie auftritt [26] und die Poren die größte Schwächung der Teile darstellen. [22]

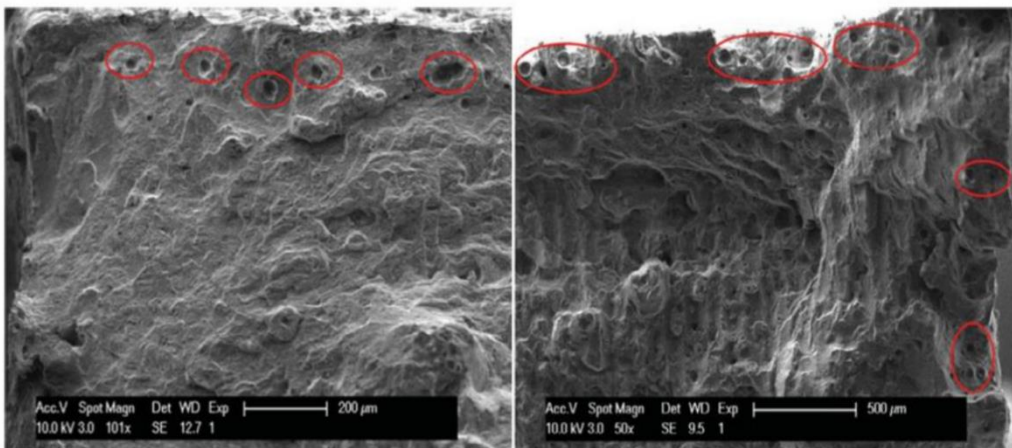


Abbildung 7 Bruchflächen von Zugproben XY- (links), Z-Richtung (rechts) [22]

Es wurden im Material auch drei verschiedene Bereiche der Mikrostruktur gefunden: Feinkorn-, Grobkorn- und Wärmeeinflusszonen (siehe Abb. 8). [26] Die Analyse zeigte, dass diese drei Bereiche durch die drei Temperaturzonen beim Erwärmen mit dem Laserstrahl verursacht wurden.

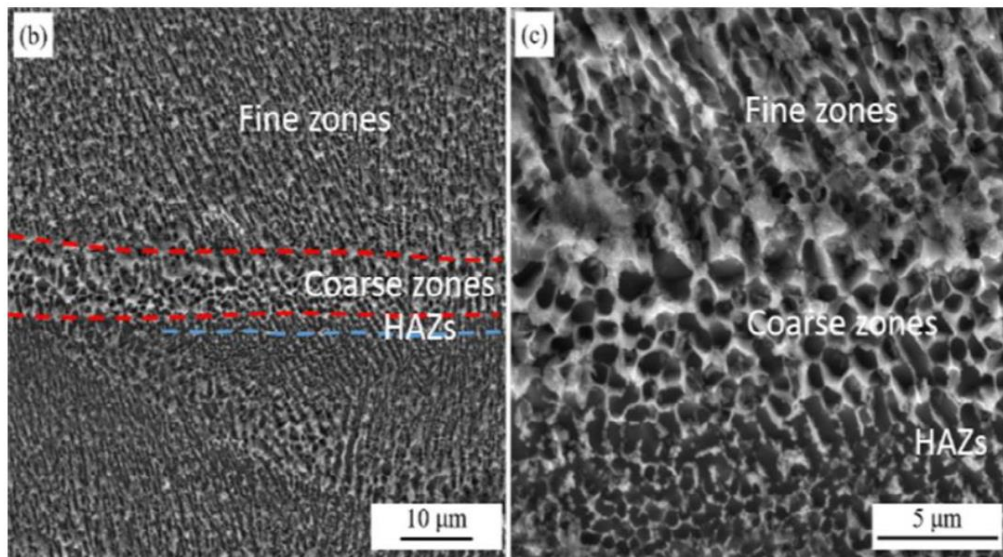


Abbildung 8 Die Mikrostruktur in SLM AISi10Mg- Legierung [26]

- I. Wenn die Temperatur höher als die Liquidustemperatur ist, werden das Pulver und die Überlappung geschmolzen und dann als zelluläre Dendriten verfestigt. Dies zeigt sich als feine Zonen in der endgültigen Mikrostruktur. [26]
- II. Wenn die Temperatur niedriger als die Liquidustemperatur ist, aber höher als die Solidustemperatur ist, wird das Basismetall in einen halbfesten Zustand erhitzt, in dem sich die primäre α -Al-Phase zu einer globulären Morphologie ändert. Dies zeigt sich als grobe Zonen. [26]
- III. Wenn die Temperatur niedriger als die Solidustemperatur ist, wirkt die Wärmequelle als Wärmebehandlung für das Grundmetall und bewirkt die Bildung und das Wachstum von Si-Partikeln, die sich als WEZ zeigt. [26]

2.6. Probleme beim Aluminiumschweißen und Optimierungsmöglichkeiten

Die Aluminiumbearbeitung wirft viele Probleme auf. Besonders der Bereich „Werkstoff“ im oben genannten Modell erschweren den Aluminiumschweißprozess. Aus physikalischer Sicht, durch die hohe thermische Leitfähigkeit und die hohe Wärmekapazität, ist viel Energie nötig, um den Schweißprozess einzuleiten und realisieren zu können. Die hohe Wärmeausdehnung bedingt eine gewisse Verzugsgefahr. Durch den hohen Reflexionsgrad von 0,8 muss der Laser in einem Winkel zum Lot auf das Werkstück treffen, da sonst der Strahl zurück in die Optik geworfen wird und jene zerstört. Die Hauptproblemfelder basieren allerdings auf der chemischen und werkstofflichen Zusammensetzung [11][12][13].

In der folgenden Tabelle 1 sind einige möglichen Probleme sowie die dazugehörigen Ursachen und Lösungen aufgeführt.

Tabelle 2 Mögliche Probleme und Lösungen

Problem	Ursachen	Lösungen
Risse	Bei Aluminiumlegierungen handelt es sich meist um Mehrstoffsysteme. Daher geschieht die Umwandlung der flüssigen Phasen in die feste Phase nicht direkt, sondern über ein Intervall. Das Volumen nimmt bei der Erstarrung ab, wodurch es zum Schrumpfen kommt. Dadurch entstehen entlang der Korngrenzen Fehlstellen, wodurch die Körner voneinander getrennt werden. Wenn kein flüssiges Material mehr vorhanden ist, welches die Räume zwischen den Körnern auffüllt und die Werkstofftrennung aufheben, können daraus dann Heißrisse entstehen [11][16].	<ul style="list-style-type: none"> - Prozessgeschwindigkeit verringern, damit Fehlstellen mit Material gefüllt werden können - Zusatzmaterial nutzen (Schweißdraht)

Wasserstoffporen	Der im Aluminium gelöste Wasserstoff wird während des Abkühlprozesses in Form von Blasen ausgeschieden. Wenn die Aluminiumschmelze schneller erstarrt, als die Bläschen aus der Schmelze entweichen können, dann verbleiben sie im Werkstoff und sind später im Querschliff als Poren sichtbar. Beim Laserschweißen ist die Gefahr dieser Poren größer, da mit großen Prozessgeschwindigkeiten gearbeitet und große Einschweißstiefen realisiert werden, welche demzufolge auch hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten unterliegen. [11][14][15]	<ul style="list-style-type: none"> - Vorbehandlung des Werkstoffes - durch Nachwärmen die Erstarrungszeit der Schmelze verlängern - Prozessgeschwindigkeit verringern, um die Erstarrungszeit zu verlängern
Prozessporen	Prozessporen und Schmelzauswürfe sind typische Nahtfehler beim Tieferschweißen. Besonders Aluminiumlegierungen sind dafür anfällig. Das liegt an der hohen Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Schmelze dünnflüssiger ist. Dadurch ist es möglich, dass das dynamische Verhalten der Dampfkapillargeometrie zur Einschnürung führt. Durch eine Schmelzbadbrücke wird der untere Teil der Kapillare vom oberen Teil getrennt. Erstarrt nun genau diese Brücke bevor Material den Hohlraum auffüllen kann, dann resultiert daraus eine schlauchförmige Pore.[13]	<ul style="list-style-type: none"> - Einschweißtiefe verringern, um Dampfkapillare klein zu halten, wodurch es seltener zur Trennung der Kapillare kommt - Strahlfleck vergrößern - Schutzgas so einströmen lassen, dass es die dynamische Änderung der Kapillargeometrie nicht wesentlich negativ beeinflusst wird
Schweißverzug	Während des Schweißvorgangs befindet sich die Mitte der Fügestelle in der Nähe der unteren Platte und weicht von der Mitte der Schweißnaht ab, wodurch das Grundmetallanteil schmilzt.	<ul style="list-style-type: none"> - Übereinstimmung zwischen Laserstrahl und Draht anpassen
Schweißspritzer	Unterschiedliche Legierungen bewirken, dass die niedrig siedenden Metalle zuerst verdampfen.	<ul style="list-style-type: none"> - Verwendung eines Zusatzstoffes (Schweißdraht)

Schweißnaht- Ablagerungen	Die Drahtvorschubgeschwindigkeit ist zu hoch oder die Schweißgeschwindigkeit ist während des Schweißvorgangs zu niedrig.	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhen die Schweißgeschwindigkeit - Verringern die Drahtvorschubgeschwindigkeit - Verringern die Leistung des Lasers
Schweißnaht- Abweichung	Ungenaue Positionierung beim Schweißen oder ungenaue Ausrichtung zwischen Drahtvorschub und Draht.	<ul style="list-style-type: none"> - Schweißposition oder die Schweißzeit anpassen - Drahtposition anpassen
Einschlüsse	Die Oberfläche des Materials oder des Werkstücks ist nicht sauber, es gibt Öl oder Verunreinigungen bzw. kann diese durch Verflüchtigung der Beschichtung verursacht werden.	<ul style="list-style-type: none"> - Vorhandlung des zu schweißenden Materials

3. Versuchsvorbereitungen

3.1. Versuchsaufbau

Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Abb. 9 und 10 dargestellt. Für die Schweißversuche wurde ein 10 kW Monomode Faserlaser YLS-10000-SM der Fa. IPG Photonics verwendet. Die Spannvorrichtung wurde quer auf dem Tisch einer vorhandenen Linearachse befestigt. Diese wird über einen Linearmotor angetrieben. Auf Grund des Linearmotors, können beim Schweißprozess Vorschubgeschwindigkeit von bis zu 166 mm/s (10 m/min) untersucht werden. Für die Zuführung des Argon-Schutzgases wurde eine Schutzgasdüse angebracht. Dabei ist die Richtung des ausströmenden Schutzgases stechen in der Richtung des Vorschubs. Es wurde auch ein Cross-Jet angebracht. Dieser soll Laserbearbeitungsoptik schützen und verhindern, dass Spritzer oder Schmauch zur Laserbearbeitungsoptik gelangen. Schmauch oder Spritzer werden so in Richtung des Erfassungselements der Absaugung geblasen und durch diese abgesaugt. Die Laserbearbeitungsoptik ist oberhalb der Spannvorrichtung angebracht und steht während der Bearbeitung still. Der Schweißlaserstrahl wurde dazu mit ca. 5° leicht schleppend zur Vorschubrichtung angeordnet, um Rückreflexionen in die optischen Komponenten zu vermeiden. In den Abbildungen 9 und 10 werden alle Komponenten zur Strahlführung und -formung dargestellt.

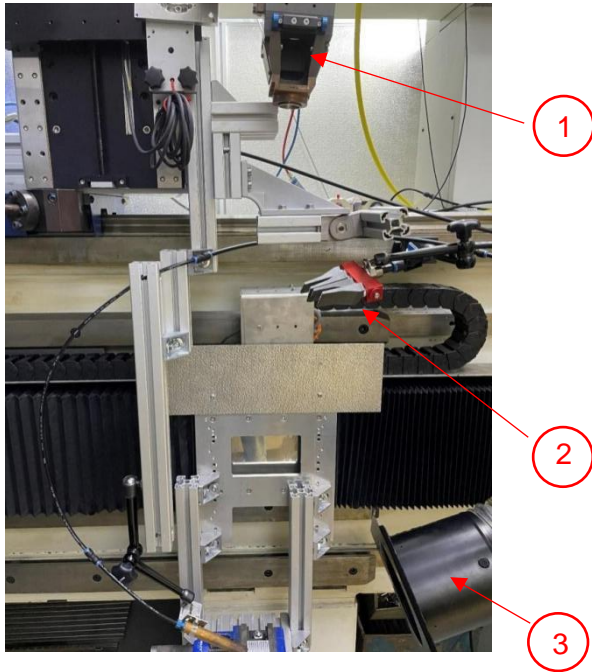


Abbildung 9 Versuchsaufbau (oberer Teil)

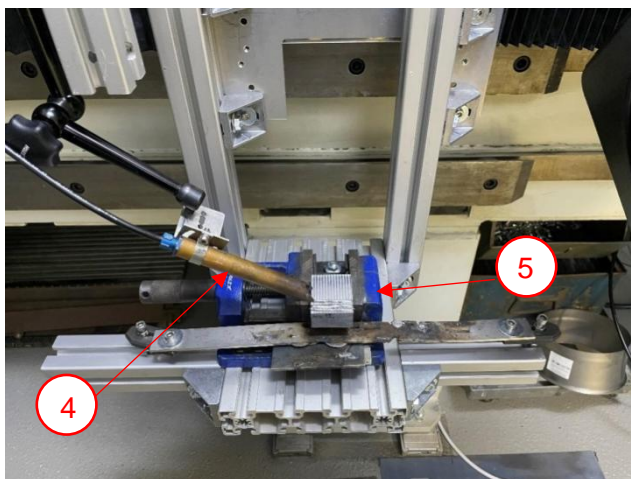


Abbildung 10 Versuchsaufbau (unterer Teil)

Tabelle 3 Komponenten Tabelle

Nr.	Komponente
1	Bearbeitungsoptik F1000 bzw. F1500
2	Cross- Jet
3	Absaugung
4	Schutzgas Düse
5	Schraubstock

3.1.1. Strahlquelle

Der für die Schweißversuche verwendete Ytterbium-Faserlaser YLS-10000-SM ist wassergekühlt und liefert maximal 10 kW Strahlleistung bei $\lambda = 1070 - 1080$ nm. Er kann im cw-Mode oder gepulst mit einer Modulationsrate von 5 kHz betrieben werden. Der Nennleistungsbereich liegt zwischen 1000 W und 10000 W. Die Strahlqualität wurde mit der Beugungszahl von $M^2 = 1,5$ bis maximal $M^2 = 2,0$ angegeben. [17]



Abbildung 11 Ytterbium Faserlaser YLS-10000- SM

3.1.2. Bearbeitungsoptik

Die Bearbeitungsoptik bestehen aus Kollimator und Fokussierung. Zur Kollimation der aus dem Faserkabel austretenden Laserstrahlung wurde ein Kollimationsmodul der Firma IPG Photonics mit einer Brennweite von F160 verwendet. [18] Zur Fokussierung wurde das Modul YW50 des Herstellers PRECITEC (siehe Abb.12) eingesetzt, in der sich eine Fokussierlinse mit einer Brennweite von F1000 bzw. F1500 befand.

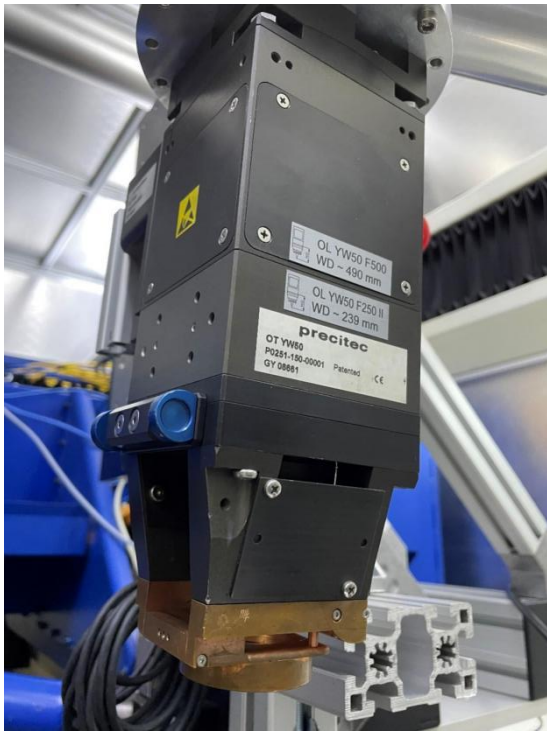


Abbildung 12 Schweißkopfsystem YW50

3.1.3. Cross- Jet

Eine sogenannte Cross-Jet Düse ist eine Düsenart, welche einen breit gefächerten Luftstrom erzeugt. In diesen Versuch wurden hier für 4 Flachstrahldüsen der Firma SILVENT vom Typ 920 verwendet, welche übereinander angeordnet waren. Der Luftstrom befindet sich oberhalb des Werkstückes beziehungsweise des Probenmaterials. Ziel des Einsatzes eines Cross-Jets sind hier einerseits das Ablenken von zurückgeworfenem Material (Schweißspritzern, Funken oder Schmauch), die sich während des Prozess Richtung Bearbeitungsoptik bewegen und andererseits eine eventuelle Manipulation des Metaldampfes zwischen Optik und Werkstück, damit mehr Laserstrahlung die Wechselwirkungszone erreichen kann.

3.1.4. Absaugung

Während der Bearbeitung mit dem Laser werden Metall- und Feinstäube frei, welche unter Umständen auch giftig sind. Die verwendeten optischen Komponenten könnten zudem durch die Rauchbelastung verschmutzen bzw. Schaden nehmen.

3.1.5. Spannvorrichtung

Auf dem Linearachse Bewegungssystem wurde die Schweißprobe mit einem Schraubstock befestigt. So konnten die Probenblöcke einfach, schnell und ausreichend genau eingespannt und durch Verschieben des Probenmaterials zwischen den Spannbacken in die nächste Schweißnahtposition gebracht werden.

3.2. Bestimmung der Spotgröße

Für die Strahleigenschaften werden in der Regel Kennwerte wie: Strahlqualität k , Fokussdurchmesser d_f , Strahlfleckquerschnitt A_{df} und Rayleighlänge z_R berücksichtigt. [18] Die Strahlqualität k zeigt an, wie stark der Laserstrahl fokussiert werden kann. Es ist der Kehrwert der Beugungsmaßzahl M^2 . Der Wert $M^2=1$ steht für den Gaußstrahl (TEM_{00}). Das ist der ideale Strahl mit dem geringsten Divergenzwinkel. Die reale Strahlqualität des Lasersystems wurde bei früheren durchgeführten Versuchsreihen ermittelt und beträgt in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung bei $M^2=1,3$ ($@ \leq 5$ kW) bzw. $M^2=2$ ($@ \leq 10$ kW). Das Strahlparameterprodukt SPP beschreibt den Zusammenhang von Tailenradius ω_0 und dem dazugehörigen halber Divergenzwinkel θ :

$$k = \frac{1}{M^2} = \frac{\varphi_{\text{Gauss}}}{\varphi_{\text{real}}} = \frac{SPP_{\text{ideal}}}{SPP_{\text{real}}} \quad [36][37][38]$$

$$SPP = \omega_0 \cdot \theta$$

$$\text{Weil für } TEM_{00}: SPP_{\text{ideal}} = \frac{\lambda}{\pi} \text{ mit } M^2=1$$

$$\Rightarrow SPP_{\text{real}} = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi}$$

$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi}}{\theta}$$

$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot k \cdot \theta} \text{ mit } \theta = \arctan\left(\frac{\omega_p}{f}\right) \quad [39]$$

ω_p : Strahlradius an Linse, f : Brennweite

Zugehörige Tailenlänge (Rayleighlänge): $Z_R = 2z_0 = 2 \cdot (k \cdot \pi \cdot \omega_0^2) / \lambda$

Tabelle 4 Ermittelte Strahlparameter für unterschiedliche optische Systeme (Brennweiten)

Brennweite	Halber Divergenzwinkel θ [mrad]	Laserleistung [kW]	M ²	Tailenradius ω_0 [μm]	Tailenlänge $2z_0$ (Rayleighlänge Z_R) [mm]	Intensität I [W/m^2]
F1000 (FL: WSO 1035 mm)	7,729	7	1,5	66,10	17,10	$5,10 \times 10^{11}$
		9	1,8	79,32	20,52	$4,55 \times 10^{11}$
		10	2	88,13	22,80	$4,10 \times 10^{11}$
F1000 (FL: -6mm 1029 mm)	7,774	10	2	87,62	22,54	$4,14 \times 10^{11}$
F1500 (FL: WSO 1572 mm)	5,089	10	2	133,85	52,60	$1,78 \times 10^{11}$
F1500 (FL: -6mm 1566 mm)	5,109	10	2	133,33	52,19	$1,79 \times 10^{11}$

4. Auswertungen

4.1. Auswertungsübersicht der Schweißversuche

In dieser Bachelorarbeit wurde 5 Versuchsreihen ausgewertet. In erstem Teil werden die Schweißversuche von AlSi10Mg-Guss mit verschiedene Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeit analysiert. (Tabelle 4) Im zweiten Teil werden die Schweißergebnisse des AlSi10Mg-Gusses und pAM-AlSi10Mg mit verschiedenen Fokuslagen (Defokussieren) zugeordnet (Tabelle 5). Im dritten Teil erfolgt die Versuchsauswertung bei gleichen Schweißbedingungen für den AlSi10MgGuss und das pAM-AlSi10Mg Material (Tabelle 6). Im letzten Teil sind die Schweißergebnisse der Versuche des pAM-AlSi10Mg Materials mit verschiedener Brennweite zugeordnet (Tabelle 7). Dabei ist zu beachten, dass die Probe 25 1 mm dicker war als gedacht. Im Versuch lag also die Fokuslage -1mm vor, die aber hier in der Auswertung als Fokuslage des Laserstrahl WSO bezeichnet.

Tabelle 5 Schweißversuchs an AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserstrahlleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten bei der Brennweite F1000

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokuslage [mm]	Material
Nr. 1 A Nr.1 - 11	7	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss
Nr. 1 B Nr.12 - 20	9	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss
Nr. 2 A Nr. 1 - 10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss

Tabelle 6 Schweißversuche an AlSi10Mg-Guss und pAM mit verschiedener Fokusslage

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material: AlSi10Mg-
Nr. 2 A Nr.1- 10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	Guss
Nr. 2 B Nr. 11-19	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	-6	Guss
Probe 24 Nr.1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe 22 Nr.1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	pAM

Tabelle 7 Versuche zum Vergleich bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss- und pAM-AlSi10Mg Material

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material: AlSi10Mg-
Probe 2 A Nr.1-10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	Guss
Probe 24 Nr. 1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe 2 B Nr. 11-19	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	Guss
Probe 22 Nr. 1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	pAM

Tabelle 8 Versuche zu Vergleich der Schweißergebnisse mit verschiedenen Brennweiten an Guss und pAM-AISi10Mg Material

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material
Probe 2B Nr.1-10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	Guss
Probe 5b Nr. 1 - 9	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1500	-6	Guss
Probe24 Nr.1 - 8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe25 Nr. 1 - 9	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1500	WSO (-1) *	pAM

* die Probe 25 war 1 mm dicker als gedacht

4.2. Ergebnisse am AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten

Tabelle 9 Schweißversuchs an AlSi10Mg-Guss mit verschiedenen Laserstrahlleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten bei der Brennweite F1000

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material
Nr. 1 A Nr.1 - 11	7	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss
Nr. 1 B Nr.12 - 20	9	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss
Nr. 2 A Nr. 1 - 10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	AlSi10Mg-Guss

In diesem Abschnitt wird ausgewertet, wie sich die Änderung der Laserleistung (7 kW, 9 kW und 10 kW) auf das Schweißergebnis auswirkt. Alle anderen Parameter, wie Vorschubgeschwindigkeit, Brennweite, Fokusslage, Material waren gleichgeblieben.

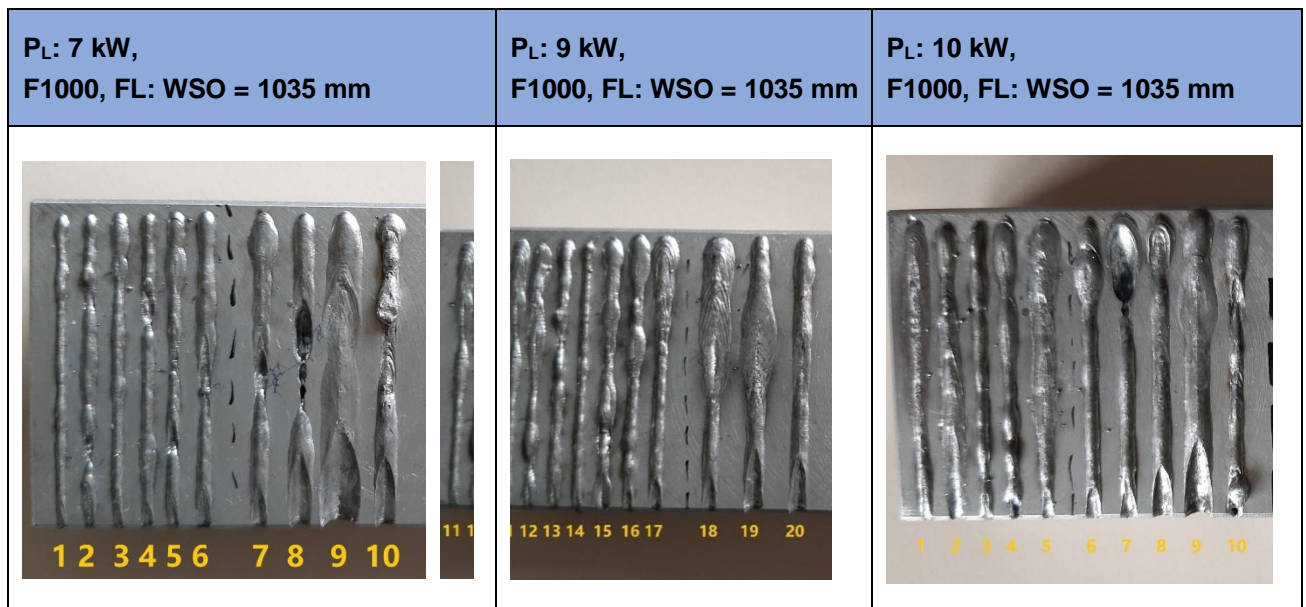


Abbildung 13 Schweißnahtberrauen bei unterschiedliche Strahlleistung für Optik F1000

Aus den Aufsichten der Schweißproben ist zu sehen, dass die Oberraupenbreite breiter wird, wenn die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Fast alle Schweißspuren haben das Phänomen, dass die Materialansammlung am Spuranfang und das Materialfehlen am Spurende auftritt. Mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit wird dieses Phänomen deutlicher. Dies wird höchstwahrscheinlich durch das stechende Schutzgas verursacht. Bei der Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/s bis 67 mm/s ist partiell Nahtfall in die Schweißspur von 7 kW und 10 kW anzutreffen. (siehe PL: 7 kW Nr.7,8 und PL: 10 kW Nr.7)

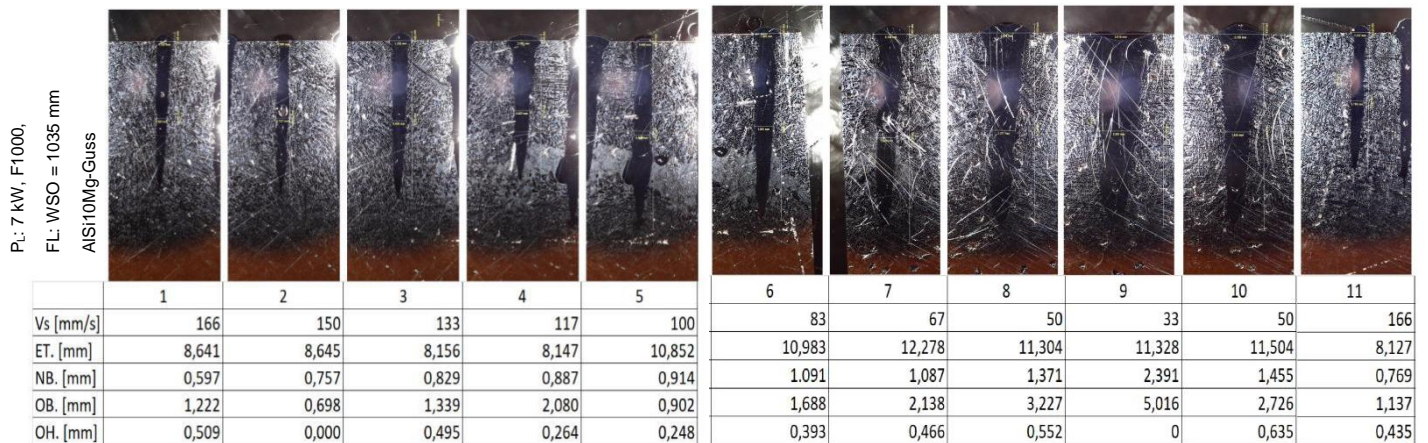


Abbildung 14 Querschliff und Prozessparameter: PL: 7 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss

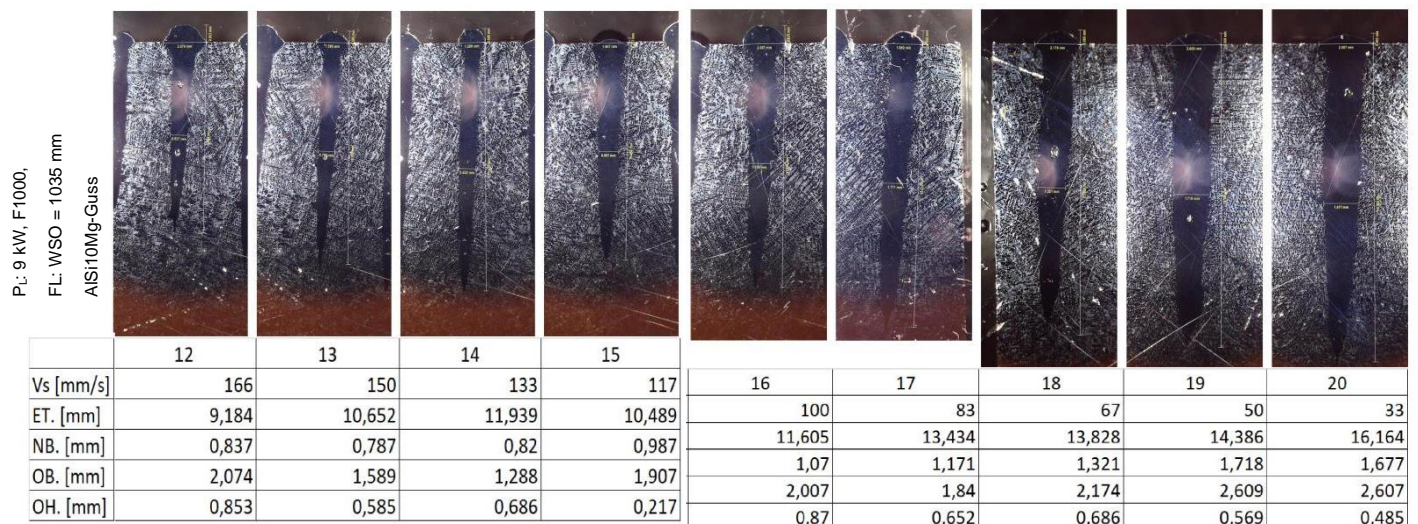


Abbildung 15 Querschliff und Prozessparameter: PL: 9 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss

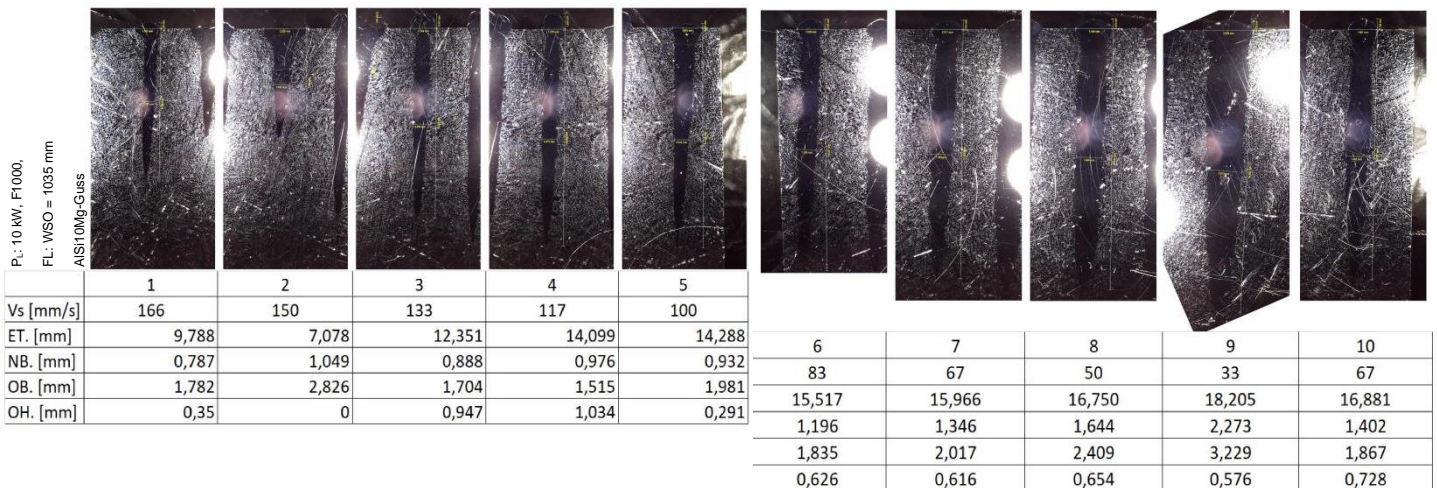


Abbildung 16 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss

Aus der obigen Querschliffen in den obigen Abbildungen ist zu entnehmen, dass für das AlSi10Mg-Gussmaterial, egal welche Laserleistung verwendet wird (7 kW, 9 kW und 10 kW), gibt es nicht viele Poren. In früheren Versuchen wurde festgestellt, dass die Porenhäufigkeit und die Porengröße mit abnehmender Schweißgeschwindigkeit deutlich zunahmten. [27] [30] In meinen Versuchen wird dies jedoch nicht deutlich. Es wurde herausgefunden, dass bei den Vorschubgeschwindigkeiten von 150 mm/s bis 166 mm/s vereinzelt auch größere Poren in der Schweißnaht zu finden sind. Bei Vorschubgeschwindigkeit von 33 mm/s bis 67 mm/s sind häufiger größere Poren zu finden. Die Poren treten hauptsächlich in der Mitte und unterer Teil der Schweißnaht auf. In diesem Versuch haben die unterschiedlichen Laserleistungen keinen offensichtlichen Einfluss auf die Porenhäufigkeit und die Porengröße.

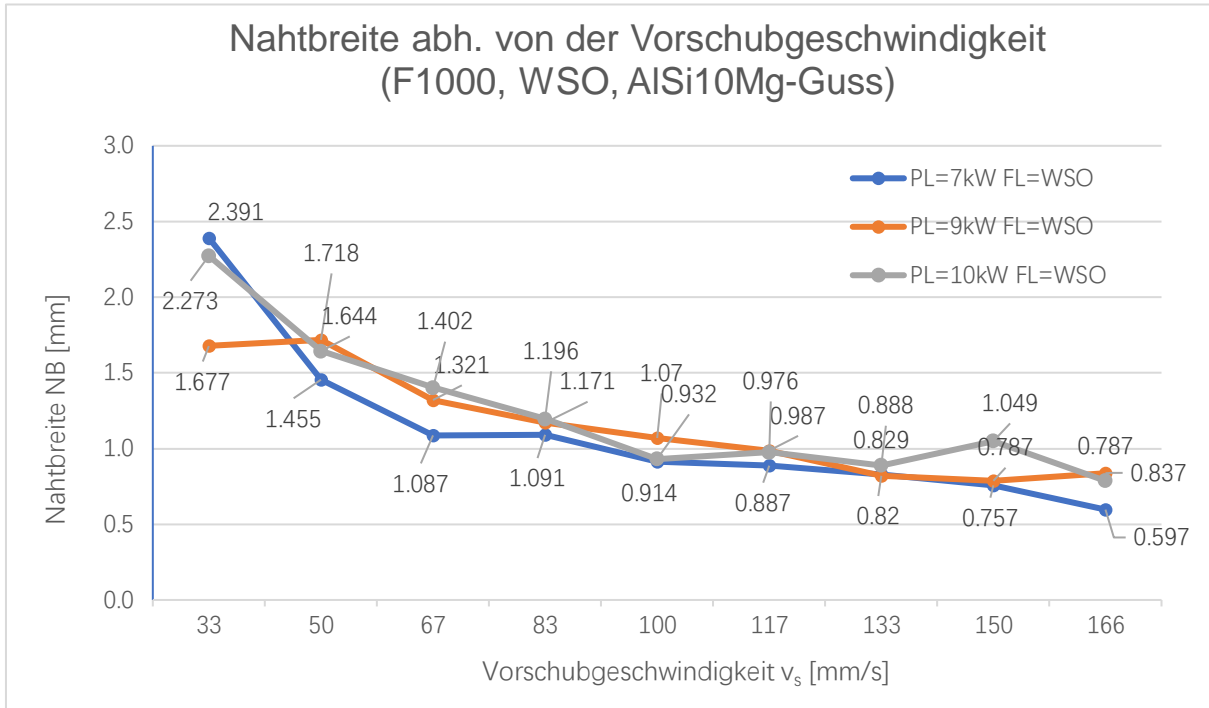


Diagramm 1 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AISi10Mg-Guss)

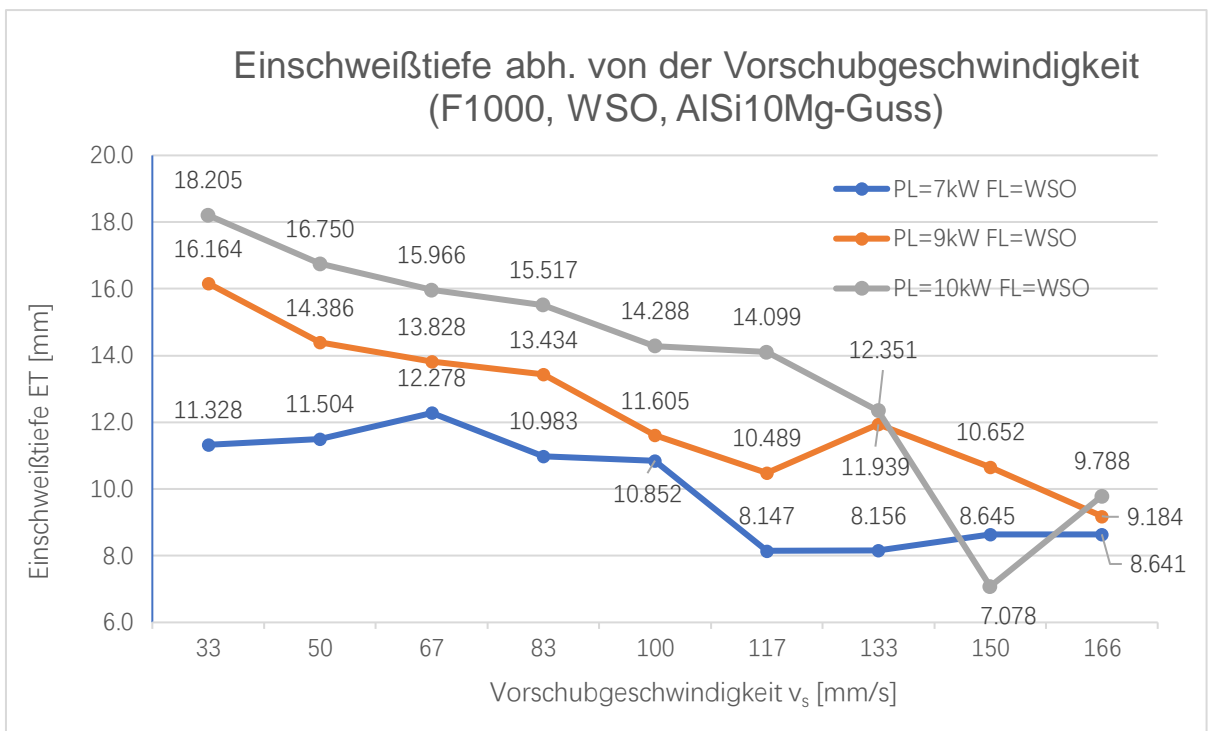


Diagramm 2 Einschweißstiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AISi10Mg-Guss)

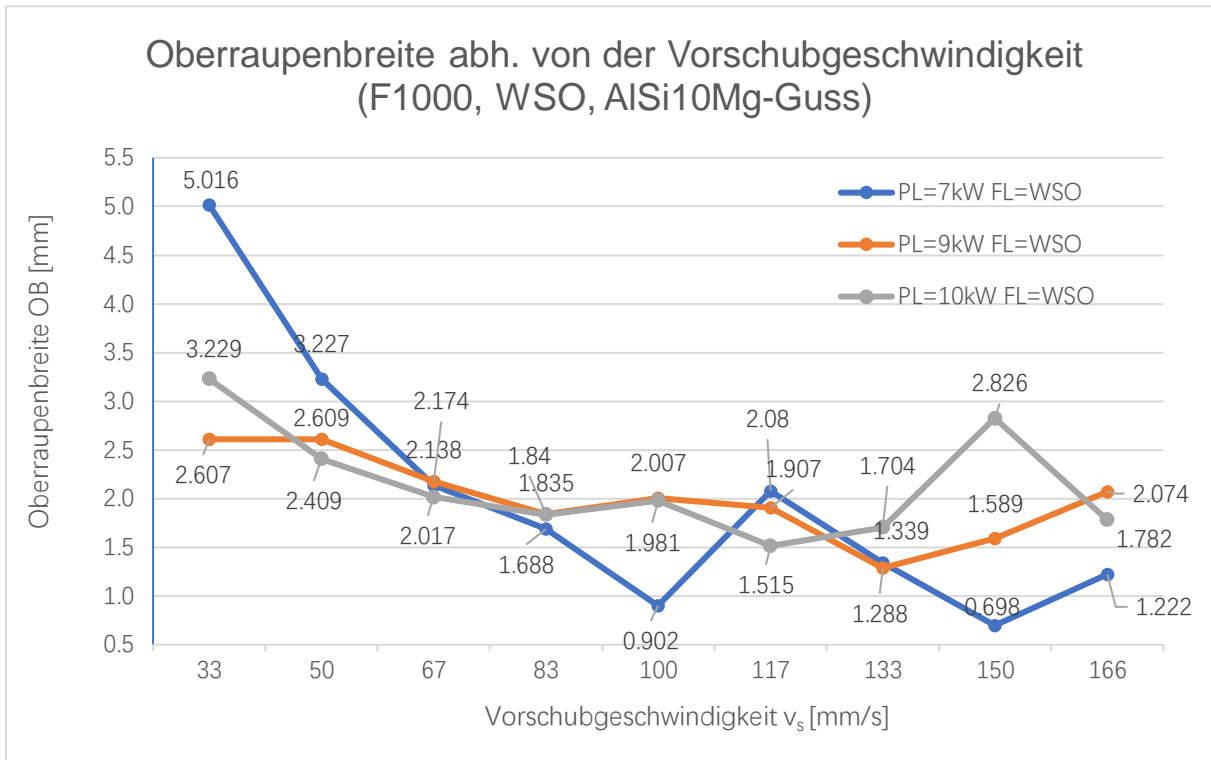


Diagramm 3 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AISi10Mg-Guss)

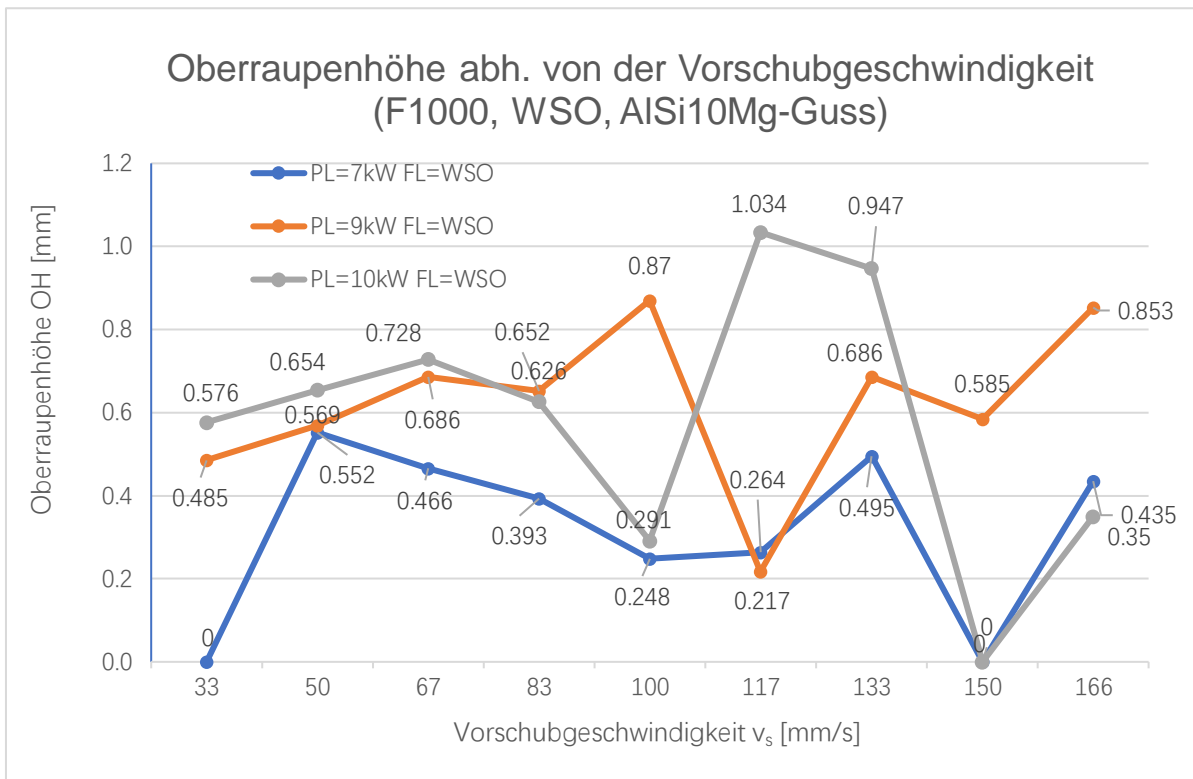


Diagramm 4 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, WSO, AISi10Mg-Guss)

In den Diagrammen ist zu sehen, dass die Schweißergebnisse mit der Vorschubgeschwindigkeit variieren. Die Nahtbreite, Oberrautenbreite und Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Die Nahtbreiten der drei verschiedenen Laserleistungen sind sehr ähnlich. Die Nahtbreite von 9 kW und 10 kW ist etwas größer als die Nahtbreite von 7 kW. Aber es ist erwähnenswert, dass wenn die Vorschubgeschwindigkeit 33 mm/s und die Laserleistung 7 kW, die Nahtbreite das Maximum von 2,4 mm erreicht. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 166 mm/s und bei der Laserleistung von 7 kW ist die Nahtbreite minimal 0,6 mm.

Bei der Vorschubgeschwindigkeit von 33 mm/s bis 166 mm/s ändert sich die Nahtbreite von 7 kW deutlicher als 9 kW und 10 kW. Dieses Phänomen ist auch in den Diagrammen auch bei der Oberrautenbreite zu finden. Bei der Laserleistung von 7 kW ist die Oberrautenbreite maximal 5,0 mm und minimal bei 0,7 mm für die Vorschubgeschwindigkeiten von 33 mm/s bzw. 150 mm. Dies ist eine große Differenz. Wie oben erwähnt, dass die Linie von 7 kW ändert sich steiler als die Linie von 9 kW und 10 kW. Mit zunehmender Laserstrahlleistung nimmt auch die Einschweißtiefe zu. In den Diagrammen ist zu finden, dass die max. ET bei $P_L = 10 \text{ kW}$ und $v_s = 33 \text{ mm/s}$ 18,2 mm beträgt. Die min. ET von 7,1 mm ist bei $v_s = 150 \text{ mm/s}$, und $P_L = 10 \text{ kW}$. Die min. Oberrautenhöhe der drei unterschiedlichen Laserleistungen sind alle konzentriert in die Vorschubgeschwindigkeitsbereich von 100 mm/s bis 117 mm/s. Bei $P_L = 9 \text{ kW}$ ist die kleinste 0,2 bei $v_s = 117 \text{ mm/s}$.

4.3.Schweißergebnisse von AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material mit verschiedener Fokuslage (Defokussierung)

Tabelle 10 Schweißversuche an AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material mit verschiedener Fokuslage

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokuslage [mm]	Material: AlSi10Mg-
Nr. 2 A Nr.1- 10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	WSO	Guss
Nr. 2 B Nr. 11-19	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 50, 33	F1000	-6	Guss
Probe 24 Nr.1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe 22 Nr.1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	pAM

Dieser Abschnitt wird ausgewertet, wie sich die Änderung der Fokuslage (WSO und -6) auf das Schweißergebnis von AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material auswirkt, wenn die anderen Parameter: Vorschubgeschwindigkeit, Brennweite, Laserleistung gleichbleiben.

4.3.1. Beim AlSi10Mg-Guss

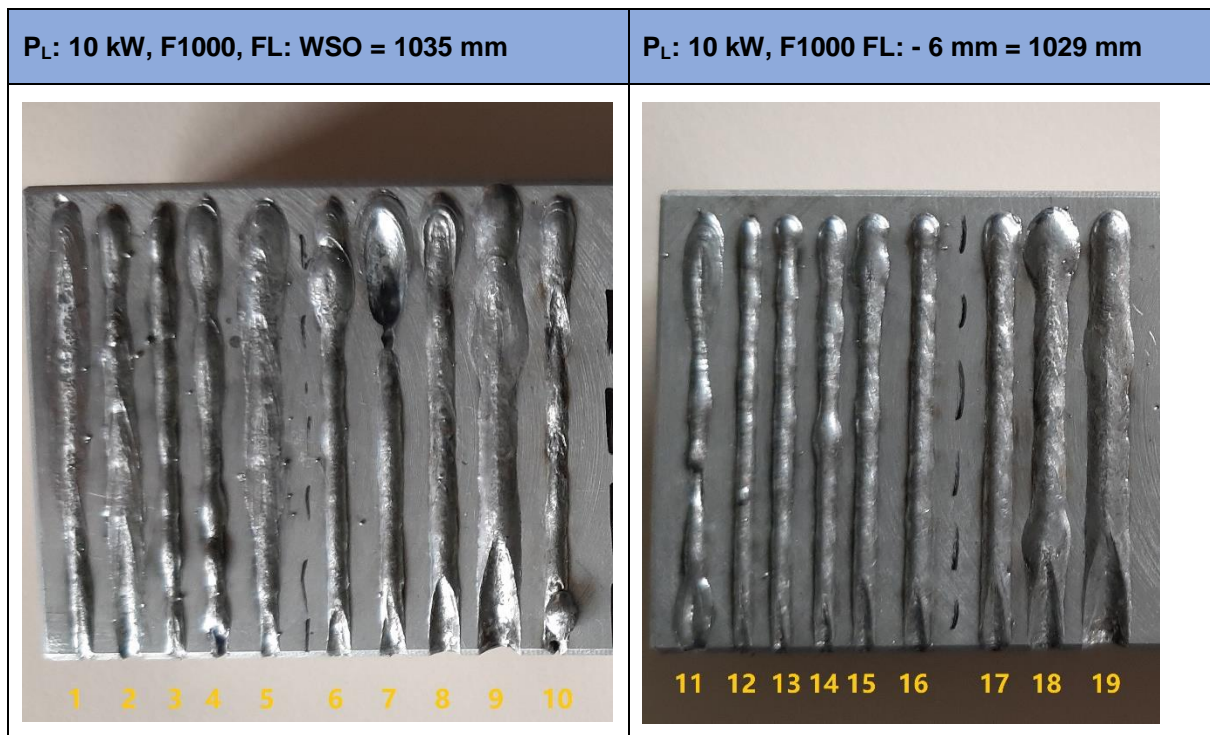


Abbildung 17 Schweißnahtoberraupen bei unterschiedliche FL für AlSi10Mg-Guss

Aus den Aufsichten der Schweißproben ist zu sehen, dass wenn mit Fokuslage – 6 mm der Zustand des Oberraupen besser ist, als mit einer Fokuslage WSO. Wenn FL: WSO ist, tritt eine partiell Nahteneinfall und ungleichmäßige Schweißnaht auf. (siehe FL: WSO, Nr.7 und Nr.4). Wenn die Fokuslage: - 6 mm ist, dass mit Ausnahme der Schweißnaht bei $v_s = 166 \text{ mm/s}$ (siehe FL: - 6mm Nr.11), sind die verbleibenden Schweißnaht gleichmäßig. Es sammelt sich Material am Spuranfang an und fehlt am Spurende. Die Oberraupe wird breiter, wenn die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt.

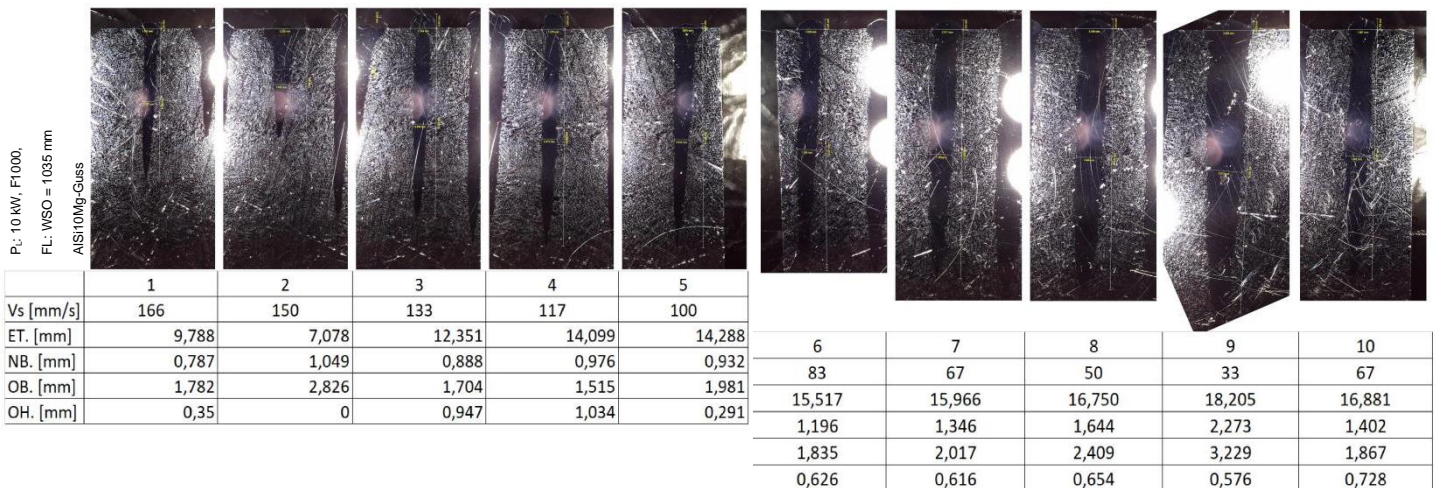


Abbildung 18 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss

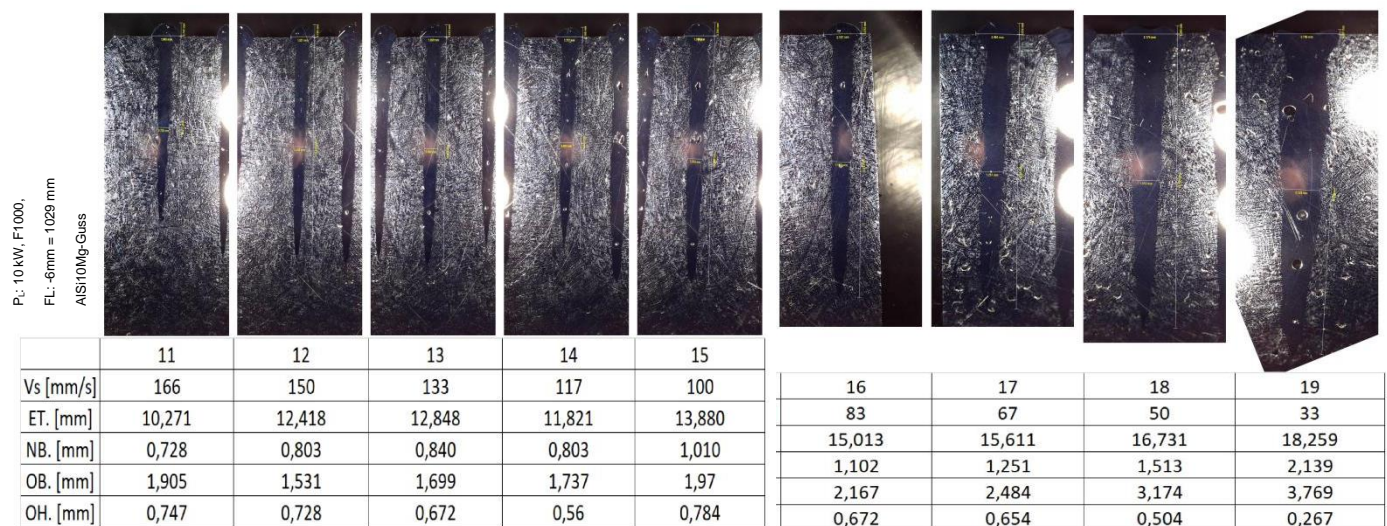


Abbildung 19 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, AlSi10Mg-Guss

Im Vergleich zwischen FL: WSO und FL: - 6 mm, gibt es FL: - 6 mm mehr Porenhäufigkeit und größer Porengröße als der FL: WSO. Im Querschliffen von FL: WSO befinden sich fast keine Poren in der Schweißnaht. Erst wenn die Vorschubgeschwindigkeit langsam ist, erscheinen mehrere Poren. (siehe $v_s = 33$ mm/s) Es gibt fast keine Poren in anderen Querschliffen und selbst wenn es solche gibt, ist die Porengröße sehr klein. In den Querschliffen von FL: - 6 mm befinden sich die Poren im mittleren und unteren Teil der Schweißnaht. Wie FL: WSO, außer bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten sind die Porengröße der anderen Querschliffen sehr klein.

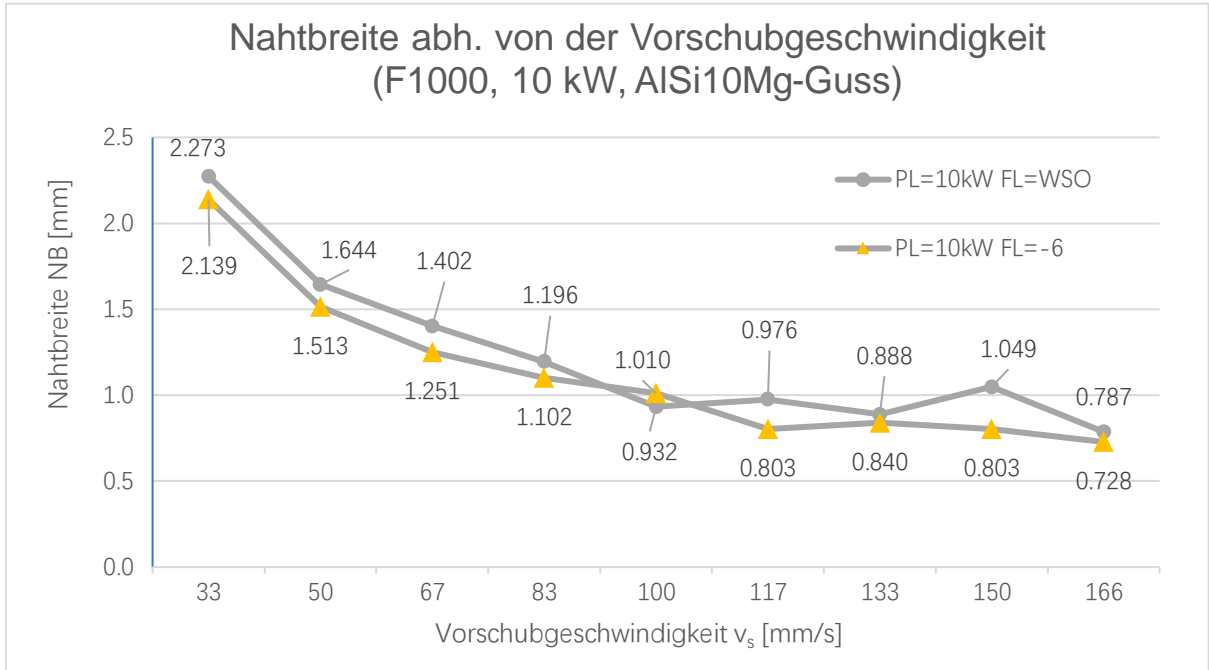


Diagramm 5 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AISi10Mg-Guss)

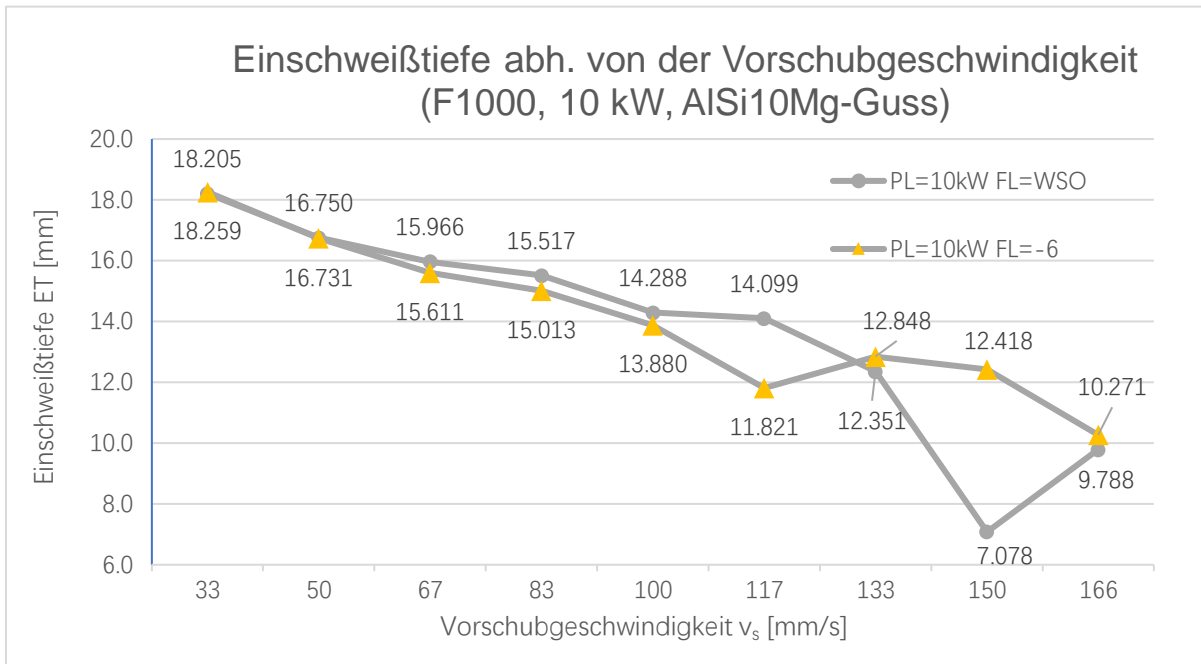


Diagramm 6 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AISi10Mg-Guss)

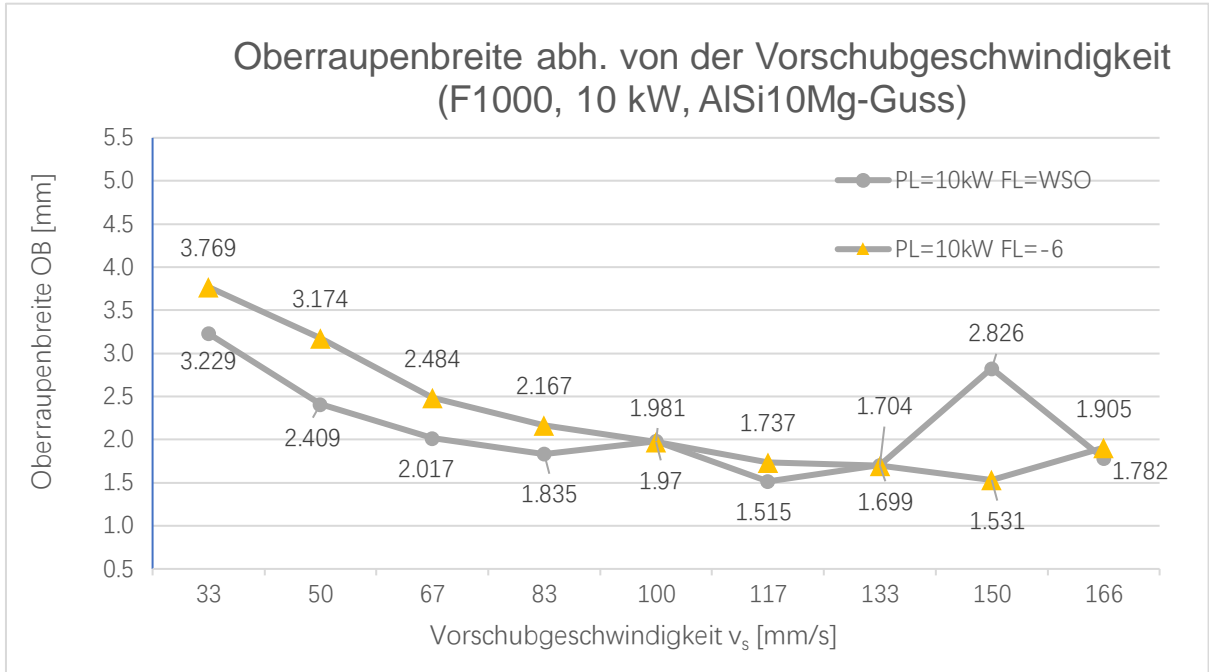


Diagramm 7 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss)

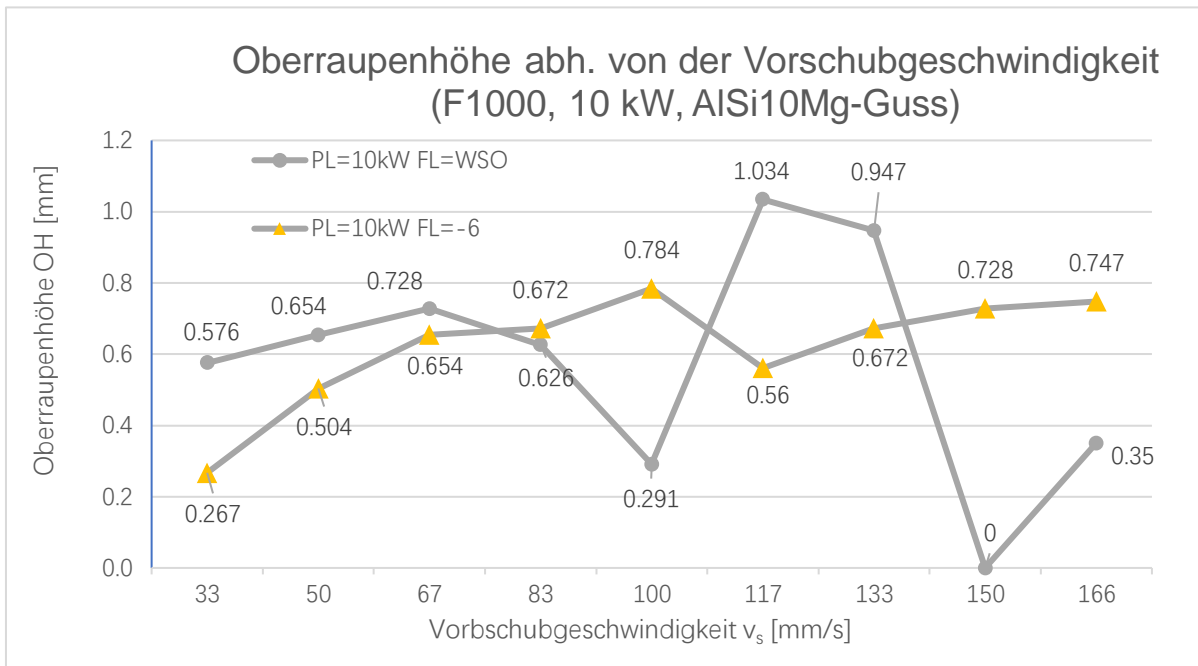


Diagramm 8 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, AlSi10Mg-Guss)

Die Nahtbreite nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Die Nahtbreite von FL = WSO ist größer als die Nahtbreite von FL: - 6 mm. Im Vergleich von Oberraupenbreite ist dies jedoch das Gegenteil. Die Oberraupenbreite von FL: - 6 mm ist größer als die des FL: WSO. In ähnlicher Weise nimmt die Oberraupenbreite mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Die Einschweißtiefe nimmt ab, wenn die Vorschubgeschwindigkeit zunimmt. Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Einschweißtiefe für die FL WSO und die FL – 6 mm nahezu gleich groß. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die Differenz zwischen den Einschweißiefen etwas zu, ist aber bei $v_s = 166 \text{ mm/s}$ nahezu gleich.

4.3.2. Beim pAM-ALSi10Mg Material

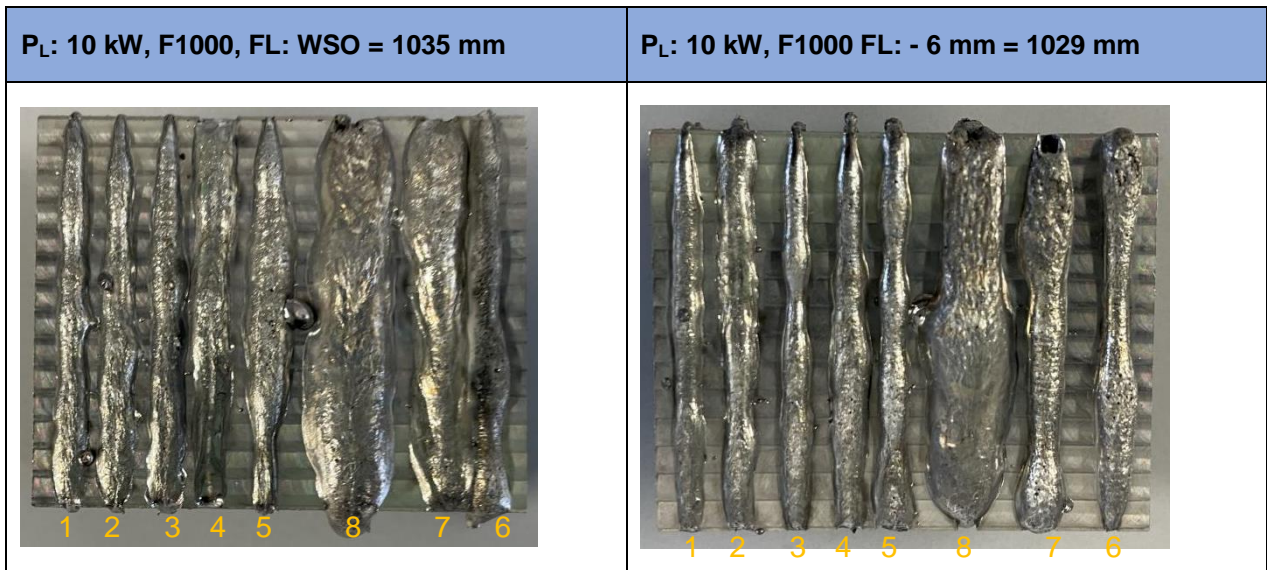


Abbildung 20 Schweißnahtoberraupen bei unterschiedliche FL für pAM-ALSi10Mg Material

Aus den Aufsichten von die Schweißproben ist zu sehen, dass wenn mit Fokusslage – 6 mm der Zustand des Oberraupen besser ist als bei Fokusslage WSO. Allerdings gibt es Probleme mit einer ungleichmäßigen Schweißnaht und rauerer Oberraupe. Mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit wird die ungleichmäßige Ansammlung von Materialien deutlicher. Die FL: - 6 mm ist bei hoher Vorschubgeschwindigkeit besser. (siehe FL: - 6 mm, v_s = 166 – 100 mm/s, Nr. 1 - 5). Mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit wird die Oberraupenbreite generell breiter.

P_L: 10 kW, F1000,
FL: -6mm = 1029 mm
ALSi10Mg-Laser geschnitten pAM

	1	2	3	4	5	6	7	8
Vs [mm/s]	166	150	133	117	100	83	67	33
ET. [mm]	5,928	6,991	8,258	3,102	6,525	12,090	5,462	12,366
NB. [mm]	1,165	1,122	1,123	2,708	1,318	1,398	1,879	3,570
OB. [mm]	3,03	3,699	3,758	4,471	5,098	3,131	5,505	7,952
OH. [mm]	1,034	1,049	1,413	0,99	1,515	1,835	1,325	1,966

Abbildung 21 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, pAM-AISi10Mg Material

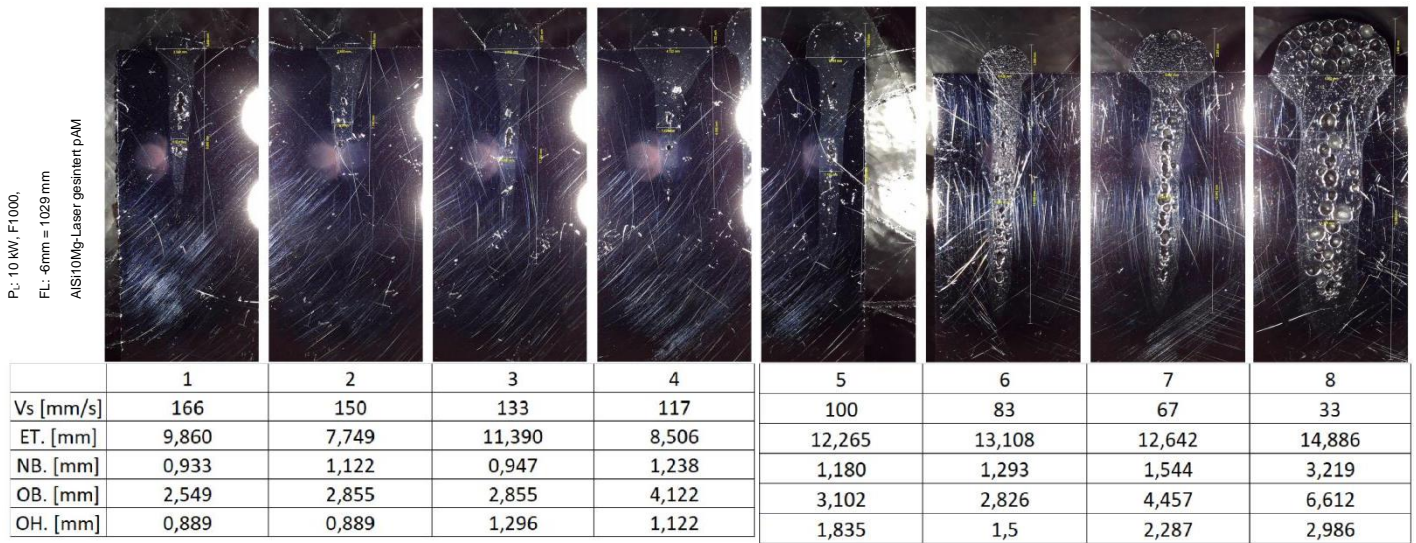


Abbildung 22 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: - 6 mm = 1029 mm, pAM-AISi10Mg Material

Im Vergleich der Querschliffe ist zu sehen, dass bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten die Porengröße größer ist als bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Porenhäufigkeit und die Porengröße von FL: - 6 mm kleiner als die von FL: WSO. (siehe Querschliffen $v_s = 166 - 100$ mm/s).

Aber bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Situation umgekehrt. (siehe Querschliffe $v_s = 83 - 33$ mm/s) Aus den Querschliffen beim pAM-AISi10Mg Material ist zu sehen, dass bei höheren Schweißgeschwindigkeiten die Poren perlenkettenartig in der Schweißnahtmitte angeordnet waren. Mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit sammeln sich die Poren allmählich in der Oberraupe. Bei langsamer Schweißgeschwindigkeit sammelten sich die Poren in der Oberraupe sowie in der Nahtwurzel und die Poren sind dicht in einer Wabenform angeordnet.

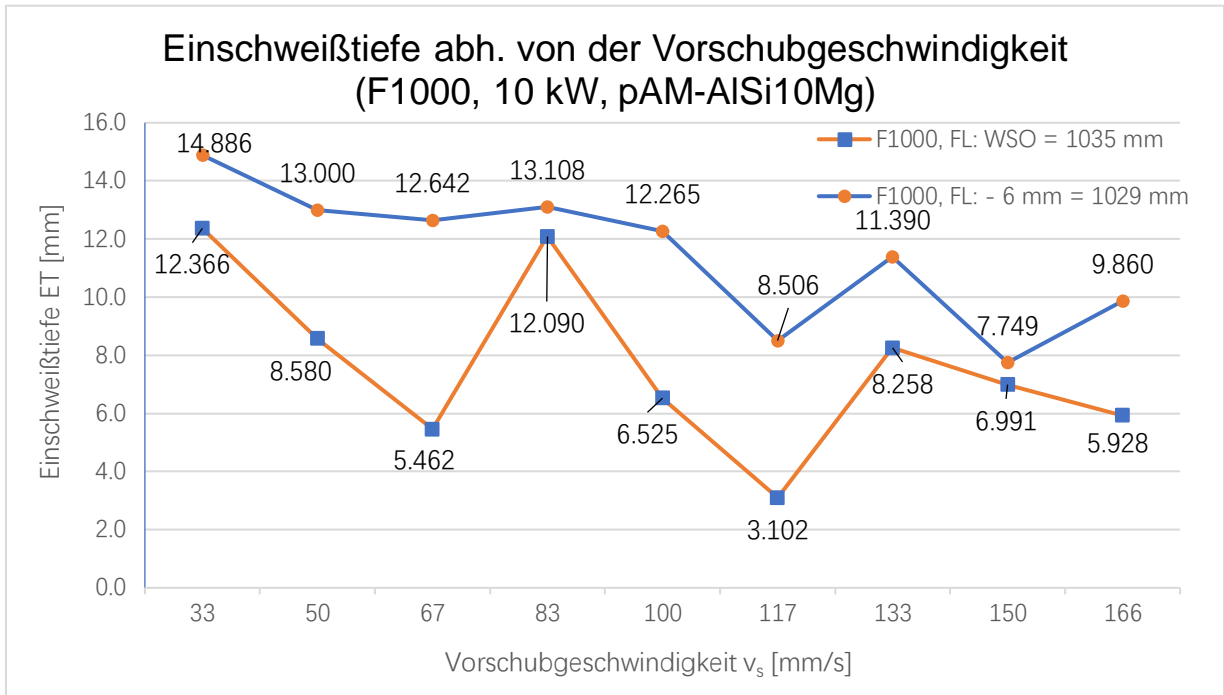


Diagramm 9 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AISi10Mg)

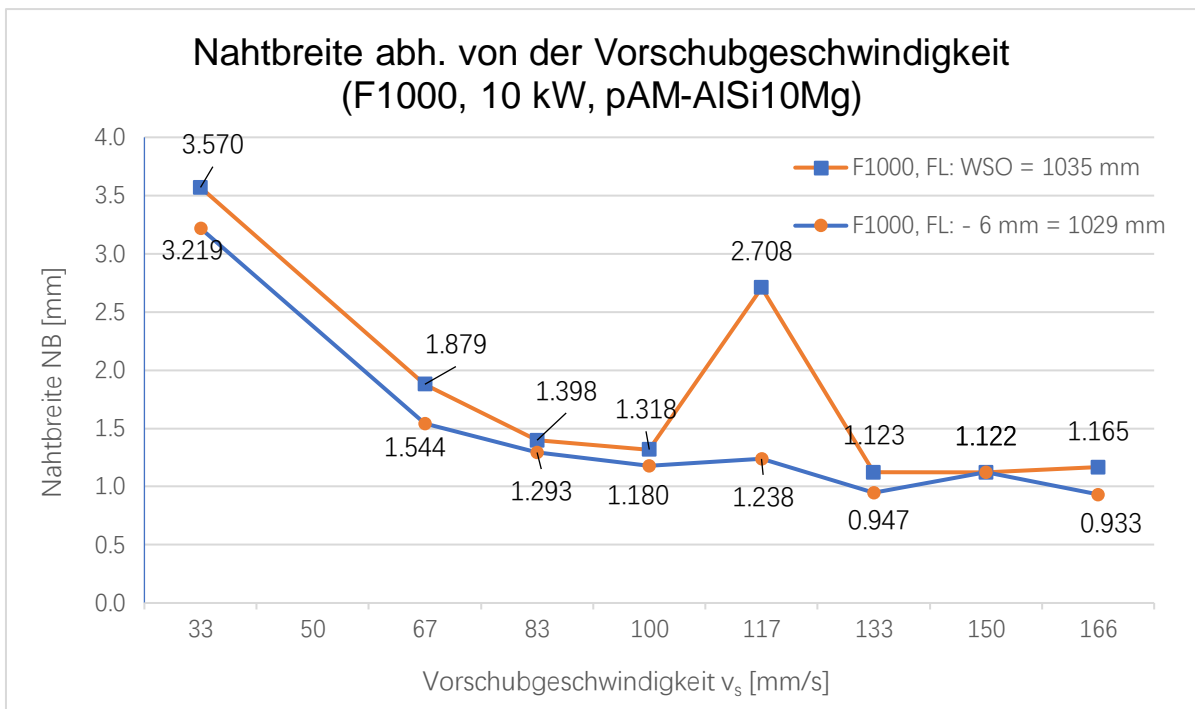


Diagramm 10 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AISi10Mg)

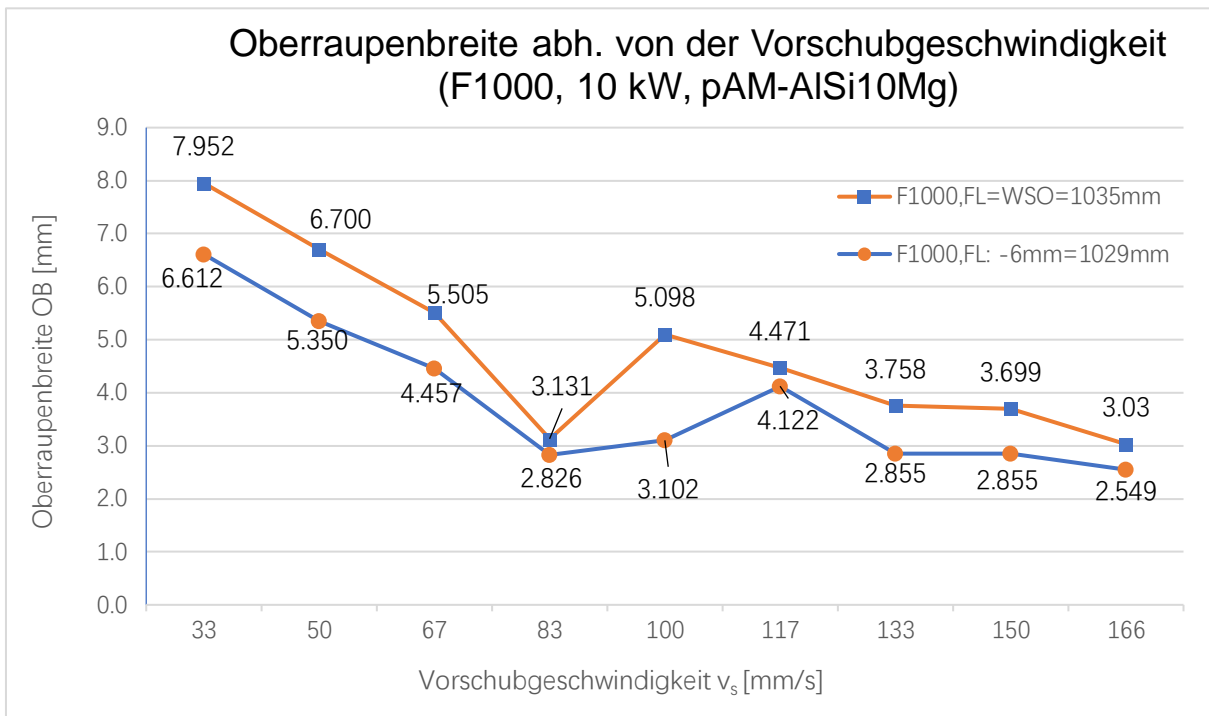


Diagramm 11 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AISi10Mg)

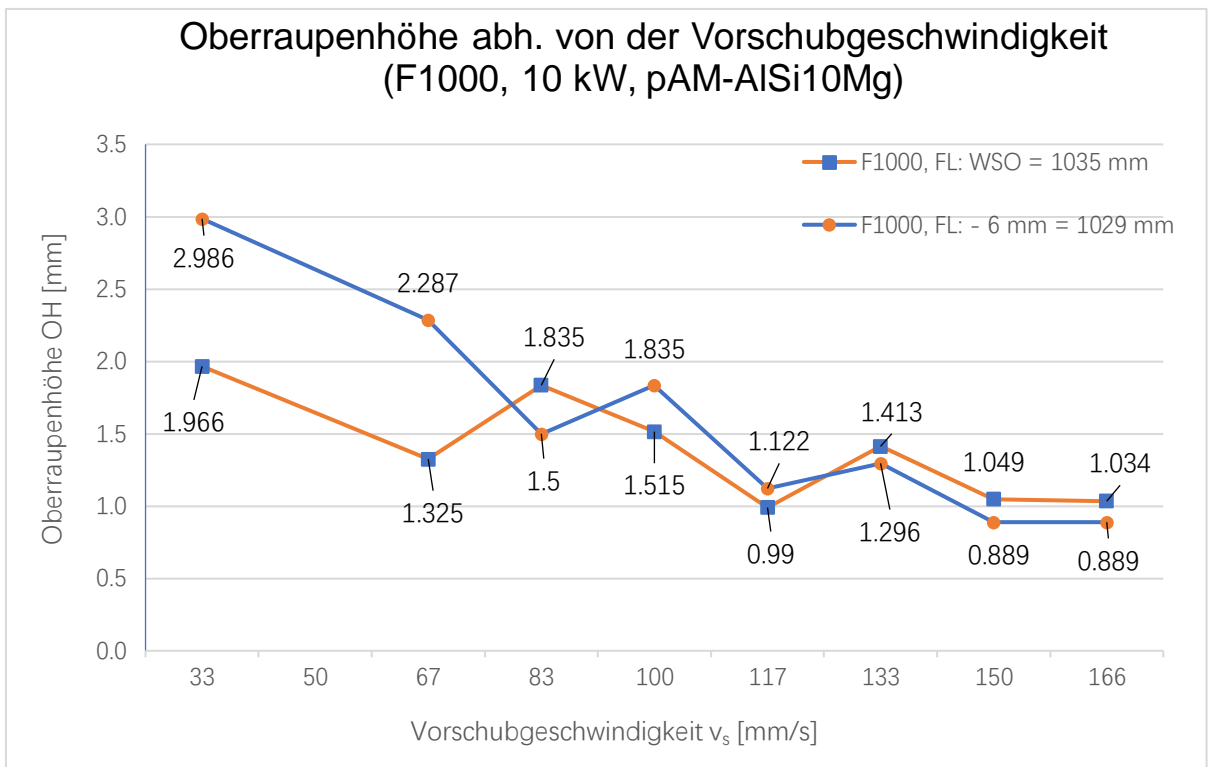


Diagramm 12 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, pAM-AISi10Mg)

Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Schweißergebnisse mit der Vorschubgeschwindigkeit variieren. Die Nahtbreite, Oberrautenbreite, Einschweißtiefe und Oberrautenhöhe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Die Einschweißtiefe von FL: - 6 mm ist größer als die von FL: WSO. Die Nahtbreite und Oberrautenbreite von FL: - 6 mm sind kleiner als die von FL: WSO. Die Veränderungen der Oberrautenhöhe sind etwas ganz Besonderes. Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten ($v_s = 33 - 67 \text{ mm/s}$) ist die Oberrautenhöhe von FL: - 6 mm deutlich größer als FL: WSO. Bei den Vorschubgeschwindigkeiten von $83 - 117 \text{ mm/s}$ sind die Oberrautenhöhen unterschiedlich. Bei noch höherer Vorschubgeschwindigkeit ist die Oberrautenhöhe von FL: - 6 mm etwas kleiner als bei FL: WSO.

4.4. Vergleich der Versuchsergebnisse bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material.

Tabelle 11 Versuche zum Vergleich bei gleichen Schweißbedingungen für AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material: AlSi10Mg-
Probe 2 A Nr.1-10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	Guss
Probe 24 Nr. 1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe 2 B Nr. 11-19	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	Guss
Probe 22 Nr. 1-8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	pAM

Dieser Abschnitt wird ausgewertet, wenn andere Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Brennweite, Laserleistungen gleichbleiben, sich die Änderung des Materials AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material auf das Schweißergebnis von FL: WSO und FL: - 6 mm auswirkt.

4.4.1. Vergleich der Ergebnisse mit Fokuslage: WSO

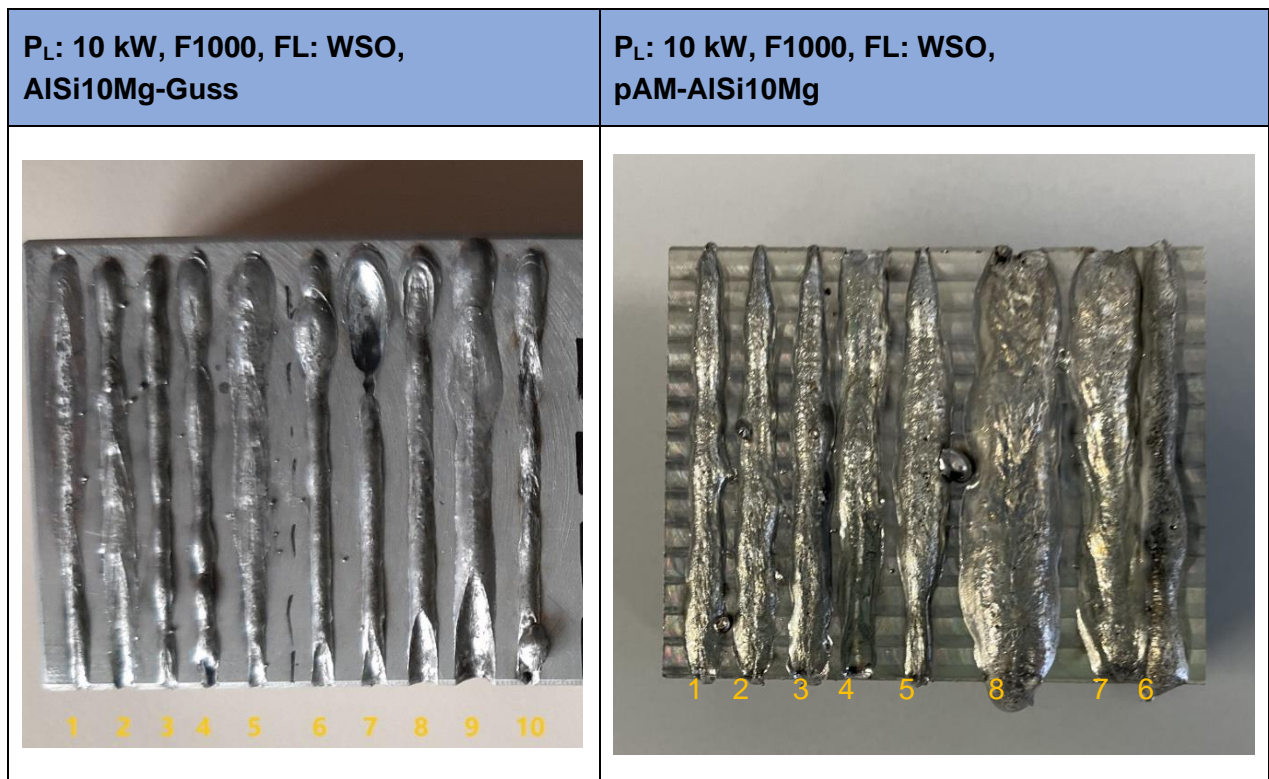


Abbildung 23 Schweißnahtoberrauen bei unterschiedlichem Material für FL: WSO

Aus den Aufsichten der Schweißproben ist zu sehen, dass die Oberrauenbreite mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit breiter wird. Im Vergleich zur die Oberrauen von AlSi10Mg-Guss ist die Oberfläche der Oberrauen von pAM-AlSi10Mg Material rauher und ungleichmäßiger. Beim Guss-Material war bei der Vorschubgeschwindigkeit von 117 mm/s eine ungleichmäßige Oberraupe festzustellen (Nr. 7 und 10 linkes Bild). Beim pAM-AlSi10Mg Material hat die Nr. 4 partiell Nahteinfall.

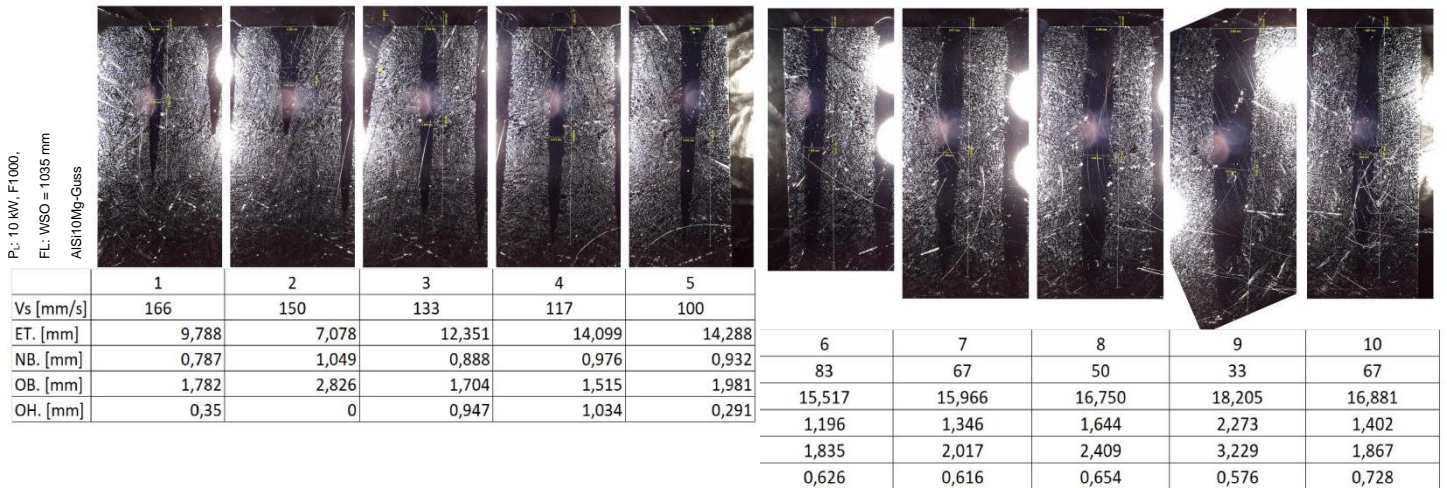


Abbildung 24 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, AlSi10Mg-Guss

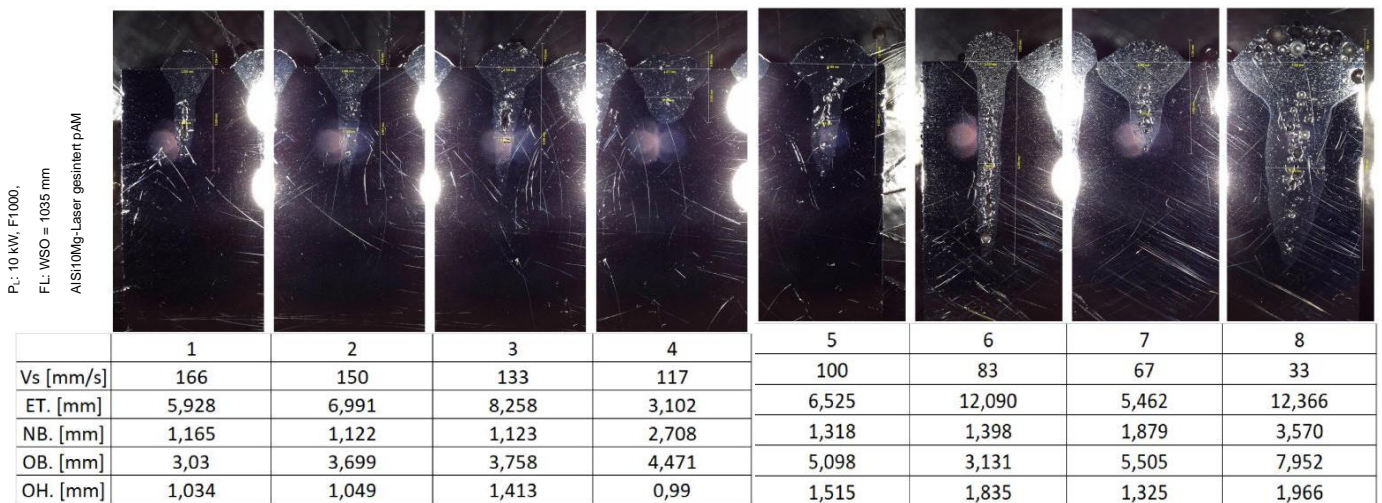


Abbildung 25 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm, pAM-AlSi10Mg Material

Aus den Querschliffen von pAM-AlSi10Mg Material ist zu sehen, dass bei höheren Schweißgeschwindigkeiten die Poren perlenkettenartig in der Schweißnahtmitte angeordnet waren. Bei langsamer Schweißgeschwindigkeit sammelten sich die Poren in der Oberraupe sowie in der Nahtwurzel.

Aus den Querschliffen von pAM-AlSi10Mg Material geht hervor, dass die Porenhäufigkeit und Porengröße in Querschliffen viel höher sind. Da die Schweißbedingungen der Proben der beiden Materialien gleich sind, kann beurteilt werden, dass der Unterschied in der Porenhäufigkeit durch das Material selbst verursacht wird.

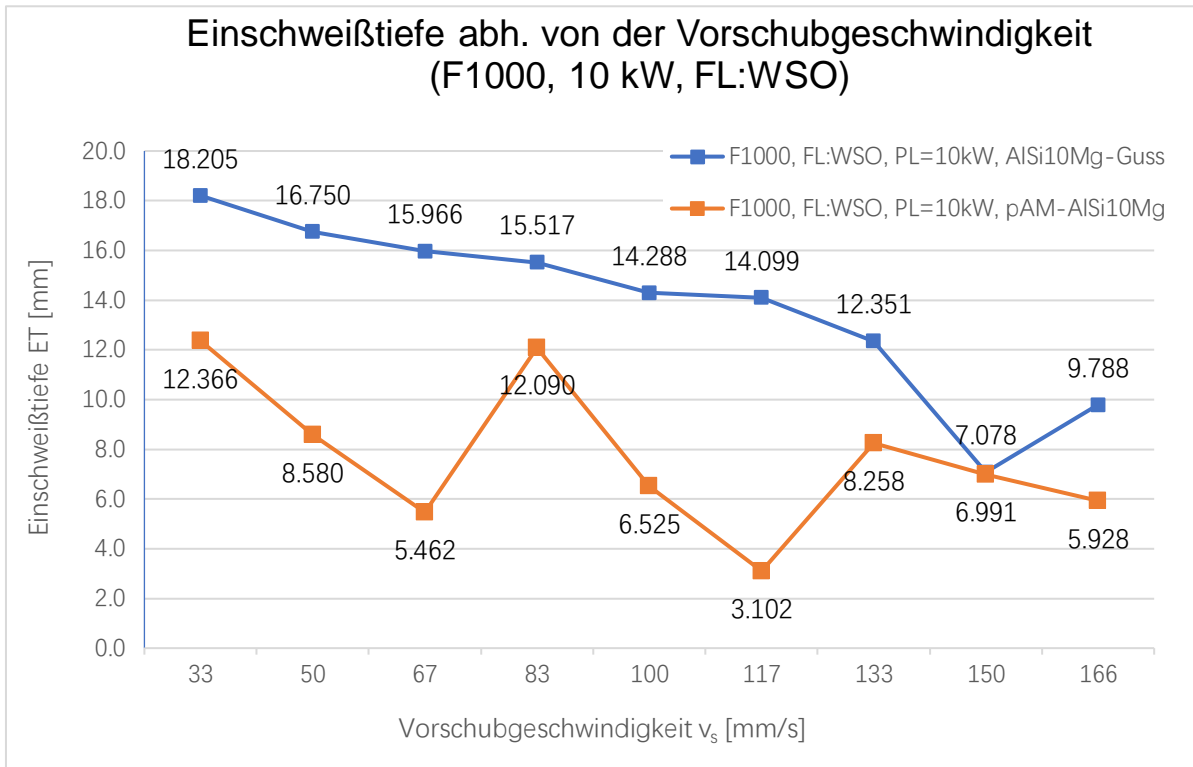


Diagramm 13 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO)

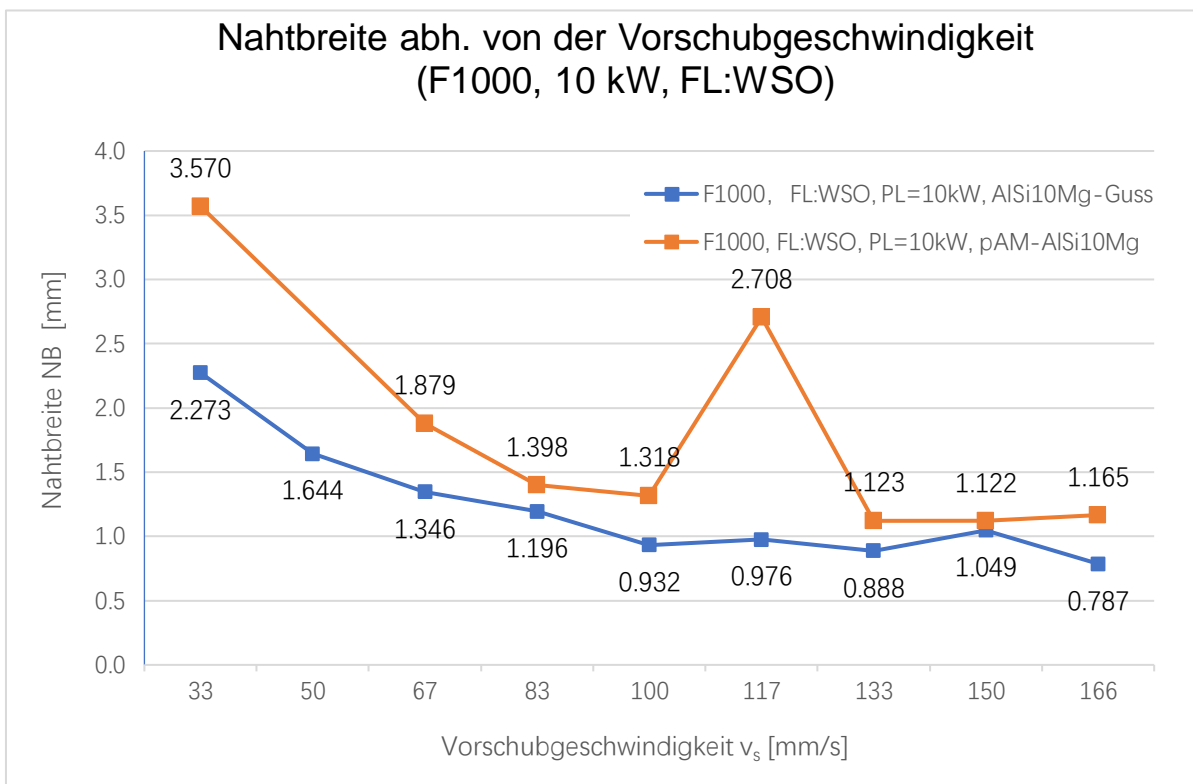


Diagramm 14 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO)

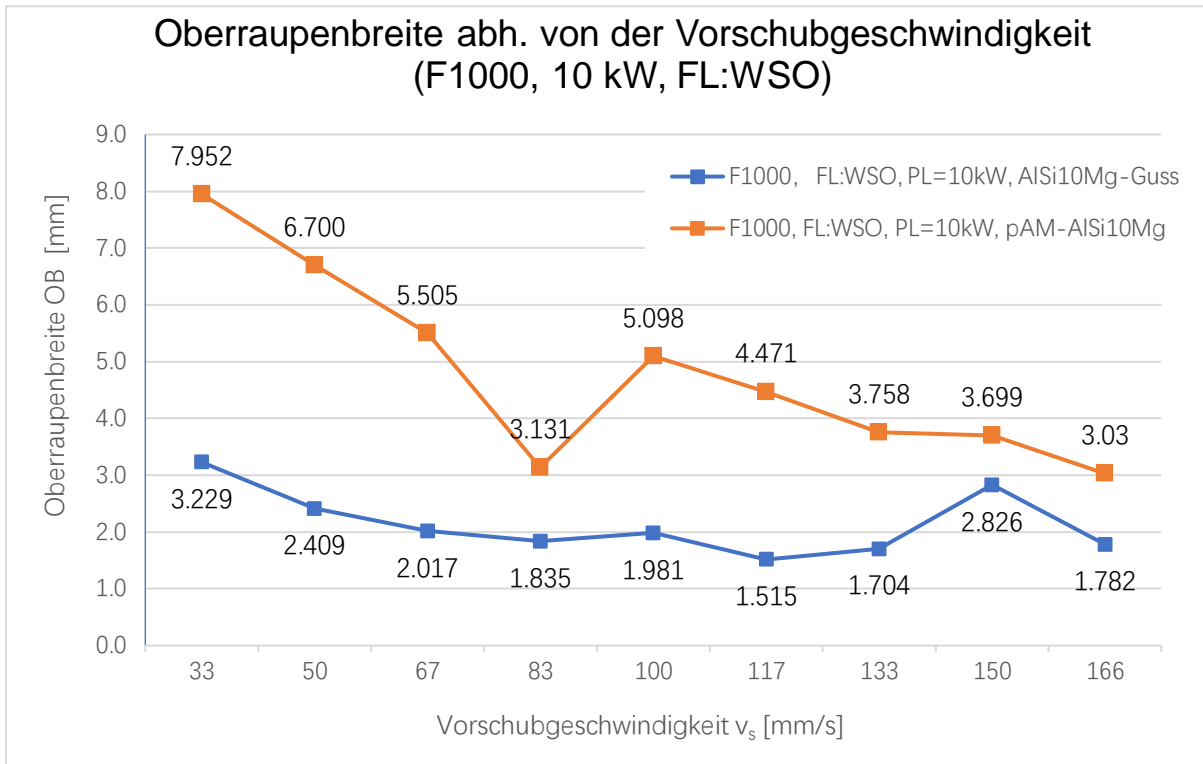


Diagramm 15 Oberrautenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO)

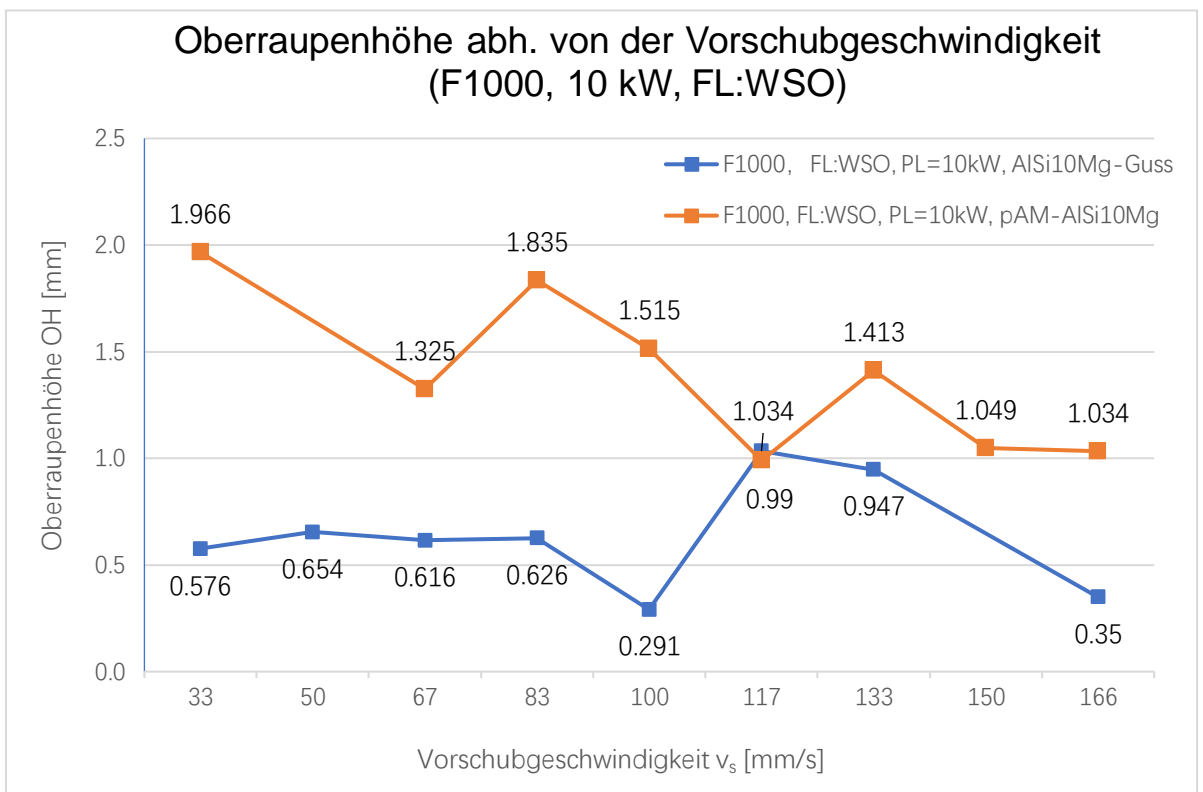


Diagramm 16 Oberrautenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: WSO)

Die Nahtbreite, Oberraupenbreite und Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Aus den Diagrammen ist zu sehen, dass die Einschweißtiefe von AlSi10Mg-Guss größer ist, als die von pAM-AlSi10Mg Material. Die Proben von pAM-AlSi10Mg Material haben eine größere Naht- und Oberraupenbreite. Über die Oberraupenhöhe kann festgestellt werden, dass die Oberraupenhöhe des pAM-AlSi10Mg Materials mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Aber die Oberraupenhöhe beider Materialien in $v_s = 83 - 117 \text{ mm/s}$ schwankt stark.

4.4.2. Vergleich der Ergebnisse mit Fokuslage: - 6 mm

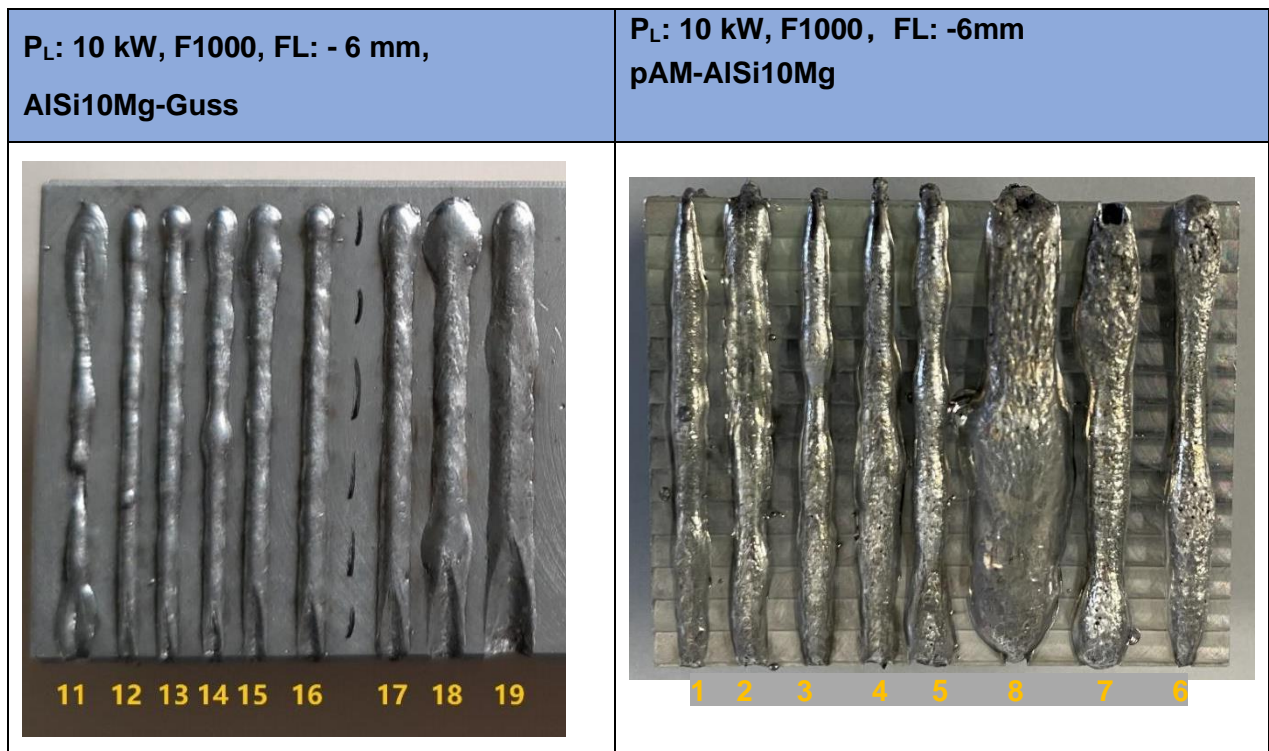


Abbildung 26 Schweißnahtoberraupen bei unterschiedlichem Material für FL: - 6 mm

Aus den Aufsichten der Schweißproben ist zu sehen, dass die Oberraupenbreite breiter wird, wenn die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Im Vergleich zu den Oberraupen von AlSi10Mg-Guss sind die Oberfläche der Oberraupen von pAM-AlSi10Mg rauer und ungleichmäßiger. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 166 mm/s ist die Oberraupe beim AlSi10Mg-Guss ungleichmäßig. (siehe AlSi10Mg-Guss Nr. 11). Die anderen Schweißoberraupen von AlSi10Mg-Guss sind gleichmäßig. Die Oberraupen beim pAM-Material zeigen teilweise Humping-Effekte.

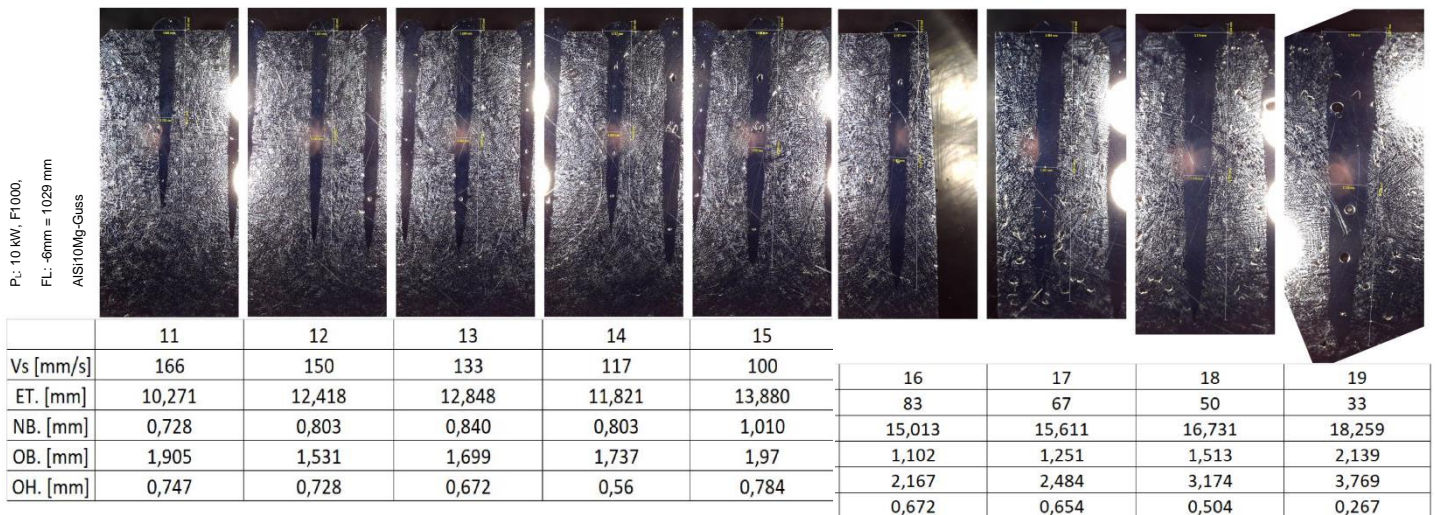


Abbildung 27 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: -6 mm = 1029 mm, AlSi10Mg-Guss

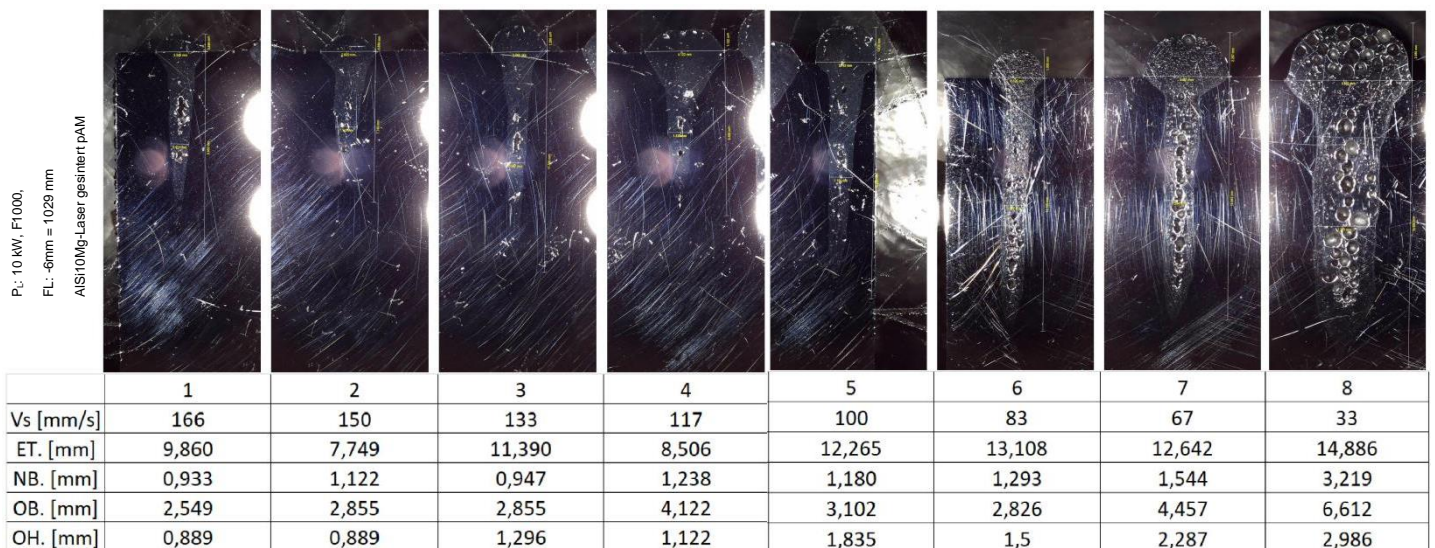


Abbildung 28 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: -6 mm = 1029 mm, pAM-AlSi10Mg Material

In den Querschliffen am pAM-Material ist zu sehen, dass bei höheren Schweißgeschwindigkeiten die Poren perlenkettenartig in der Schweißnahtmitte angeordnet waren. Bei langsamer Schweißgeschwindigkeit sammelten sich die Poren in der Oberraupe sowie in der Nahtwurzel an.

Im Vergleich der beiden Materialien ist zu erkennen, dass die Porenhäufigkeit und Porengröße in Querschliffen von pAM-AlSi10Mg Material viel höher ist. Da die Schweißbedingungen der Proben der beiden Materialien gleich waren wird beurteilt, dass der Unterschied in der Porenhäufigkeit durch das Material selbst verursacht wird.

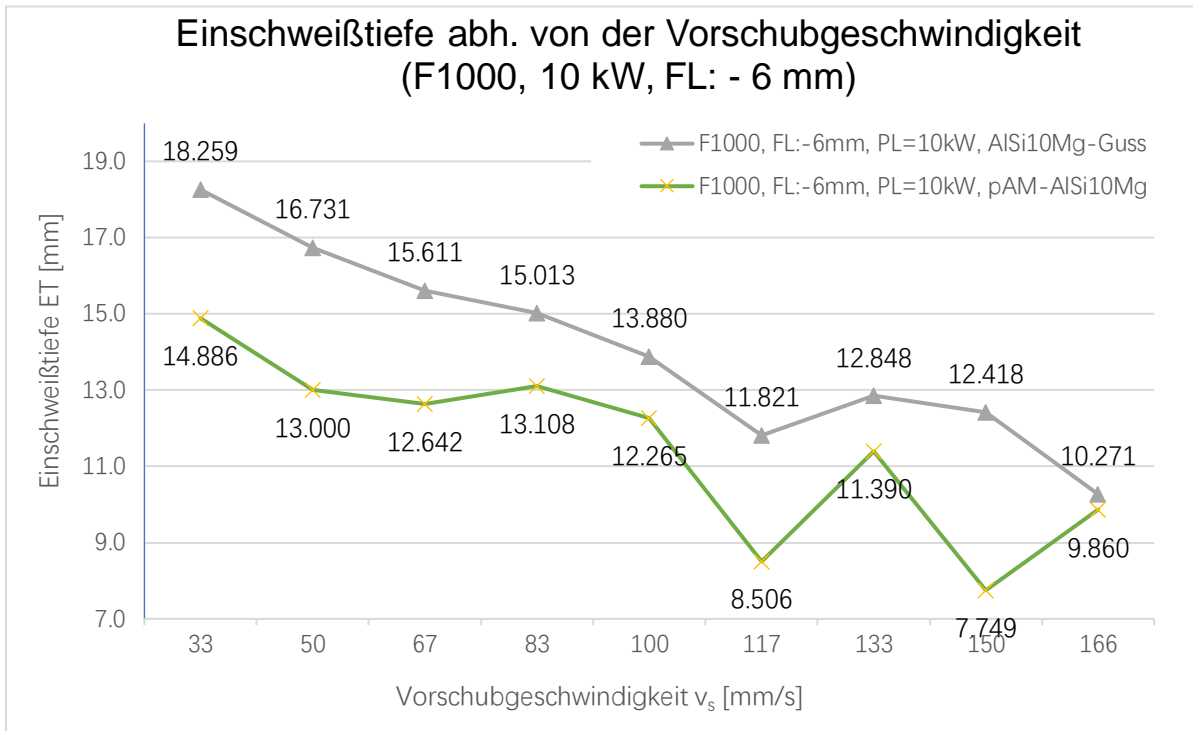


Diagramm 17 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)

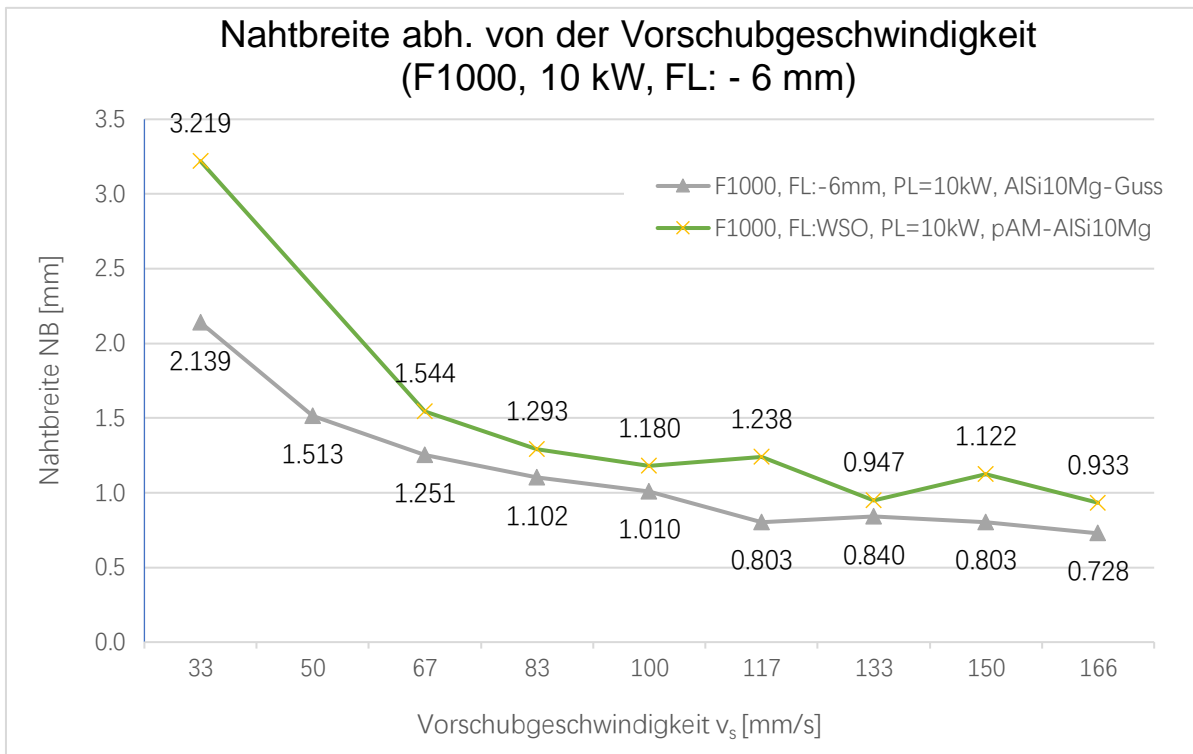


Diagramm 18 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)

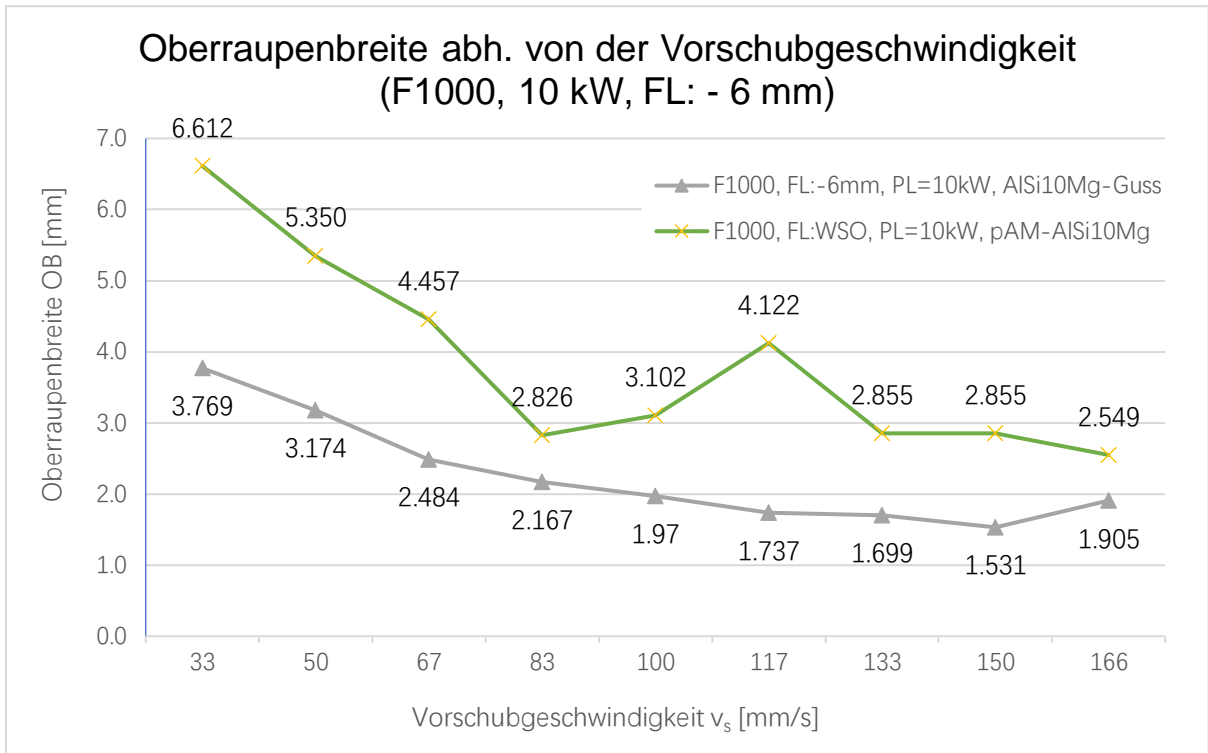


Diagramm 19 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)

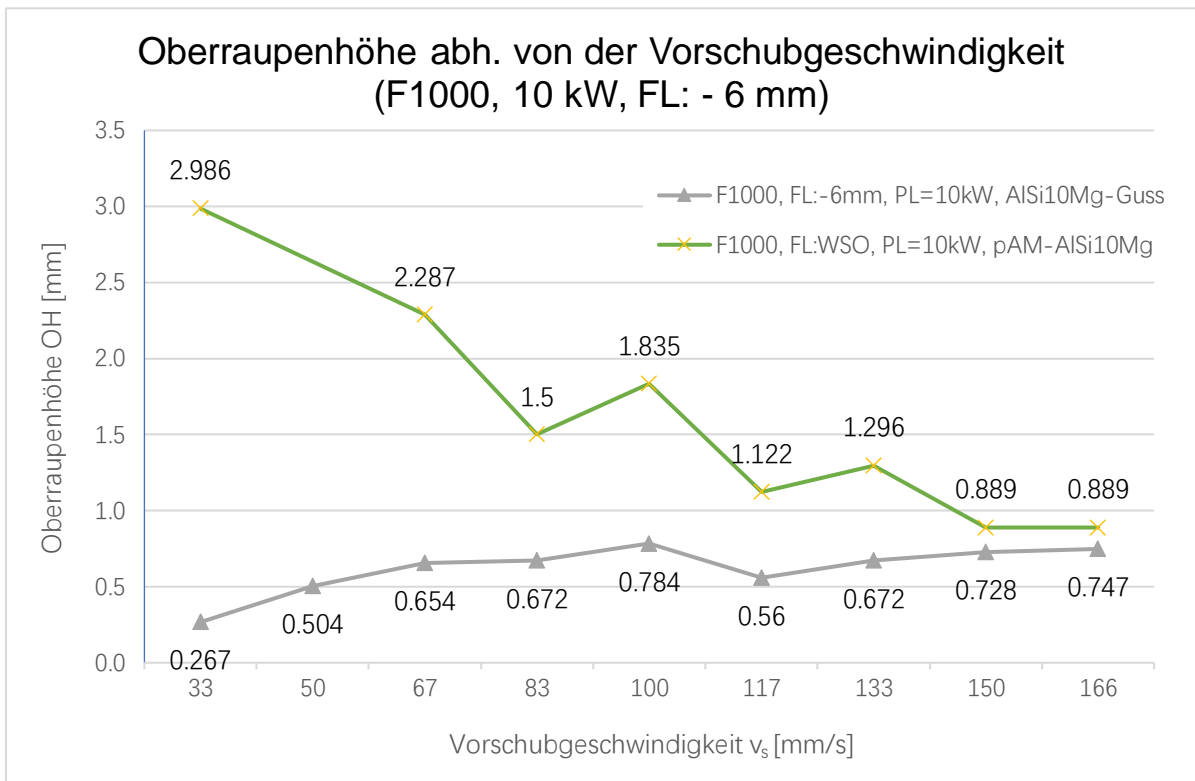


Diagramm 20 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (F1000, 10 kW, FL: - 6 mm)

Die Nahtbreite, Oberraupenbreite und Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Aus den Diagrammen ist zu sehen, dass die Einschweißtiefe von AlSi10Mg-Guss größer ist als die von pAM-Material. Die pAM-Proben haben eine größere Nahtbreite und Oberraupenbreite. Über die Oberraupenhöhe kann festgestellt werden, dass die Oberraupenhöhe beim pAM-Material mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit abnimmt und die Oberraupenhöhe bei $v_s = 83 - 133$ mm/s schwankend ist. Beim AlSi10Mg-Guss nimmt die Oberraupenhöhe mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zu.

4.5. Vergleich der Schweißergebnisse an AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material für verschiedene Brennweiten

Tabelle 12 Versuche zu Vergleich der Schweißergebnisse mit verschiedenen Brennweiten an pAM-AlSi10Mg Material

Probe Nr.	Laserleistung P_L [kW]	Vorschubgeschwindigkeit V_s [mm/s]	Brennweite [mm]	Fokusslage [mm]	Material
Probe 2B Nr.1-10	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	-6	Guss
Probe 5b Nr. 1 - 9	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1500	-6	Guss
Probe24 Nr.1 - 8	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1000	WSO	pAM
Probe25 Nr. 1 - 9	10	166, 150, 133, 117, 100, 83, 67, 33	F1500	WSO (-1) *	pAM

* das Produkt von Probe 25 1 mm dicker war als gedacht

In dieser Auswertung werden die Auswirkungen gezeigt, wie sich die Änderung der Brennweite (F1000 und F1500) auf das Schweißergebnis auswirkt, bei sonst vergleichbaren Prozessparametern wie Vorschubgeschwindigkeit, Fokusslage, Laserleistungen und Material. Die Prozessparameter und Querschnitte stammen aus der Diplomarbeit von Herr Tim Langer.

4.5.1. Ergebnisse beim pAM-AISi10Mg Material

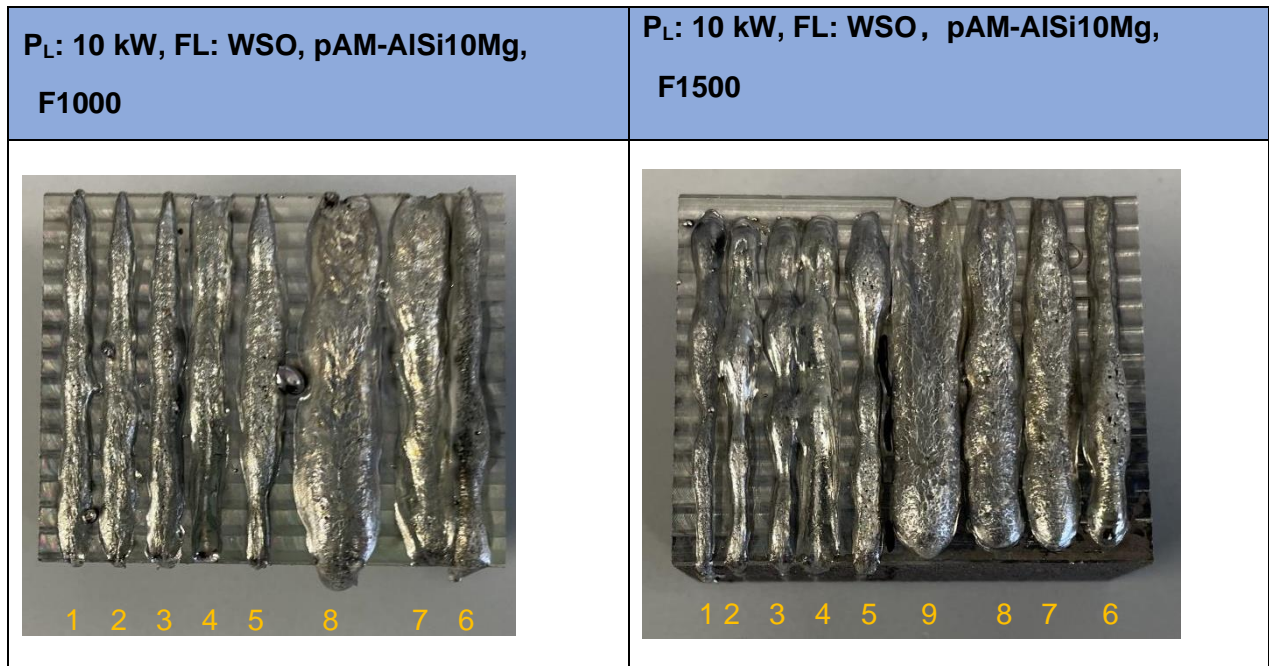



Abbildung 29 Schweißnahtoberraupen bei unterschiedlichen Brennweiten für pAM-AISi10Mg Material

Aus den Aufsichten der Schweißproben ist zu sehen, dass die Oberraupenbreite breiter wird, wenn die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Die Oberflächen der Oberraupen beim pAM-AISi10Mg Material sind rau und ungleichmäßig. Dieses Phänomen ist bei F1500 offensichtlicher als bei F1000. Die Oberraupen von F1500 trat Humping-Effekts bei hohen Vorschubgeschwindigkeit ($v_s = 166 - 100 \text{ mm/s}$) auf. Und es gibt ungleichmäßige Ansammlung von Materialien. Und bei den Oberraupen von F1500 sind die Materialansammlungen am Spuranfang und es fehlt Material am Spurende (Spur Nr. 9 Bild rechts).

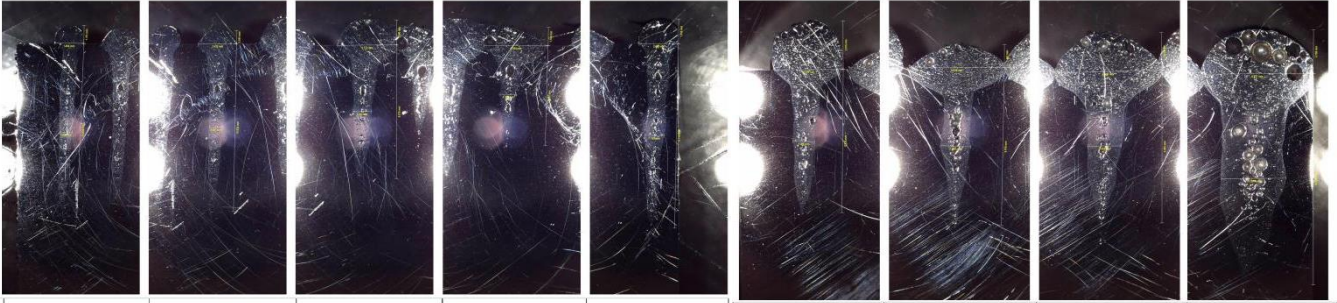
PL: 10 kW, F1000,
FL: WSO
AlSi10Mg-Laser gesintert PAM



	1	2	3	4	5	6	7	8
Vs [mm/s]	166	150	133	117	100	83	67	33
ET. [mm]	5,928	6,991	8,258	3,102	6,525	12,090	5,462	12,366
NB. [mm]	1,165	1,122	1,123	2,708	1,318	1,398	1,879	3,570
OB. [mm]	3,03	3,699	3,758	4,471	5,098	3,131	5,505	7,952
OH. [mm]	1,034	1,049	1,413	0,99	1,515	1,835	1,325	1,966

Abbildung 30 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: WSO, pAM-AISi10Mg Material

PL: 10 kW, F1500,
FL: WSO
AlSi10Mg-Guss



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vs [mm/s]	166	150	133	117	100	83	67	50	33
ET. [mm]	11,034	10,634	8,476	6,352	11,712	8,928	9,818	9,496	13,137
NB. [mm]	0,787	0,831	1,151	1,034	1,225	1,335	1,980	2,083	4,026
OB. [mm]	1,864	2,432	3,772	4,064	2,565	4,297	5,928	6,734	6,977
OH. [mm]	1,151	0,845	1,588	1,165	1,558	3,015	1,442	2,331	2,709

Abbildung 31 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1500, FL: WSO, pAM-AISi10Mg-Material

Aus den Querschliffen von pAM-AISi10Mg Material ist zu sehen, dass bei höheren Schweißgeschwindigkeiten die Poren perlenkettenartig in der Schweißnahtmitte angeordnet waren. Bei langsamer Schweißgeschwindigkeit sammelten sich die Poren in der Oberraupe sowie in der Nahtwurzel an.

Aus den Querschliffen der zwei Brennweiten geht hervor, dass die Porenhäufigkeit und Porengröße in Querschliffen von F1000 höher sind.

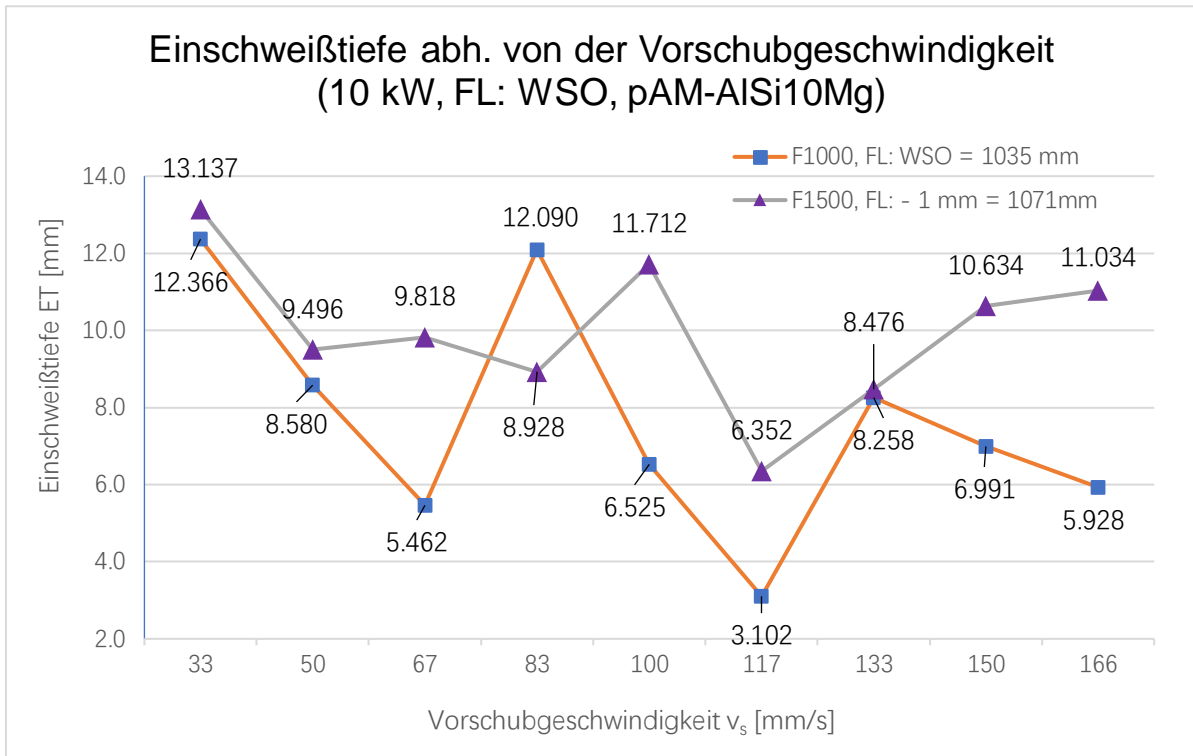


Diagramm 21 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg)

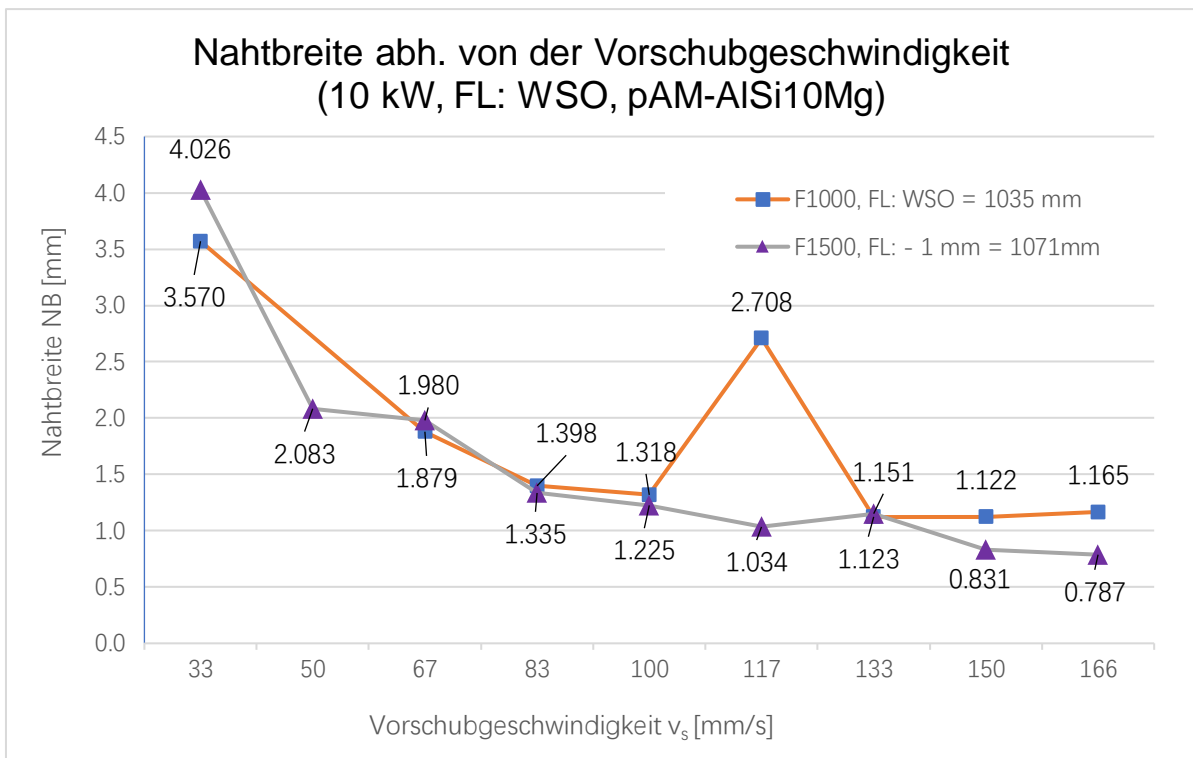


Diagramm 22 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg)

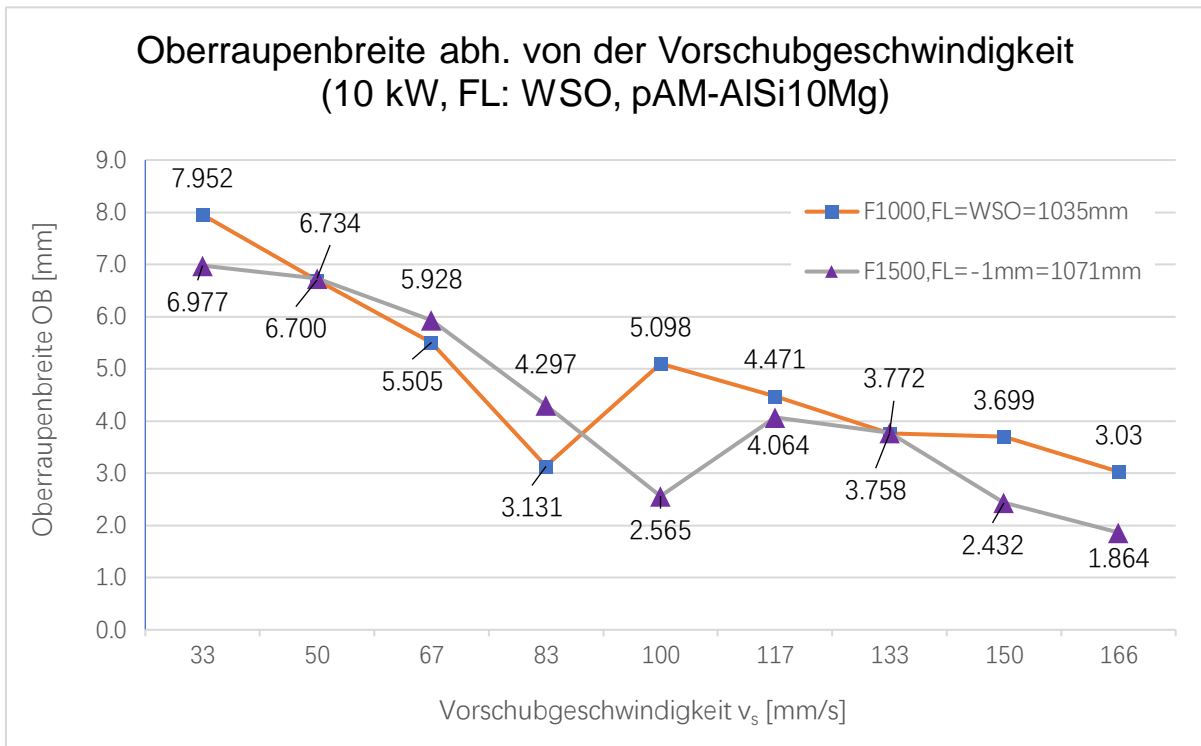


Diagramm 23 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg)

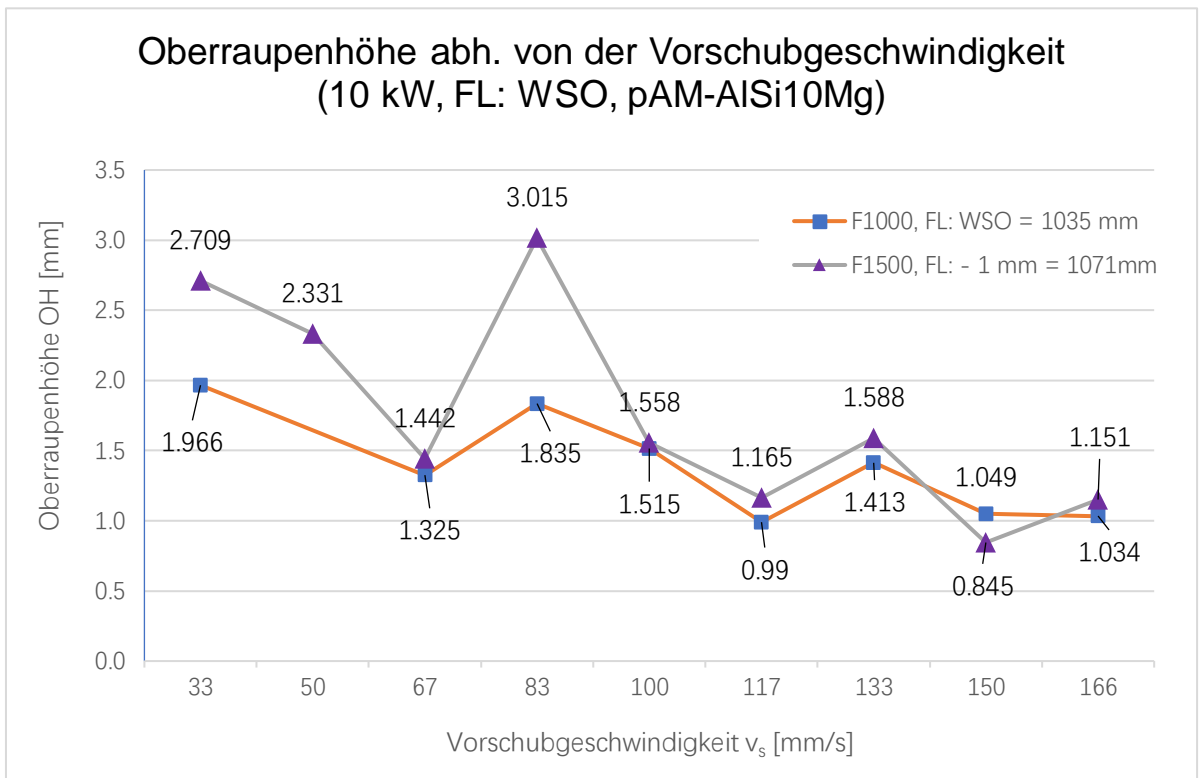


Diagramm 24 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: WSO, pAM-AISi10Mg)

Die Nahtbreite, Oberrautenbreite und Oberrautenhöhe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. In Bezug auf die Einschweißtiefe sind die Änderungen jedoch komplizierter. Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Einschweißstiefen von F1000 in $v_s = 67 - 133 \text{ mm/s}$ stark schwanken und die von F1500 für die $v_s = 83 - 133 \text{ mm/s}$ schwanken. Die Einschweißtiefe von F1500 ist größer als die von F1000. Aber die Nahtbreite ist das Gegenteil, die Nahtbreite von F1000 ist größer als bei F1500. Die Daten sind jedoch sehr ähnlich. Bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s = 33 - 83 \text{ mm/s}$ ist die Oberrautenbreite von F1000 kleiner als die von F1500. Bei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_s = 100 - 166 \text{ mm/s}$ ist die Oberrautenbreite bei F1000 größer als die bei F1500. Die Oberrautenhöhe ist bei F1500 größer als bei F1000.

4.5.2. Ergebnisse beim AlSi10Mg-Guss

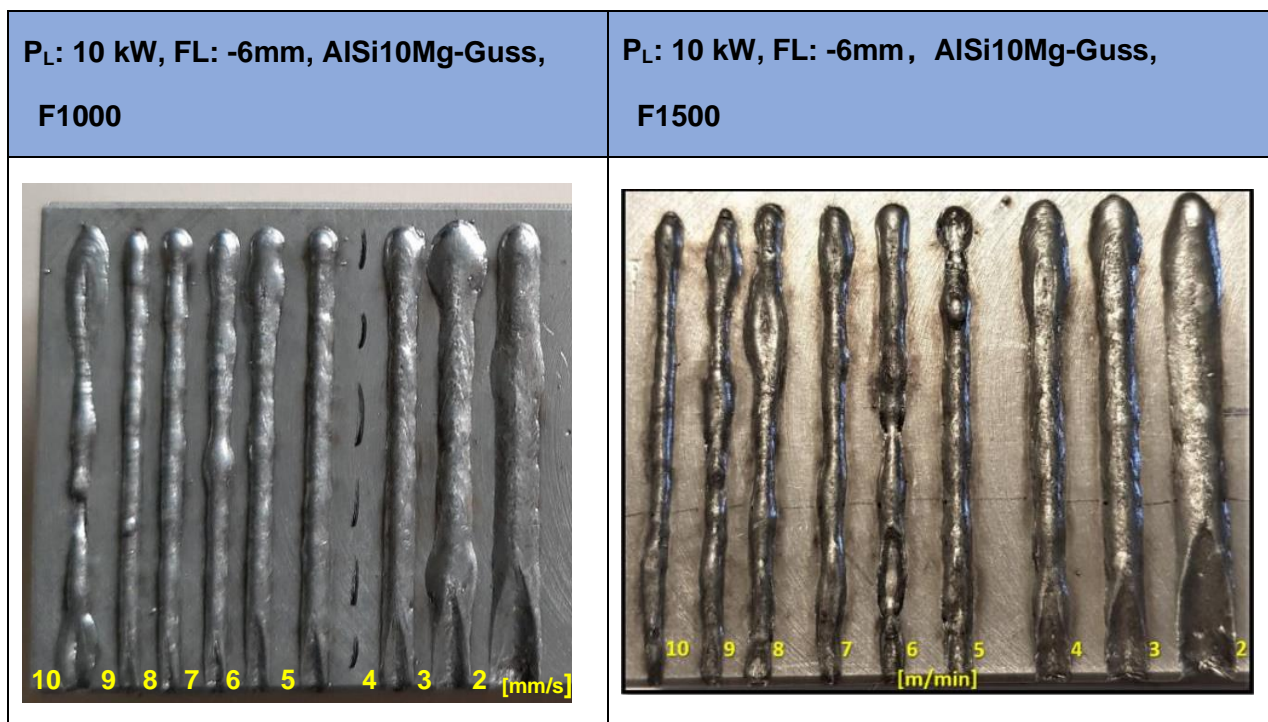


Abbildung 32 Schweißnahtoberrauten bei unterschiedlichen Brennweiten für AlSi10Mg-Guss

Aus den Aufsichten von die Schweißproben ist zu erkennen, dass die Oberrautenbreite breiter wird als die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Die Oberrauten von F1000 sind gleichmäßiger als die Oberrauten von F1500. Bei den Oberrauten von F1500 trat bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ($v_s = 83 - 166 \text{ mm/s}$) Humping-Effekt auf.

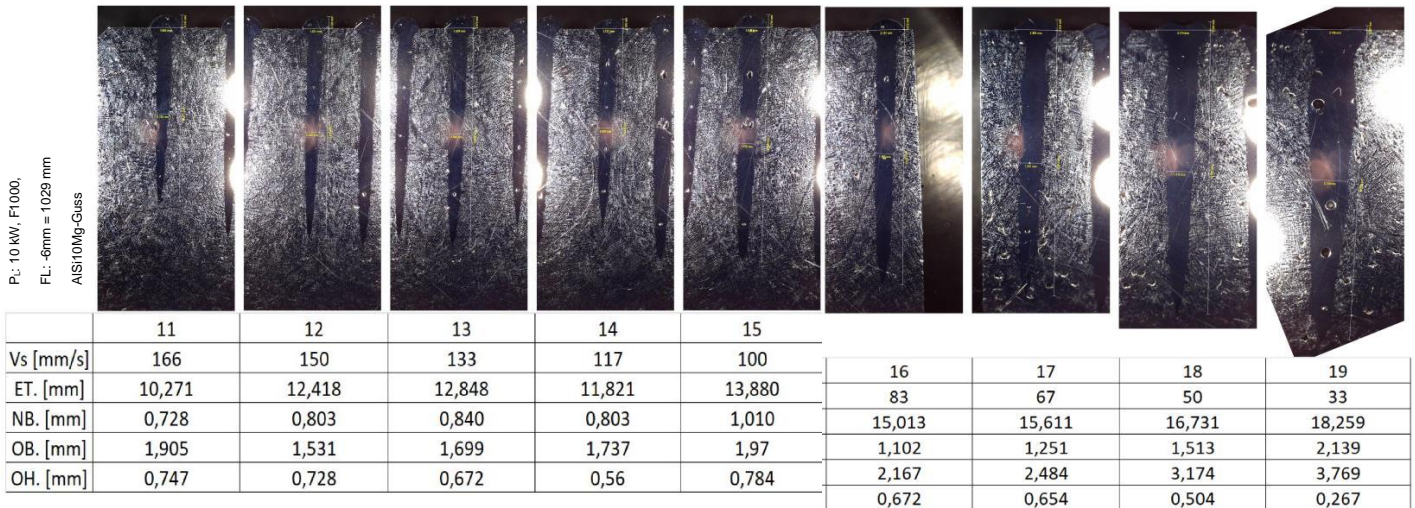


Abbildung 33 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1000, FL: -6 mm = 1029 mm, AISI10Mg-Guss

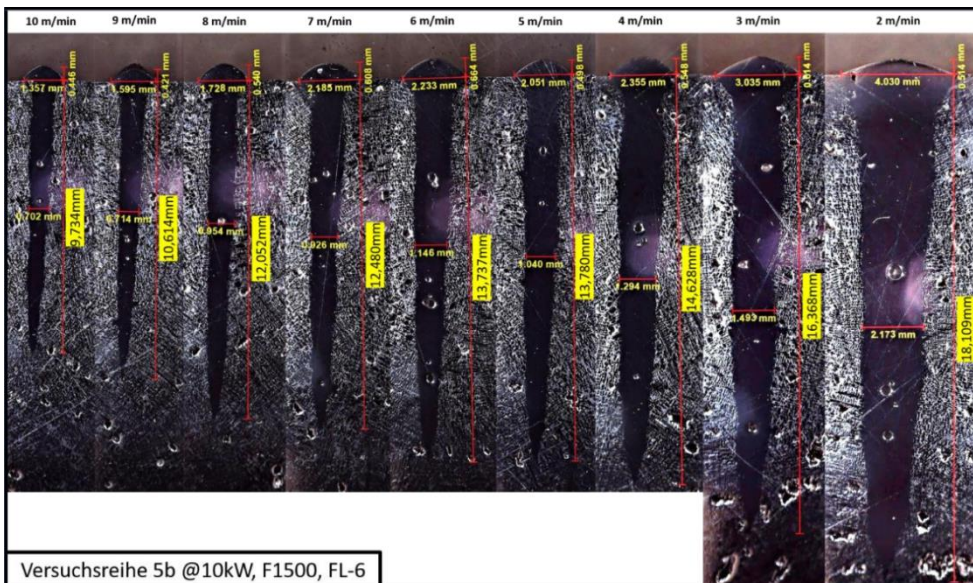


Abbildung 34 Querschliff und Prozessparameter: PL: 10 kW, F1500, FL: -6 mm = 1566 mm, AISi10Mg-Guss [40]

Aus den Querschliffen von Guss-Material ist zu sehen, dass die Poren in der Schweißnahtmitte verstreut anzufinden sind. Für die Guss-Material ist die Porenhäufigkeit und Porengröße kleiner.

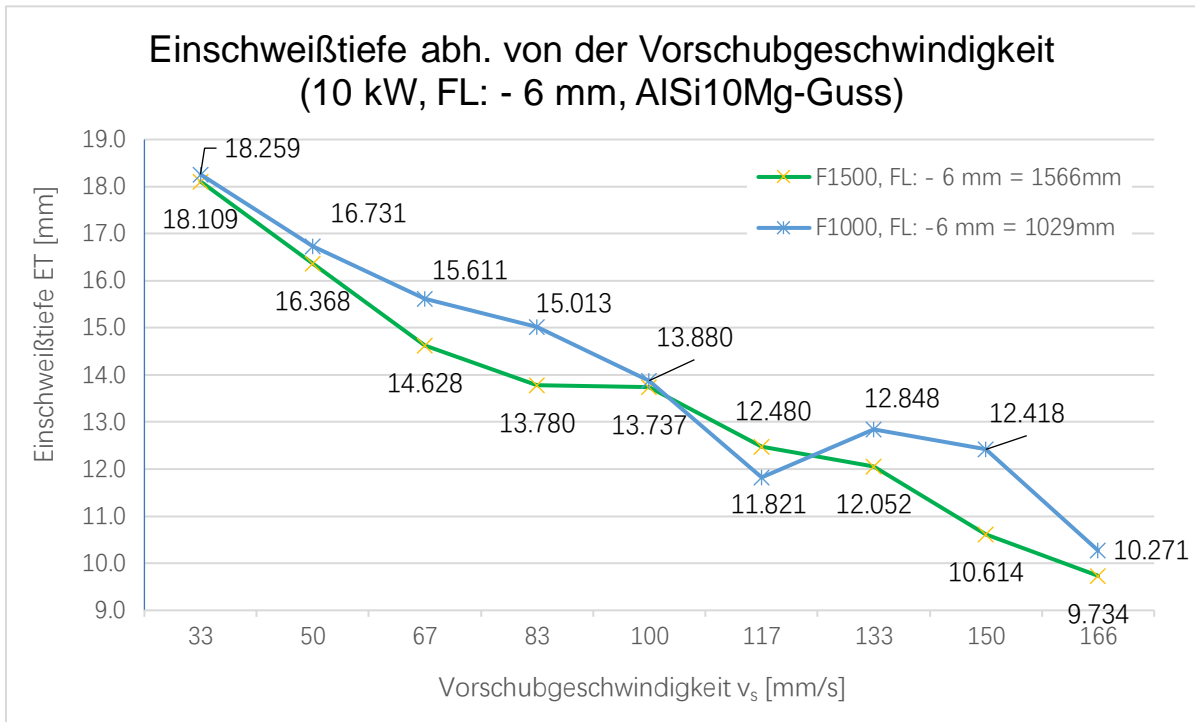


Diagramm 25 Einschweißtiefe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AlSi10Mg-Guss)

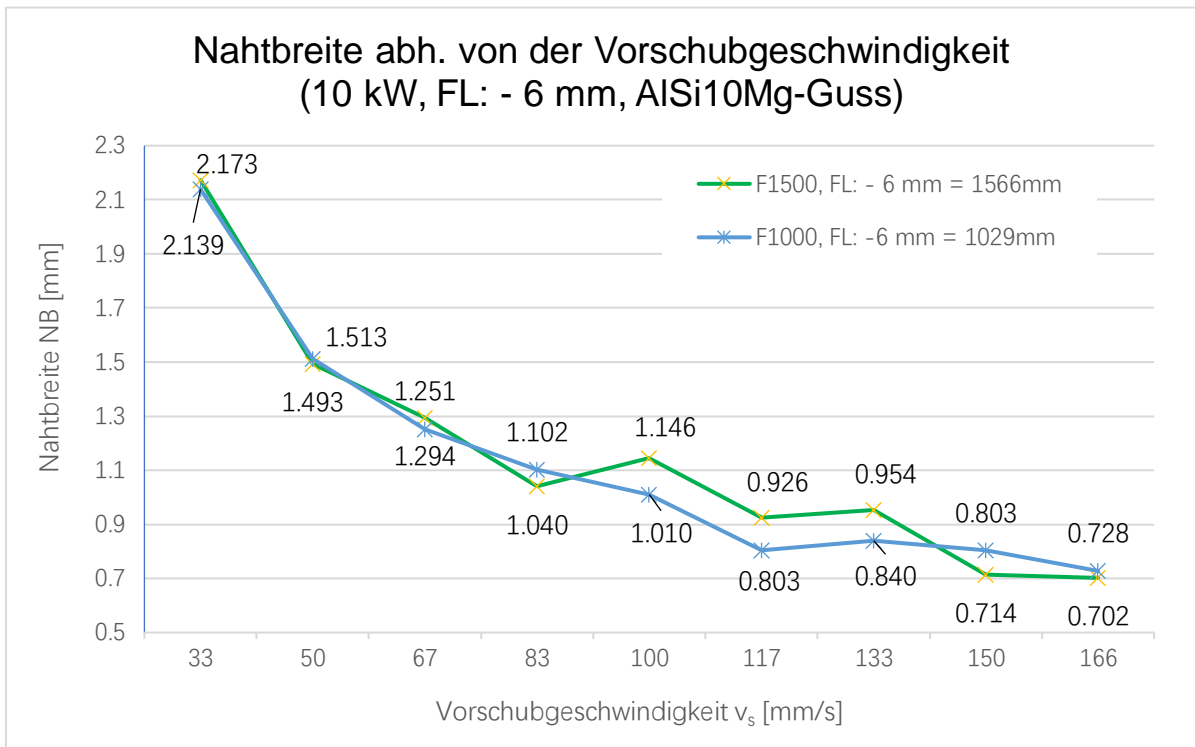


Diagramm 26 Nahtbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AlSi10Mg-Guss)

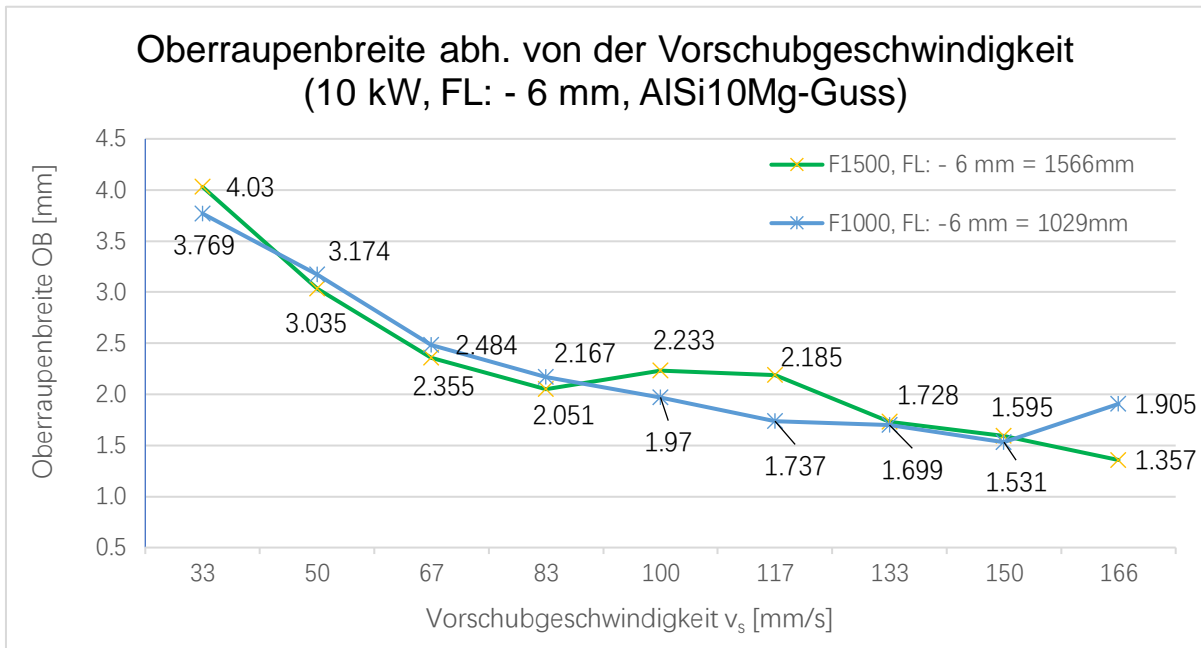


Diagramm 27 Oberraupenbreite in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AlSi10Mg-Guss)

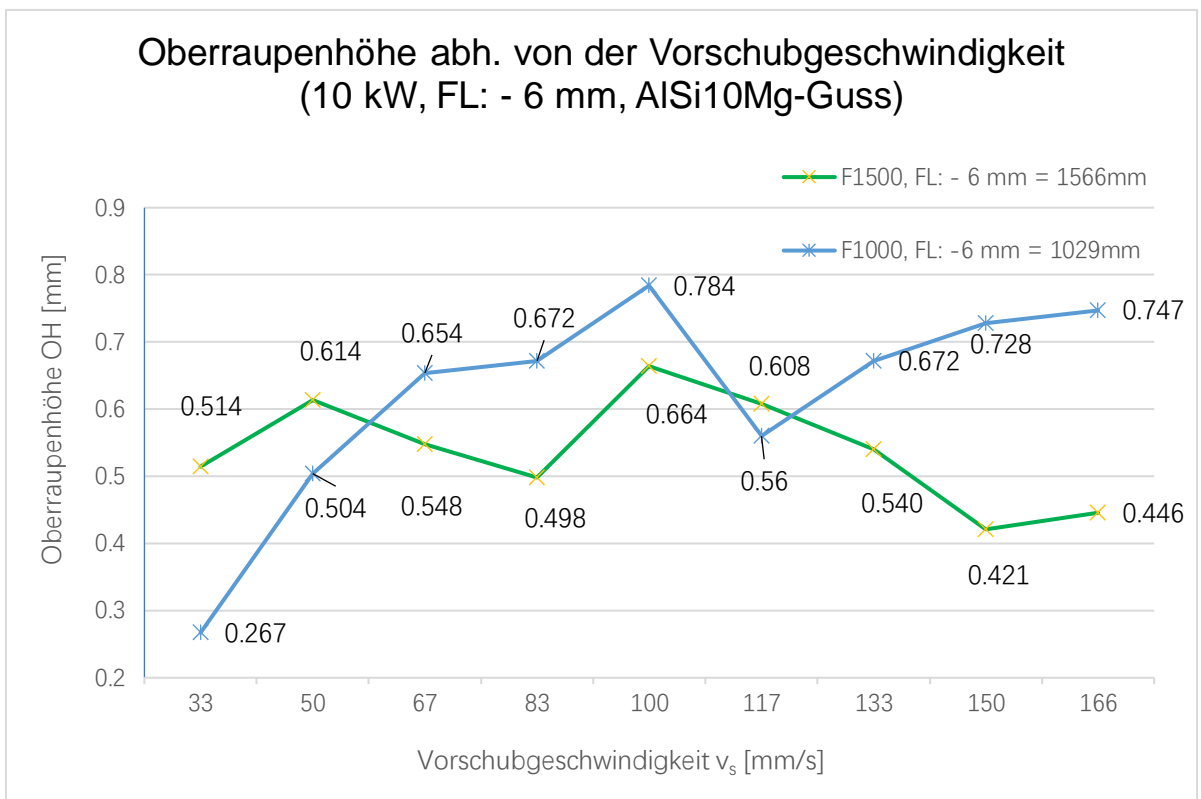


Diagramm 28 Oberraupenhöhe in Abh. von der Vorschubgeschwindigkeit (10 kW, FL: - 6 mm, AlSi10Mg-Guss)

Die Nahtbreite, Oberraupenbreite und Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. In Bezug auf die Oberraupenhöhe sind die Änderungen jedoch komplizierter. Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Einschweißtiefen von F1000 größer sind als die Einschweißtiefen von F1500. Die Nahtbreite und Oberraupenbreite sind sehr ähnlich. Sie alle schwankten bei hohen Vorschubgeschwindigkeit zwischen $v_s = 83 - 150$ mm/s.

Bei F1000 ist: $OH_{(max.)} = 0,784$ mm und $OH_{(min.)} = 0,267$ mm.

Bei F1500: $OH_{(max.)} = 0,664$ mm und $OH_{(min.)} = 0,421$ mm.

In Bezug auf die Oberraupenhöhe ist der Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert von F1000 größer als die von F1500.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden grundlegende Untersuchungen am pAM- AlSi10Mg Material und AlSi10Mg -Guss Material durchgeführt. Es wurde der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf das Schweißergebnis beim Blindnahtschweißen untersucht. Dafür wurden Versuche mit verschiedener Laserstrahlleistungen P_L , Vorschubgeschwindigkeiten v_s , Fokusslage FL: WSO und - 6 mm sowie Brennweiten (F1000 und F1500) an dem pAM-Material und Guss-Material durchgeführt. Das Ziel sollte dabei sein, geeignete Parameter für einen prozesssicheren Fügeprozess mit möglichst wenigen Nahtunregelmäßigkeiten (Poren) bei gleichzeitig hohen Einschweißstiefen und Schweißgeschwindigkeiten zu finden.

Es ist in der Auswertung 1 (Abschnitt 4.2) zu sehen, dass AlSi10Mg -Guss sehr gute Schweißergebnisse für unterschiedliche Laserleistungen (7 kW, 9 kW und 10 kW) und verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten ($v_s = 33 - 166 \text{ mm/s}$) liefert. Dabei waren die Oberraupen gleichmäßiger, die Porenhäufigkeit geringer und Porengröße kleiner. Obwohl in anderen Versuchen festgestellt wurde, dass die Porenhäufigkeit und die Porengröße, mit abnehmender Schweißgeschwindigkeit deutlich zunahm. [27] [30] Aber in diesem Versuch wurde dies jedoch nicht deutlich. Der Grund, warum sich die Porenhäufigkeit mit der Schweißgeschwindigkeit ändert, ist folgender: Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit nimmt die Tiefe von Keyhole schnell ab, was zu einer Verringerung der Ausdehnung und Kontraktion des Schmelzbades im Schweißbereich führt. Die Stabilität der Keyhole wird dadurch zur Unterdrückung der Porenbildung verbessert. [31] Die Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Laserleistung zu. Die Ergebnisse am AlSi10Mg -Guss-Material zeigen, dass um ein besseres Schweißergebnis hinsichtlich der tieferen Einschweißtiefe zu erhalten die Laserleistung erhöht werden sollte und um die Porenhäufigkeit zu verringern die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden sollte.

In Auswertung 2 (Abschnitt 4.3) wurde untersucht, dass wenn die anderen Parameter: Vorschubgeschwindigkeit, Brennweite, Laserleistungen gleichbleiben, wie sich die Änderung der Fokusslage (WSO und - 6 mm) auf das Schweißergebnis von AlSi10Mg -Guss und pAM- AlSi10Mg Material auswirkt. In Messreihe 2 ist zu sehen, dass unabhängig davon, ob es AlSi10Mg -Guss oder pAM- AlSi10 Material ist, die Oberraupen besser werden, wenn die Defokussierung (negativ) größer ist. In der Versuchsreihe von AlSi10Mg -Guss ist zu finden, dass bei der FL: - 6 mm es mehr Poren und größer Porengröße gibt. In dem Versuch von pAM- AlSi10Mg Material ist zu finden, dass bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten die

Porenhäufigkeit und die Porengröße von FL: - 6 mm kleiner als die bei FL: WSO ist. Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Situation umgekehrt. Aber in dem veröffentlichten Artikel von Zhao Lin wurde das gefunden, dass mit zunehmender Defokussieren (negativ) die Porenhäufigkeit abnimmt [30]. Dies ist etwas im Widerspruch zu den Ergebnissen dieses Versuchs, so dass weitere Forschung ist notwendig. In der Versuchsreihe von AlSi10Mg-Guss ist zu finden, dass bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten die Einschweißtiefe sehr nahe ist. Die Einschweißtiefe von FL: WSO ist etwas größer als die von FL: - 6 mm. In den Versuchen mit pAM-AlSi10Mg Material ist zu finden, dass die Einschweißtiefe von FL: - 6 mm etwas größer ist als die bei FL: WSO. In dem veröffentlichten Artikel von Zhang Jian wurde herausgefunden, dass wenn die Defokussierung negativ ist, die Energie innerhalb des Werkstücks konzentriert wird, wodurch die im Werkstück wirkende Laserenergiedichte höher ist als auf der Oberfläche des Werkstücks. Dies führt zu starkem Schmelzen und Verdampfen von Material und erzeugt ein stabiles Keyhole. Ein stabiles Keyhole fördert die Übertragung von Laserenergie in die Tiefe des Schmelzbads, wodurch eine größere Einschweißtiefe und ein stabiler Tiefschweißprozess zu erhalten wird [32]. Diese Ansicht stimmt mit den Versuchsergebnissen von pAM-AlSi10Mg Material überein. Im Artikel wies Zhang Jian auch darauf hin, dass wenn die negative Defokussierung zu groß ist, zu viele Energie in Werkstück konzentriert wird. Dies kann leicht bewirken, dass das Verdampfen von Legierungselementen mit niedrigem Schmelzpunkt und niedrigem Siedepunkt (z.B. Mg) zunimmt. Dies führt zu einem starken Zusammenbruch der Schweißnaht und verschlechtert der Schweißnahtqualität [32]. Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass eine geeignete negative Defokussierung die Einschweißtiefe erhöhen und die Porenhäufigkeit reduzieren kann.

In Messreihe 3 (Abschnitt 4.4) wird ausgewertet, dass wenn andere Parameter: Vorschubgeschwindigkeit, Brennweite, Laserleistungen gleichbleiben, wie sich die Änderung der Material (AlSi10Mg-Guss und pAM-AlSi10Mg Material auf das Schweißergebnis von FL: WSO und FL: - 6 mm auswirkt. Unabhängig davon, ob es sich um FL: WSO oder - 6 mm handelt, sind die Oberrauten von AlSi10Mg-Guss gleichmäßiger und glatter als die von pAM-AlSi10Mg Material. Aus den Querschliffen der zwei Materialien geht hervor, dass die Porenhäufigkeit und Porengröße in Querschliffen von pAM-AlSi10Mg Material viel höher ist. Beim Vergleich des Datendiagramme wurde festgestellt, dass unabhängig davon, ob es sich um FL: WSO oder - 6 mm handelt beim AlSi10Mg-Guss eine tiefere Einschweißtiefe und eine kleinere Oberrautenbreite als pAM-AlSi10Mg Material ist. Dies zeigt, dass bei der Schweißprozess von AlSi10Mg-Guss ein stabileres Keyhole hat.

Das Problem der Poren in dem Laserschweißen von Aluminiumlegierungen ist noch nicht vollständig untersucht worden. Es wird allgemein angenommen, dass die Löslichkeit von Wasserstoff während des Abkühlens des Laserschweißprozesses fällt schnell und es bilden

sich Wasserstoffporen [28]. Oder die Elemente mit niedrigem Schmelzpunkt in der Aluminiumlegierung verdampfen und bilden Poren. Der Laserstrahl und Schutzgas die im Schmelzbad agitieren, wodurch Luft in das Schmelzbad gemischt wird und es dadurch zu Poren kommt.

Die Oberfläche der Aluminiumlegierung bildet leicht eine Oxidschicht. Beim Lasererhitzen werden Wasser oder Wasserverbindungen auf der Oberfläche der Aluminiumlegierung und Wasser in der Luft und Schutzgas zersetzt und erzeugen den Wasserstoff. Der Wasserstoff wird dann während der Abkühlung und Erstarren des Schmelzbads ausgefällt, was die Poren bilden. Es kann auch einige Poren in der unvollständig geschmolzenen Oxidschicht geben, weil das Schmelzbad beim Laserschweißen sehr schnell abkühlt und verfestigt [29], [33]. Dadurch kann in der kurzen Zeit der Wasserstoff in dem Schmelzbad nicht aufschwimmen und entweichen und Poren in der Schweißnaht bilden. Es wurde in einigen Artikeln vorgeschlagen, dass die Stabilität des Keyhols die Porenhäufigkeit beeinflusst [30],[34]. Alle oben genannten Bedingungen führen zur Erzeugung von Poren. Das Laserschweißen ist anfälliger für Poren als andere Schweißverfahren und die Anzahl der Poren ist größer. Manchmal wird die gesamte Schweißnaht mit wabenartigen Poren gefüllt.

Zusammenfassend zur obigen Analyse der Ursachen von Poren wird die folgende Vermutung über den Grund aufgestellt, warum pAM- AlSi10Mg Material höhere Porenhäufigkeit als AlSi10Mg -Guss hat. Es ist nicht möglich zu bestimmen, ob im Produktionsprozess aller Proben die Werkstücke vor dem Schweißprozess Vorbehandlung (Reinigung, Entfetten und bzw.) und die Methode zur Isolierung der Wasserstoffe von der Außenwelt hatten. Durch die obige Analyse kann festgestellt werden, dass die Entfernung und Isolierung von externen Wasserstoffen einen großen Einfluss auf die Porenhäufigkeit haben. Die Grundsätze sind: Es ist das gründliche Entfernen der Öl- und Oxidschicht auf der Oberfläche des Werkstücks notwendig, die Oberfläche des Werkstücks sind vollständig trocken zu halten und feuchtigkeitsfrei. Es ist inertes Schutzgas zu verwenden, um die Oberfläche des Schmelzbads zu schützen bzw. um eine erhöhte Porenhäufigkeit aufgrund Vorbehandlung auszuschließen. Dann können die Eigenschaften des Materials selbst erkundet werden. Wenn die Schweißbedingungen der beiden Materialien gleich sind, kann beurteilt werden, dass der Unterschied von der Porenhäufigkeit durch das Material selbst verursacht wird. Der Grund für den Unterschied in der Porenhäufigkeit der beiden Materialien kann im Wasserstoffgehalt liegen. Wenn die Aluminiumlegierung in einer Umgebung mit Wasserstoff geschmolzen werden, kann der Wasserstoffgehalt der geschmolzenen Aluminiumlegierung mehr als $0,69\text{ml}/100\text{g}$ sein. Aber wenn die Aluminiumlegierung abkühlt und verfestigt ist, beträgt der Wasserstoffgehalt nur $0,036\text{ml}/100\text{g}$. Der Unterschied zwischen beiden beträgt fast das 20 fache [28]. Bei der Umwandlung der Aluminiumlegierung von flüssig zu fest nimmt der Wasserstoffgehalt schnell ab. Kann überschüssiger Wasserstoff der flüssigen Aluminiumlegierung nicht

entweichen werden sich in der Schweißnaht Poren bilden. Der Grund, warum die Porenhäufigkeit von pAM- AlSi10Mg Material höher als bei dem AlSi10Mg -Guss ist, kann daher sein, dass der Unterschied von Wasserstoffgehalt des pAM- AlSi10Mg Material zwischen flüssigen und festen Zustand größer ist als der von AlSi10Mg -Guss. Es wurden jedoch keine spezifischen Daten zum Wasserstoffgehalt dieser beiden Materialien als Belege gefunden. Somit werden noch Folgeversuche und weitere Forschung benötigt.

In Messreihe 4 (Abschnitt 4.5) wird ausgewertet, wie sich die Änderung der Brennweite (F1000 und F1500) auf das Schweißergebnis auswirkt, wenn die anderen Parameter Vorschubgeschwindigkeit, Fokusslage, Laserleistungen, Material gleichbleiben.

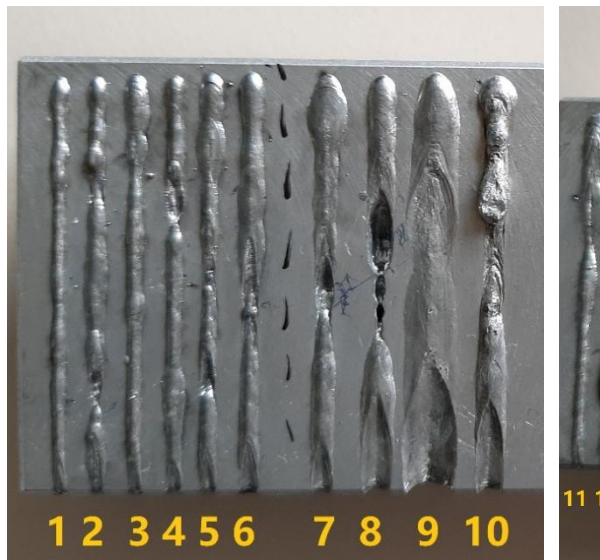
Die Oberfläche der Oberraupen vom pAM- AlSi10Mg Material sind rauher und ungleichmäßiger. Dieses Phänomen ist bei F1500 offensichtlicher als bei F1000. Aus den Querschliffen der zwei Brennweiten geht hervor, dass die Porenhäufigkeit und Porengröße in Querschliffen von F1000 höher sind. Beim Vergleich der Diagramme wurde festgestellt, dass F1500 eine größere Einschweißtiefe und eine kleinere Oberraupenbreite als F1000 hat. Dies zeigt, dass der Schweißprozess von F1500 ein stabileres Keyhole hat. Optiken mit geringer Brennweite besitzen einen geringeren Fokussdurchmesser, als Optiken mit höheren Brennweiten. Die verschiedenen Brennweiten bedingen auch verschiedene Strahlfleckdurchmesser und somit verschiedene Strahlenfleckintensitäten. Somit fällt auf, dass bei gleicher Laserstrahlleistung die Strahlenfleckintensitäten der verschiedenen Brennweiten mit Steigerung der Brennweite geringer ist [35]. Zusammenfassend hat in diesem Versuch eine größere Brennweite ein besseres Schweißnahergebnis.

Anhang - Experimentelle Ergebnisse

Probe: 1 - Werkstoff: AlSi10Mg Guss, F1000, FL: WSO = 1035 mm, SG: Ar

Gesamtübersicht

PL: 7 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]














PL: 9 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]



PL: 7 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]

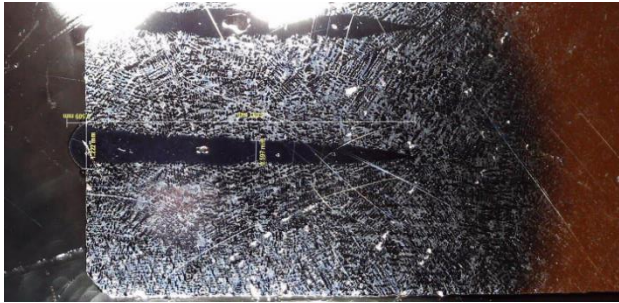
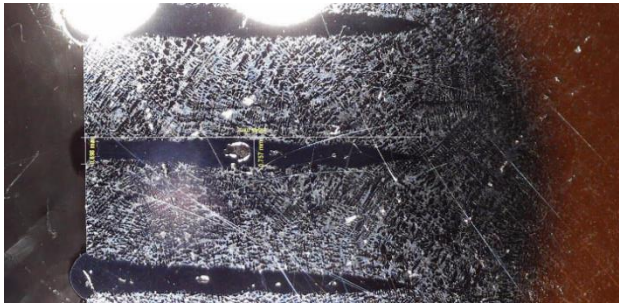
Nahtoberraupen




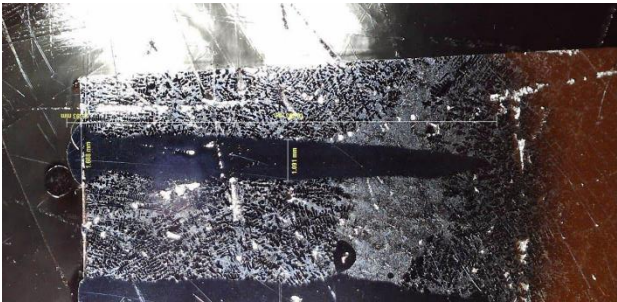

1	v_s : 166 mm/s OB: 1,2 mm		gleichmäßige Nahtoberraupe
2	v_s : 150 mm/s OB: 0,7 mm		- ungleichmäßige Nahtoberraupe - partiell Nahteinfall
3	v_s : 133 mm/s OB: 1,3 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
4	v_s : 117 mm/s OB: 2,0mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - partiell Nahteinfall
5	v_s : 100 mm/s OB: 1,0 mm		- ungleichmäßige Nahtoberraupe - partiell Nahteinfall
6	v_s : 83 mm/s OB: 1,7 mm		- ungleichmäßige Nahtoberraupe - partiell Nahteinfall


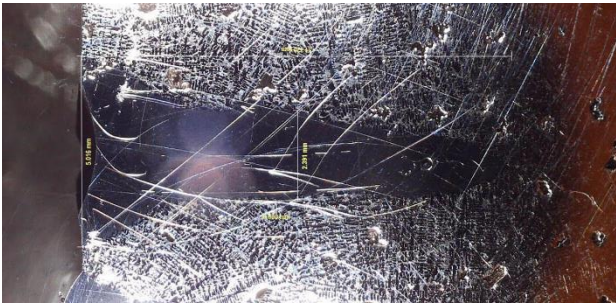
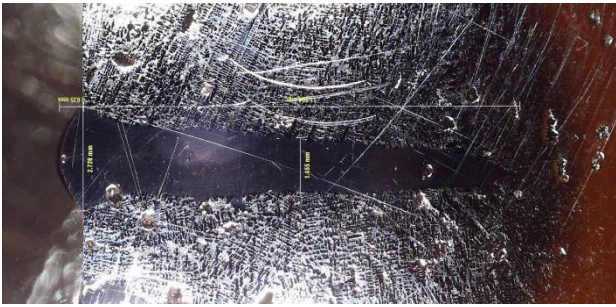
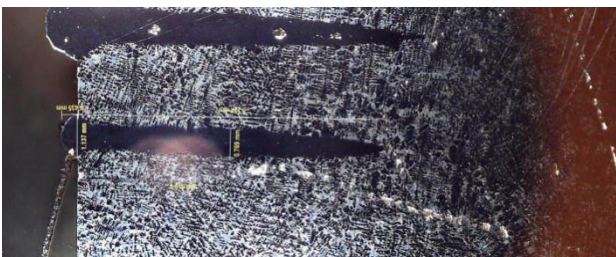
7	v_s: 67 mm/s OB: 2,1 mm		- Materialansammlung am Spuranfang - partiell Nahteinfall
8	v_s: 50 mm/s OB: 3,2 mm		- partiell Nahteinfall
9	v_s: 33 mm/s OB: 5,0 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
10	v_s: 50 mm/s OB: 2,7 mm		- Materialansammlung in Vorderspur
11	v_s: 166 mm/s OB: 1,1 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe

PL: 7 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]

Querschliffe

Nr.	Parameter	Querschliff	Bemerkungen
1	v_s: 166 mm/s ET: 8,6 mm OB: 1,2 mm NB: 0,6 mm OH: 0,5 mm		- sehr schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
2	v_s: 150 mm/s ET: 8,6 mm OB: 0,7 mm NB: 0,8 mm OH: 0 mm		- sehr schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)

3	v_s: 133 mm/s ET: 8,2 mm NB: 1,3 mm NB: 0,8 mm OH: 0,5 mm		- sehr schmale Naht
4	v_s: 117 mm/s ET: 8,1 mm NB: 2,0mm NB: 0,9 mm OH: 0,3 mm		- breite Nahtoberraupe
5	v_s: 100 mm/s ET: 10,9 mm NB: 1,0 mm NB: 1,0 mm OH: 0,2 mm		- günstige Einschweiß- tiefe
6	v_s: 83 mm/s ET: 11,0 mm NB: 1,7 mm NB: 1,1 mm OH: 0,4 mm		- günstige Einschweißtiefe
7	v_s: 67 mm/s ET: 12,3 mm NB: 2,1 mm NB: 1,1 mm OH: 0,5 mm		- günstige Schweißnaht

8	<p>v_s: 50 mm/s ET: 11,3 mm NB: 3,2 mm NB: 1,4 mm OH: 0,6 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - günstige Schweißnaht
9	<p>v_s: 33 mm/s ET: 11,3 mm NB: 5,0 mm NB: 2,4 mm OH: 0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Schweißnaht - es gibt Pore(n)
10	<p>v_s: 50 mm/s ET: 11,5 mm NB: 2,7 mm NB: 1,5 mm OH: 0,6 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - es gibt Pore(n)
11	<p>v_s:166 mm/s ET: 8,1 mm NB: 1,1 mm NB: 0,8 mm OH: 0,4 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr schmale Schweißnaht

Probe: 1 - Werkstoff: AlSi10Mg Guss, F1000, FL: WSO = 1035 mm, SG: Ar

Gesamtübersicht

P_L: 7 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]










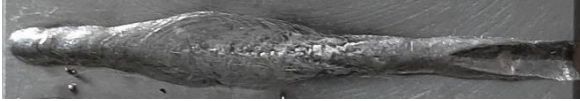

P_L: 9 kW, F1000, FL: WSO [1035 mm]



P_L: 9 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm




Nahtberrauen


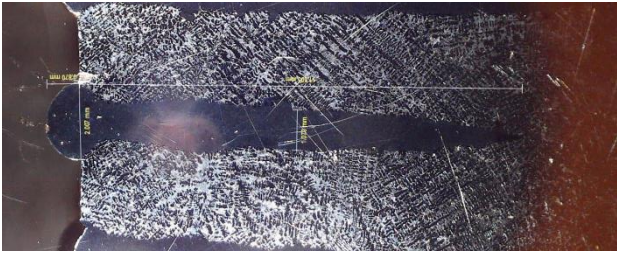


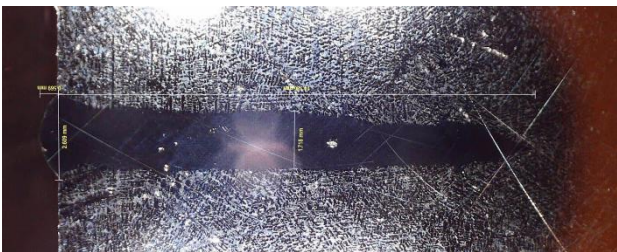
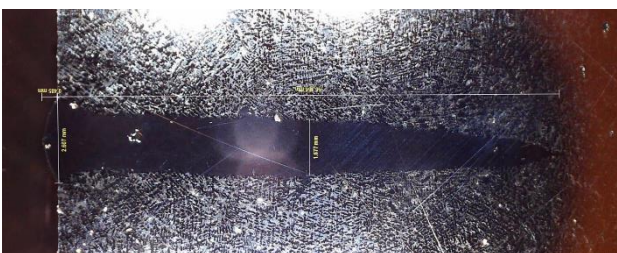
12	v _s : 166 mm/s OB: 2,1 mm		- ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
13	v _s : 150 mm/s OB: 1,6 mm		- ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
14	v _s : 133 mm/s OB: 1,3 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe
15	v _s : 117 mm/s OB: 1,9 mm		- ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
16	v _s : 100 mm/s OB: 2,0 mm		- ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung

17	v_s: 83 mm/s OB: 1,8 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe - schwankende Nahtbreite
18	v_s: 67 mm/s OB: 2,1 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe - schwankende Nahtbreite
19	v_s: 50 mm/s OB: 2,4 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe - schwankende Nahtbreite
20	v_s: 33 mm/s OB: 2,5 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe

PL: **9 kW**, F1000, FL: **WSO** [1035 mm]

Querschliffe

12	v_s: 166 mm/s ET: 9,2 mm OB: 2,1 mm NB: 0,8 mm OH: 0,9 mm		- breite Nahtberraupe - schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
13	v_s: 150 mm/s ET: 10,7 mm OB: 1,6 mm NB: 0,8 mm OH: 0,6 mm		- große Einschweißtiefe - schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
14	v_s: 133 mm/s ET: 12,0 mm OB: 1,3 mm NB: 0,8 mm OH: 0,7 mm		- große Einschweißtiefe - schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)

15	v_s: 117 mm/s ET: 10,5 mm OB: 1,9 mm NB: 1,0 mm OH: 0,2 mm		- günstige Schweißnaht
16	v_s: 100 mm/s ET: 11,6 mm OB: 2,0 mm NB: 1,1 mm OH: 1,0 mm		- große Einschweißtiefe - günstige Schweißnaht - breite Nahtoberraupe
17	v_s: 83 mm/s ET: 13,4 mm OB: 1,8 mm NB: 1,2 mm OH: 0,7 mm		- günstige Schweißnaht - große Einschweißtiefe
18	v_s: 67 mm/s ET: 14,0 mm OB: 2,2 mm NB: 1,3 mm OH: 0,7 mm		- es gibt Pore(n) - sehr große Einschweißtiefe
19	v_s: 50 mm/s ET: 14,4 mm OB: 2,6 mm NB: 1,7 mm OH: 0,6 mm		- es gibt Pore(n) - sehr große Einschweißtiefe
20	v_s: 33 mm/s ET: 16,2 mm OB: 2,6 mm NB: 1,7 mm OH: 0,5 mm		- es gibt Pore(n) - sehr große Einschweißtiefe

Probe: 2 - Werkstoff: AlSi10Mg Guss, F1000, SG: Ar

Gesamtaufsicht

P_L: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm



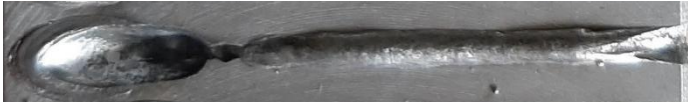

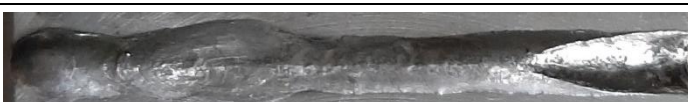

P_L: 10 kW, F1000 FL: - 6 mm = 1029 mm



P_L: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm

Nahtberraupe


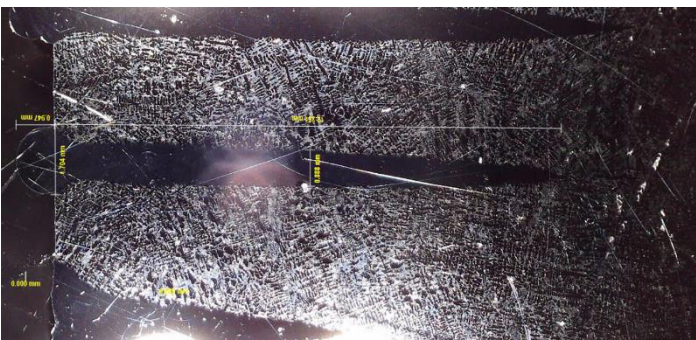
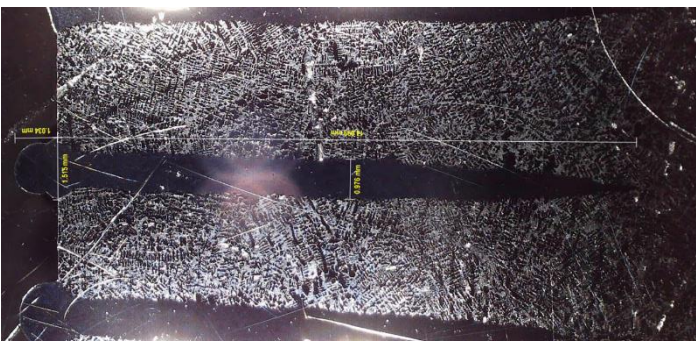

1	v _s : 166 mm/s OB: 1,8 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe
2	v _s : 150 mm/s OB: 3,0 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe
3	v _s : 133 mm/s OB: 1,7 mm		- gleichmäßige Nahtberraupe
4	v _s : 117 mm/s OB: 1,5 mm		- ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung

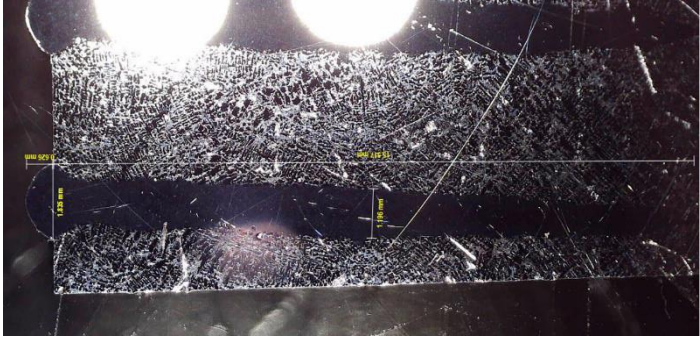
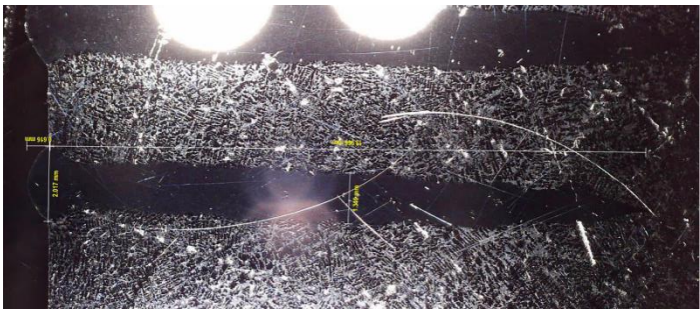
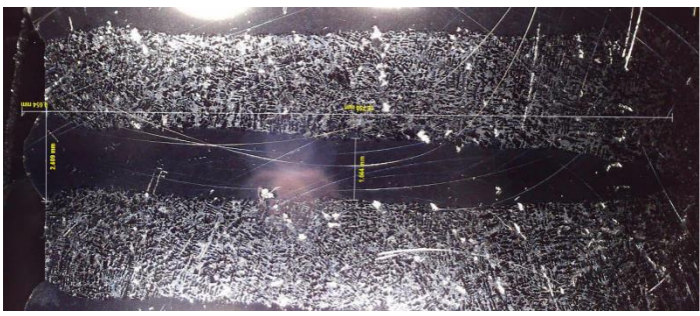
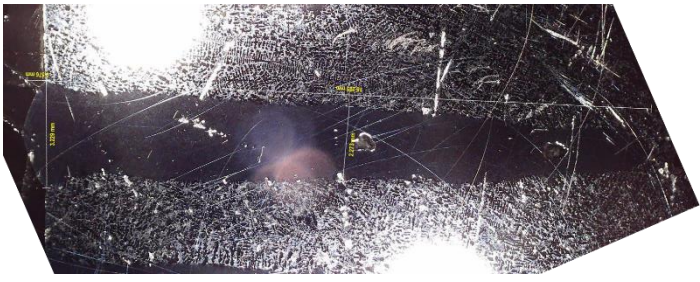
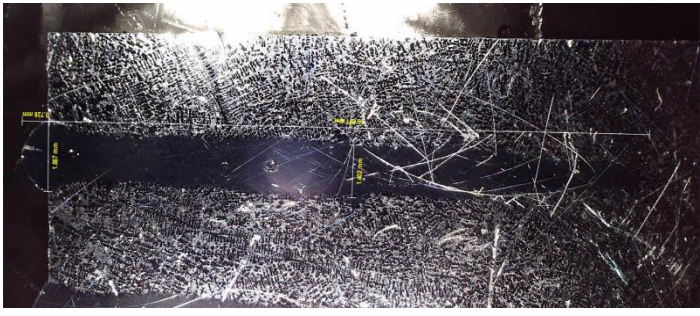
5	v_s: 100 mm/s OB: 2,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe[^] - schwankende Nahtbreit
6	v_s: 83 mm/s OB: 1,8 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe - Materialansammlung am Spuranfang
7	v_s: 67 mm/s OB: 2,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - ungleichmäßige Nahtberraupe - Oberflächenmaterial wird weggeblasen - partiell Nahteinfall
8	v_s: 50 mm/s OB: 2,4 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe - Oberflächenmaterial wird weggeblasen
9	v_s: 33 mm/s OB: 3,2 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe - Oberflächenmaterial wird weggeblasen
10	v_s: 67 mm/s OB: 1,9 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe - Material ungleichmäßig sammelt

P_L: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm

Querschliffe

1	v_s: 166 mm/s ET: 9,8 mm NB: 0,8 mm OB: 1,8 mm OH: 0,4 mm		<ul style="list-style-type: none"> - schmale Schweißnaht
---	--	--	---

2	<p>v_s: 150 mm/s</p> <p>ET: 7,0 mm</p> <p>NB: 1,0 mm</p> <p>OB: 2,8 mm</p> <p>OH: 0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Nahtoberraupe - es gibt Pore(n)
3	<p>v_s: 133 mm/s</p> <p>ET: 12,4 mm</p> <p>NB: 0,9 mm</p> <p>OB: 1,7 mm</p> <p>OH: 0,9 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - schmale Schweißnaht
4	<p>v_s: 117 mm/s</p> <p>ET: 14,1 mm</p> <p>NB: 1,0 mm</p> <p>OB: 1,5 mm</p> <p>OH: 1,0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - große Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
5	<p>v_s: 100 mm/s</p> <p>ET: 14,1 mm</p> <p>NB: 1,0 mm</p> <p>OB: 1,5 mm</p> <p>OH: 1,0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - große Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)

6	<p>v_s: 83 mm/s</p> <p>ET: 16,0 mm</p> <p>NB: 1,2 mm</p> <p>OB: 1,8 mm</p> <p>OH: 0,6 mm</p>		<p>- große Einschweißtiefe</p>
7	<p>v_s: 67 mm/s</p> <p>ET: 16,0 mm</p> <p>NB: 1,3 mm</p> <p>OB: 2,0 mm</p> <p>OH: 0,6 mm</p>		<p>- es gibt Pore(n)</p>
8	<p>v_s: 50 mm/s</p> <p>ET: 17,0 mm</p> <p>NB: 1,6 mm</p> <p>OB: 2,4 mm</p> <p>OH: 0,7 mm</p>		<p>- günstige Schweißnaht</p>
9	<p>v_s: 33 mm/s</p> <p>ET: 18,2 mm</p> <p>NB: 2,3 mm</p> <p>OB: 3,2 mm</p> <p>OH: 0,6 mm</p>		<p>- sehr große Einschweißtiefe</p> <p>- es gibt Pore(n)</p>
10	<p>v_s: 67 mm/s</p> <p>ET: 16,9 mm</p> <p>NB: 1,4 mm</p> <p>OB: 1,9 mm</p> <p>OH: 0,7 mm</p>		<p>- sehr große Einschweißtiefe</p> <p>- es gibt Pore(n)</p>

Probe: 2 - Werkstoff: AlSi10Mg- Guss, F1000, SG: Ar

Gesamtaufsicht

P_L: 10 kW, F1000, FL: WSO = 1035 mm





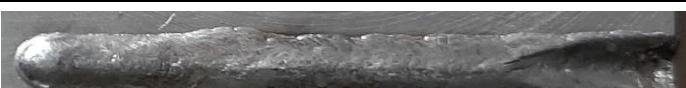
P_L: 10 kW, F1000 FL: - 6 mm = 1029 mm



P_L: 10 kW, F1000 FL: - 6 mm = 1029 mm

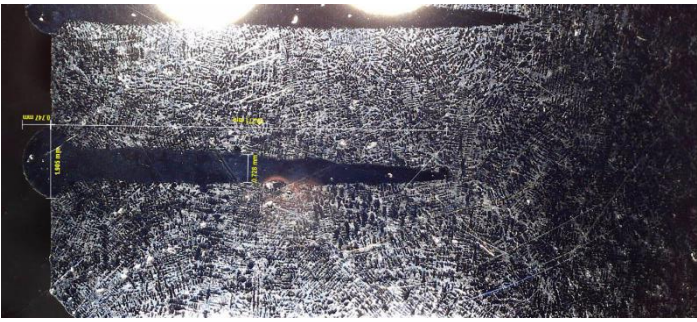
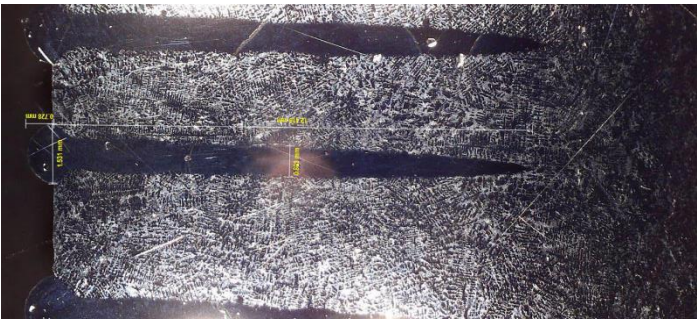
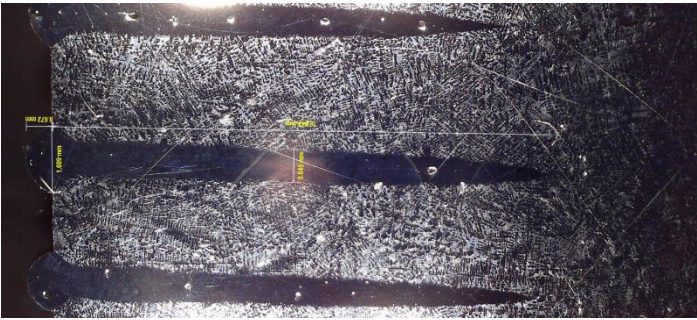
Nahtoberraufen

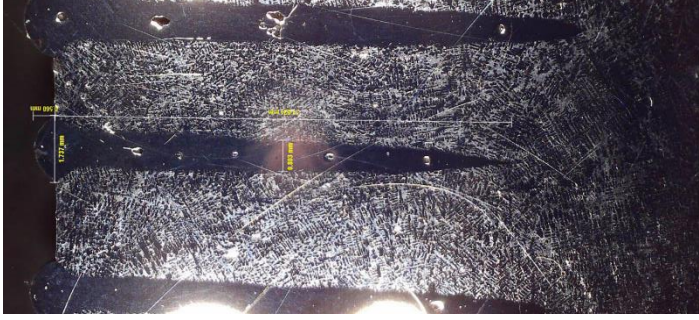
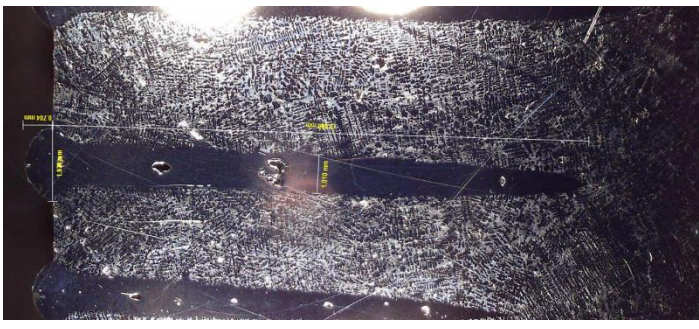
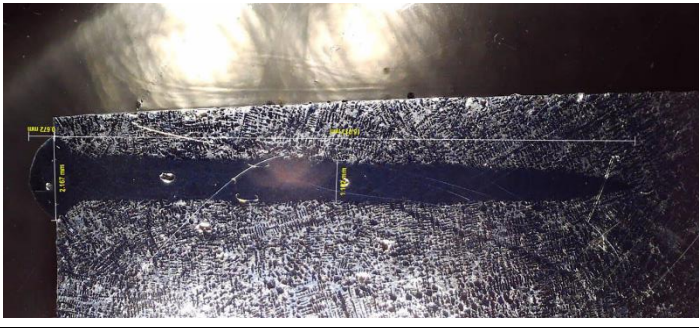
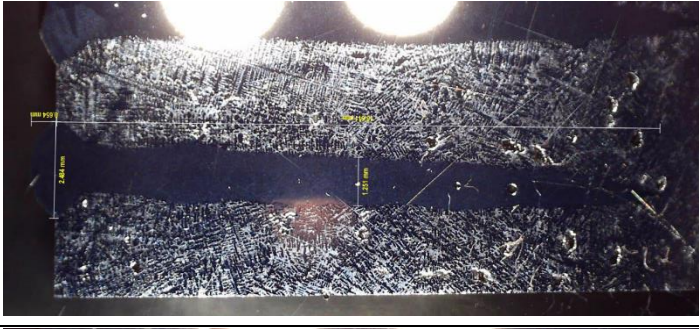

11	<p>v_s: 166 mm/s OB: 1,9 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - ungleichmäßige Nahtoberraufe - ungleichmäßige Materialansammlung - schwankende Nahtbreit
12	<p>v_s: 150 mm/s OB: 1,5 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraufe
13	<p>v_s: 133 mm/s OB: 1,7 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraufe
14	<p>v_s: 117 mm/s OB: 1,7 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraufe

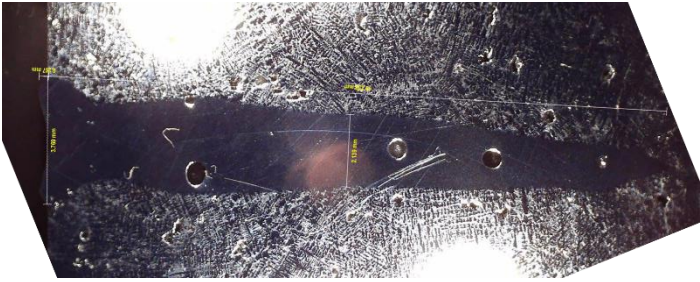
15	v_s: 100 mm/s OB: 2.0 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
16	v_s: 83 mm/s OB: 2,2 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
17	v_s: 67 mm/s OB: 2,5 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
18	v_s: 50 mm/s OB: 3,2 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
19	v_s: 33 mm/s OB: 3,8 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - Oberflächenmaterial wird weggeblasen

PL: **10 kW**, F1000 FL: **- 6 mm** = 1029 mm

Querschliffe

11	v_s: 166 mm/s ET: 10,3 mm NB: 0,7 mm OB: 1,9 mm OH: 0,7 mm		- schmale Schweißnaht
12	v_s: 150 mm/s ET: 12,4 mm NB: 0,8 mm OB: 1,5 mm OH: 0,7 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
13	v_s: 133 mm/s ET: 12,8 mm NB: 0,8 mm OB: 1,7 mm OH: 0,7 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)

14	v_s: 117 mm/s ET: 11,8 mm NB: 0,8 mm OB: 1,7 mm OH: 0,6 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
15	v_s: 100 mm/s ET: 13,9 mm NB: 1,0 mm OB: 2,0 mm OH: 0,8 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
16	v_s: 83 mm/s ET: 15,0 mm NB: 1,1 mm OB: 2,2 mm OH: 0,7 mm		- große Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
17	v_s: 67 mm/s ET: 15,6 mm NB: 1,3 mm OB: 2,5 mm OH: 0,7 mm		- große Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
18	v_s: 50 mm/s ET: 17,0 mm NB: 1,5 mm OB: 3,2 mm OH: 0,5 mm		- große Einschweißtiefe - günstige Schweißnaht

19	v_s: 33 mm/s ET: 18,3 mm NB: 2,1 mm OB: 3,8 mm OH: 0,3 mm		<ul style="list-style-type: none"> - große Einschweißtiefe - sehr breite Schweißnaht - es gibt Pore(n)
----	--	--	---

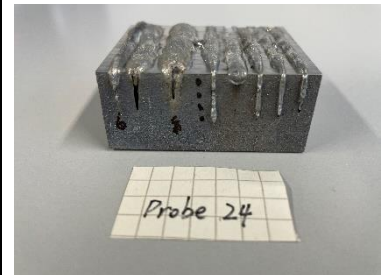
Probe: 24 - Werkstoff: AlSi10Mg **lasergesintert, F1000**, SG: Ar

P_L: **10 kW**, F1000 FL: **WSO** = 1035 mm



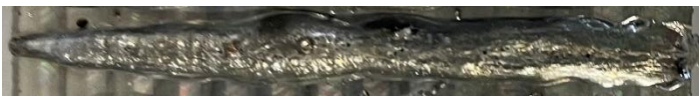


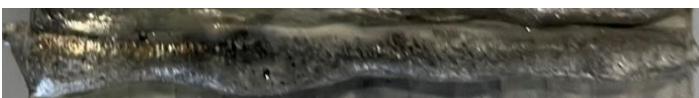
Vorderansicht



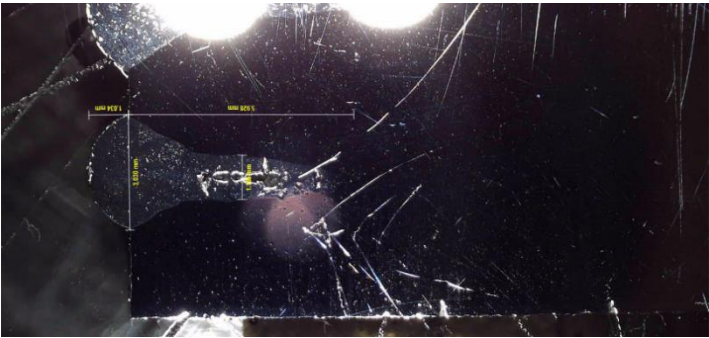


Schrägsicht

Rückansicht



Nahtoberrauen

1	v_s: 166 mm/s OB: 3,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraupe
2	v_s: 150 mm/s OB: 3,7 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraupe
3	v_s: 133 mm/s OB: 3,8 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraupe
4	v_s: 117 mm/s OB: 4,5 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraupe
5	v_s: 100 mm/s OB: 5,1 mm		<ul style="list-style-type: none"> - ungleichmäßige Nahtoberraupe - Material im middle sammelt
6	v_s: 83 mm/s OB: 3,1 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtoberraupe

7	v_s: 67 mm/s OB: 5,5 mm		<ul style="list-style-type: none"> - ungleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
8	v_s: 33 mm/s OB: 8,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
Querschliff			
1	v_s: 166 mm/s ET: 5,9 mm NB: 1,2 mm OB: 3,0 mm OH: 1,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtberraupe - geringe Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
2	v_s: 150 mm/s ET: 7,0 mm NB: 1,1 mm OB: 3,7 mm OH: 1,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtberraupe - geringe Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
3	v_s: 133 mm/s ET: 8,3 mm NB: 1,1 mm OB: 3,8 mm OH: 1,4 mm		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtberraupe - es gibt Pore(n)

4	<p>v_s: 117 mm/s ET: 3,1 mm NB: 2,7 mm OB: 4,5 mm OH: 1,0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Nahtoberraupe - geringe Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
5	<p>v_s: 100 mm/s ET: 6,5 mm NB: 1,3 mm OB: 5,1 mm OH: 1,5 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - geringe Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
6	<p>v_s: 83 mm/s ET: 12,1 mm NB: 1,4 mm OB: 3,1 mm OH: 1,8 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - viele Pore(n) in Nahtmitte
7	<p>v_s: 67 mm/s ET: 5,5 mm NB: 1,9 mm OB: 5,5 mm OH: 1,3 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - kleine Einschweißtiefe - viele Pore(n)



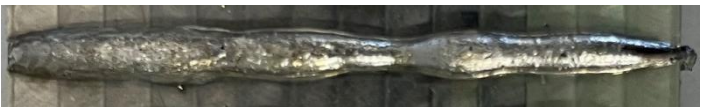
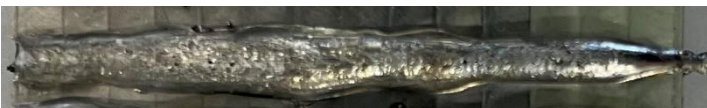

8	v_s: 33 mm/s ET: 12,4 mm NB: 3,6 mm OB: 8,0 mm OH: 2,0 mm		<ul style="list-style-type: none"> - sehr große Nahtberraupe - viele Poren
---	--	--	--


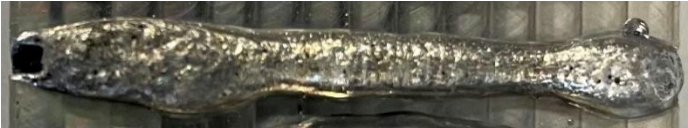

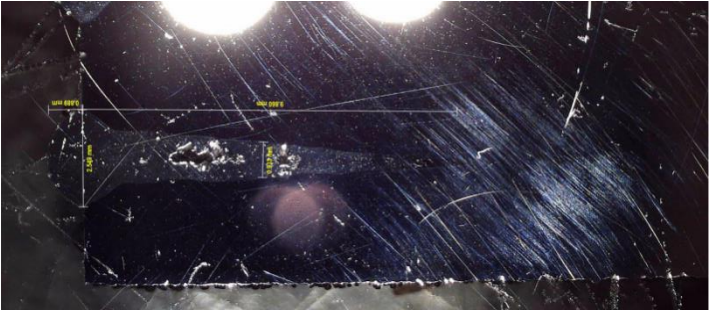
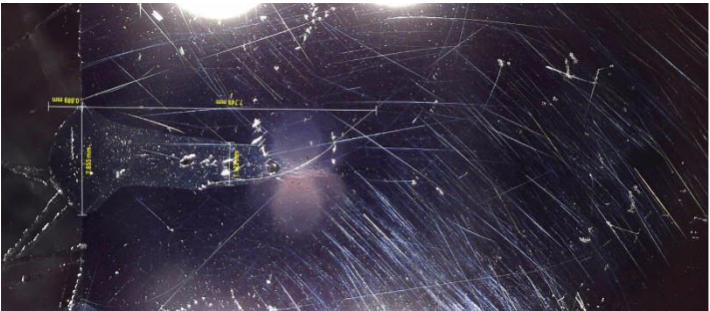
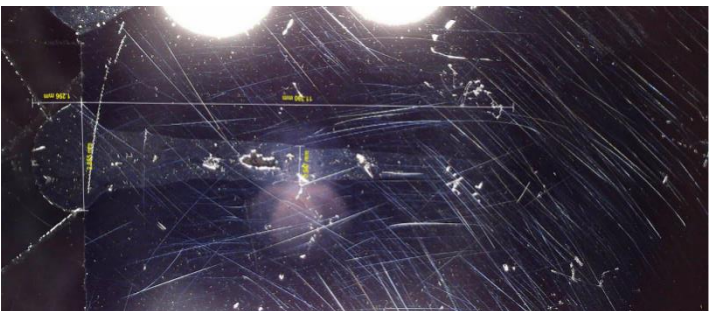
Probe: 22 - Werkstoff: AlSi10Mg **lasergesintert, F1000**, SG: Ar

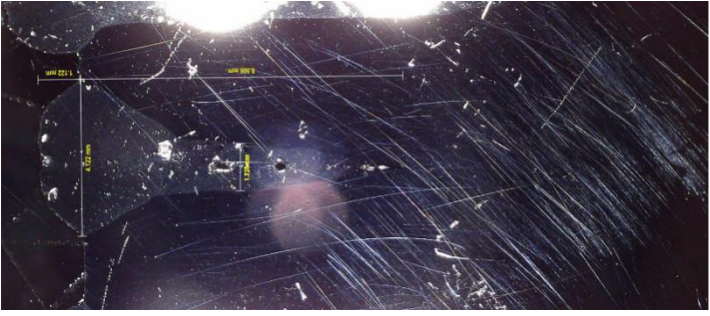

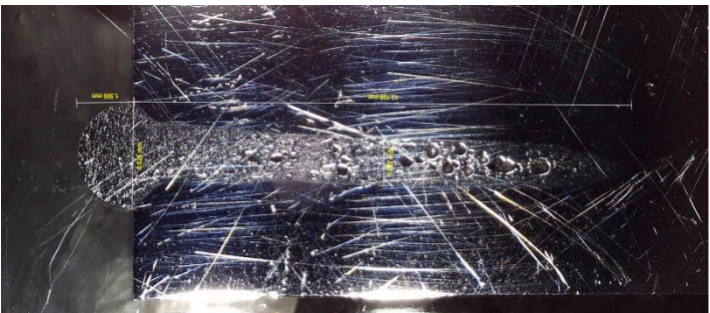
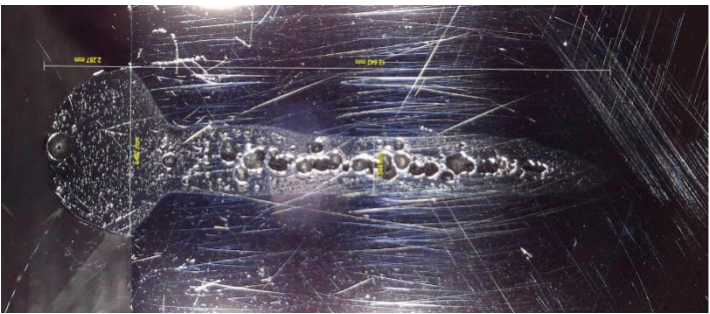

P_L: **10 kW**, F1000 FL: - **6 mm** = 1029 mm

Vorderansicht	Schrägsicht	Rücksicht
		

Nahtberraupe

1	v_s: 166 mm/s OB: 2,5 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe
2	v_s: 150 mm/s OB: 2,9 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe
3	v_s: 133 mm/s OB: 2,9 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe
4	v_s: 117 mm/s OB: 4,1 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe
5	v_s: 100 mm/s OB: 3,1 mm		<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Nahtberraupe

6	v_s: 83 mm/s OB: 2,8 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
7	v_s: 67 mm/s OB: 4,5 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
8	v_s: 33 mm/s OB: 6,6 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
Querschliffe			
1	v_s:166 mm/s ET: 9,9 mm NB: 0,9 mm OB: 2,5 mm OH: 0,9 mm		- einige Poren
2	v_s:150 mm/s ET: 7,7 mm NB: 1,1 mm OB: 2,9 mm OH: 0,9 mm		- geringe Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)
3	v_s:133 mm/s ET: 11,4 mm NB: 0,9 mm OB: 2,9 mm OH: 1,3 mm		- es gibt Pore(n)

4	<p>v_s: 117 mm/s ET: 8,5 mm NB: 1,2 mm OB: 4,1 mm OH: 1,1 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - es gibt Pore(n)
5	<p>v_s: 100 mm/s ET: 12,3 mm NB: 1,2 mm OB: 3,1 mm OH: 1,8 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - es gibt Pore(n)
6	<p>v_s: 83 mm/s ET: 13,1 mm NB: 1,3 mm OB: 2,8 mm OH: 1,5 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - viele Poren
7	<p>v_s: 67 mm/s ET: 12,6 mm NB: 1,5 mm OB: 4,5 mm OH: 2,3 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - viele Poren
8	<p>v_s: 33 mm/s ET: 14,9 mm NB: 3,2 mm OB: 6,6 mm OH: 3,0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraupe - breite Schweiß-naht - große Einschweißstiefe - viele Poren

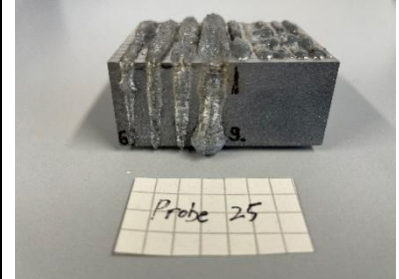
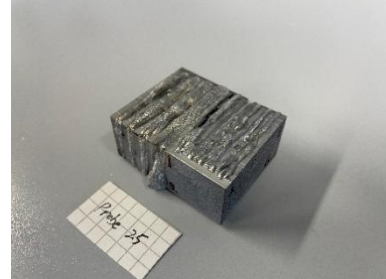
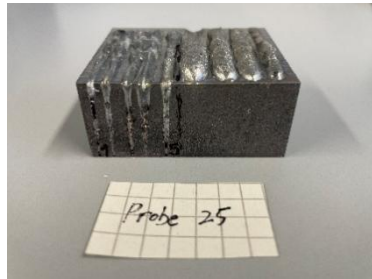
Probe: 25 - Werkstoff: AlSi10Mg **lasergesintert**, F1500, FL: - 1 = 1571 mm, SG: Ar

PL: **10kW**, F1500, FL: **- 1** = 1571 mm







Vordersicht





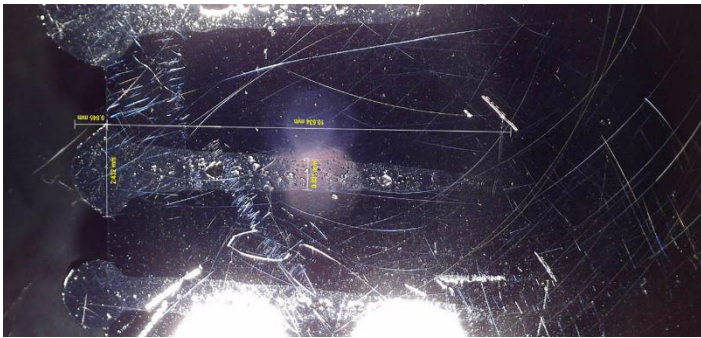
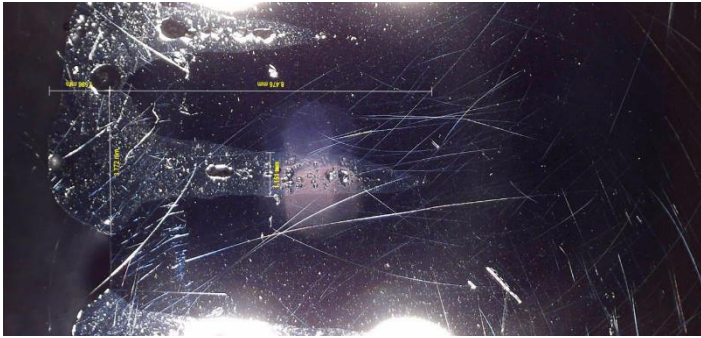
Schrägsicht



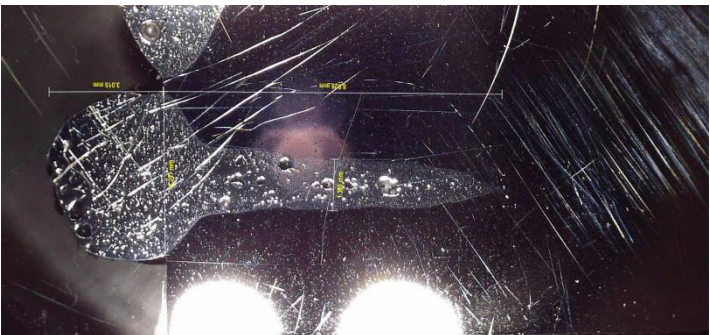
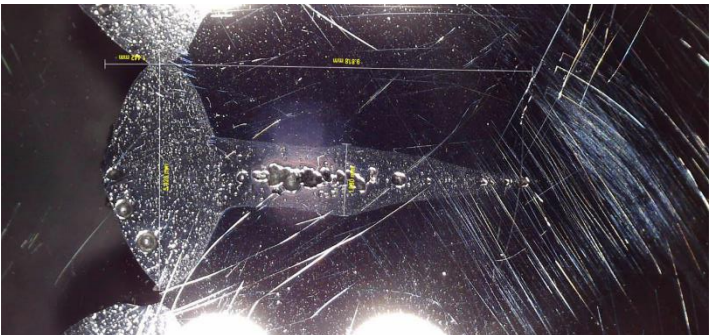
Rücksicht

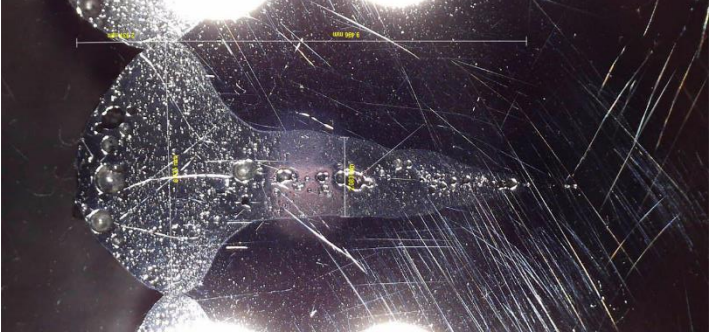



Nahtoberraupen

1	v_s: 166 mm/s OB: 1,9 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
2	v_s: 150 mm/s OB: 2,4 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
3	v_s: 133 mm/s OB: 3,8 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
4	v_s: 117 mm/s OB: 4,0 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
5	v_s: 100 mm/s OB: 2,6 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe - ungleichmäßige Materialansammlung
6	v_s: 83 mm/s OB: 4,3 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe

7	v_s: 67 mm/s OB: 5,9 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
8	v_s: 50 mm/s OB: 6,7 mm		- gleichmäßige Nahtoberraupe
9	v_s: 33 mm/s OB: 7,0 mm		- ungleichmäßige Materialansammlung
Querschliffe			
1	v_s: 166 mm/s ET: 11,0 mm NB: 0,8 mm OB: 1,9 mm OH: 1,2 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
2	v_s: 150 mm/s ET: 10,6 mm NB: 0,8 mm OB: 2,4 mm OH: 0,8 mm		- schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
3	v_s: 133 mm/s ET: 8,5 mm NB: 1,2 mm OB: 3,8 mm OH: 1,6 mm		- breite Nahtoberraupe - es gibt Pore(n)

4	<p>v_s: 117 mm/s</p> <p>ET: 6,4 mm</p> <p>NB: 1,0 mm</p> <p>OB: 4,1 mm</p> <p>OH: 1,2 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraue - es gibt Pore(n)
5	<p>v_s: 100 mm/s</p> <p>ET: 11,7 mm</p> <p>NB: 1,2 mm</p> <p>OB: 2,6 mm</p> <p>OH: 1,6 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - schmale Schweißnaht - es gibt Pore(n)
6	<p>v_s: 83 mm/s</p> <p>ET: 8,9 mm</p> <p>NB: 1,3 mm</p> <p>OB: 4,3 mm</p> <p>OH: 3,0 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - breite Nahtoberraue - es gibt Pore(n)
7	<p>v_s: 67 mm/s</p> <p>ET: 9,8 mm</p> <p>NB: 2,0 mm</p> <p>OB: 6,0 mm</p> <p>OH: 1,4 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Nahtoberraue - es gibt Pore(n)

8	<p>v_s: 50 mm/s</p> <p>ET: 9,5 mm</p> <p>NB: 2,1 mm</p> <p>OB: 6,7 mm</p> <p>OH: 2,3 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Nahtoberraupe - es gibt Pore(n)
9	<p>v_s: 33 mm/s</p> <p>ET: 13,1 mm</p> <p>NB: 4,0 mm</p> <p>OB: 7,0 mm</p> <p>OH: 2,7 mm</p>		<ul style="list-style-type: none"> - sehr breite Nahtoberraupe - sehr breite Schweißnaht - große Einschweißtiefe - es gibt Pore(n)

Literaturverzeichnis

- [1] L. Dorn: Schweißverhalten von Aluminium und seinen Legierungen, Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik. 29, Weinheim, 1998
- [2] DIN 8593: Fertigungsverfahren. Fügen durch Schweißen - Einordnung/Unterteilung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2003
- [3] Wang Guanbo, Laserschweißen von verschiedenartigen Aluminiumwerkstoffen, Hochschule Mittweida, Praktikumsbericht: 2019
- [4] Beck, Markus: Modellierung des Lasertiefschweißens, Dissertation, Universität Stuttgart, B.G. Teubner- Verlag, 1996
- [5] Klemens, P.G.: Heat balance and flow condition for electron beam and laser welding, Journal of Applied Physics, Vol. 47, No.5, 1976
- [6] Arata, Y.; Maruo, H.; Mizamoto, I.: Application of laser material processing - Heat flow in laser hardening, 1978
- [7] Seefeld, T.; Gumenyuk, A.: Prozessverständnis beim Strahlschweißen von Aluminium, DVS- Berichte, Band 266, Bremen, Berlin, 2010
- [8] Wiki, Abgerufen am 12.03.2021 von:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium-Silicium-Legierung>
- [9] Wenqi Zhang: Investigation on Process and Performance of AlSi10Mg Parts Fabricated by Selective Laser Melting, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Master Thesis 2015
- [10] SLM, Abgerufen am 12.03.2021 von:
www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_AI-Alloy_AlSi10Mg_0619.pdf
- [11] Gref, Wolfgang: Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokushilfstechnik, Dissertation, IFSW, Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2005
- [12] DIN 8528 Blatt 1, 06 73: Schweißbarkeit- metallische Werkstoffe- Begriffe, 1973
- [13] Rapp, Jürgen: Laserschweißungen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau, Dissertation, Universität Stuttgart, B.G. Teubner- Verlag, 1996
- [14] Nörenberg, K.; Ruge, J.: Wasserstoffporosität beim Schmelzschweißen von Aluminiumwerkstoffen, Teil II. Aluminium 68, Nr. 5, 1992
- [15] Zengen, K.-H.: Aluminium- neue Gießverfahren und Werkstoffeigenschaften, Ehningen, 1992

- [16] Rapp, Jürgen: Laserschweißungen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau, Dissertation, Universität Stuttgart, B.G. Teubner- Verlag, 1996
- [17] Benutzerhandbuch, Ytterbium Laser System, YLS-1000-SM, SN- 15048851, 2015
- [18] Wagner Matthias, Grundlagenuntersuchung zum Hochgeschwindigkeitslasertiefschweißen mit überlagerter Bahnbewegung, Hochschule, Mittweida, Diplomarbeit: 2014
- [19] II-VI, Abgerufen am 20.03.2021 von: <https://ii-vi.com/laser-resources/>
- [20] Voncina, M., and Mrvar, P. etc., Thermodynamic analysis of AlSi10Mg alloy. RMZ Materials and Geoenvironment, 52(3), 2006
- [21] Buchbinder, D., and Schleifenbaum, H. etc., High power elective laser melting (HP SLM) of Aluminium parts. Physics Procedia 12(1), 2011
- [22] Huimin Liu, Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications, ISBN 0-8155-1436-0, 1999
- [23] MatWeb, Abgerufen am 26.03.2021 von:
http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=87a0d0817ebd44008a967_cbf3e9cd378&ckck=1
- [24] Flagship Technical data sheets for heat treated aluminium high pressure die castings. CSIRO document number CMSE 2008-013, 2008
- [25] X. Liu, C. Zhao, etc., Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy, Materials and Design 168, DOI: org/10.1016/j.matdes.2019.107677, 2019
- [26] Lore T., Kempen, K., etc., Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder, Acta Material, Issue 5 Volume 61, 2012
- [27] Jingwei Cheng, Bachelorarbeit: Untersuchungen zur Anwendbarkeit des 10 kW Monomode Faserlasers zum Laserstrahlschweißen an additiv hergestelltem AlSi10Mg-Material, Hochschule Mittweida, 2020
- [28] Tiechuan Zuo, Aluminiumlegierung Verarbeitung, Nationale Presse der Verteidigungsindustrie, Beijing, 2002
- [29] Jin Yang, study on the process behavior and defects control during laser penetration welding of aluminium alloy, Beijing, 2011
- [30] Zhao Lin, T. Susumu, and A. Goro, etc., Influence of Welding Parameters on weld Depth and Porosity in High Power Fiber Laser Welding, DOI:10.3788/CJL201340.1103004, 2013

- [31] I. Kawaguchi, S. Tsukamoto, and G. Arakane, etc., Characteristics of high power CO₂ laser welding and porosity suppression mechanism by nitrogen shield (Report 1) study on high power laser welding phenomena [J]. Quarterly J the Japan Welding Society, 2005
- [32] Zhang Jian, L. Shijun, and S. Shaoxing, etc., Effect of Defocusing Amount on Weld Shaping in Fiber Laser Welding of Aluminium Alloy, DOI:10.3788/LOP53.121405, 2016
- [33] Jha SC, Sanddors TH Jr, Daynanada MA., Grain boundary precipitate free zones in Al-Li alloys. Acta Metall, 1987
- [34] Fujinaga S, Takenaka H, and Narikiyo T, etc., Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high-power Nd: YAG laser irradiation. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000
- [35] Florian Hüttinger, Bachelorarbeit: Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen an AlSi12 mit einem 10 kW Singlemode Faserlaser zur Optimierung des Schweißergebnisses, 2018
- [36] Wiki am 28.04.2021 von: <https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlqualit%C3%A4t>
- [37] Josephin Enz, Laserstrahlschweißen von hochfesten Aluminium-Lithium Legierungen, Heimholtz- Zentrum Geesthacht, ISSN 2191-7833, 2012
- [38] Eichler, J., Lothar D., Bernd E., Laser Technik Journal, Wiley, Weinheim, 2004
- [39] Volker Neumann, Zusammenstellung wellenoptischer Berechnungsgleichungen für den realen Laserstrahl, Laserinstitut-Mittelsachsen, 2021
- [40] Tim Langer, Diplomarbeit, Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit einem 10 kW gegossenem AlSi10Mg, Mittweida, 2021

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.

02.08.2021, Mittweida

Liu, Gan