

# Herstellung hybrider Komponenten mittels Laserstrahlschweißen

Rosenblatt, M.\*; Ulrich, S.\*; Pieper, M.\*

Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung, Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena

*In diesem Beitrag wird die Herstellung von Hybridbauteilen vorgestellt, welche aus konventionellem Al-Guss und additiv gefertigten Halbzeugen bestehen und mit Hilfe des Laserstrahlschweißens gefügt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Bestimmung der Schweißseignung der L-PBF Komponenten (laser powder bed fusion), da hierbei auf die mechanische Vorbereitung der Halbzeuge (Drehen/Fräsen) vor dem Schweißen verzichtet wurde. In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss der Prozessparameter auf das Gefüge und die Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von AlSi10Mg untersucht, um das Prozessfeld einzugrenzen.*

---

## 1 Einleitung

Produktionsanlagen zum additiven Fertigen von Bauteilen, z.B. aus Al-Legierungen, werden immer leistungsfähiger. Anwender produzieren bereits jetzt schon Klein- und auch Großserien auf ihren L-PBF-Anlagen. Die Fertigungskosten dieser additiv gefertigten Bauteile werden dabei durch immer neue Methoden weiter reduziert. Oberstes Ziel ist es, das Bauteilvolumen in weniger Schichten zu erzeugen und so die zeit- und kostenintensiven Beschichtungszyklen zu reduzieren. Mit diesem Ansatz kann jedoch nur begrenzt Einfluss auf Kosten und Bauzeit genommen werden, da diese ebenfalls durch die Orientierung des Bauteils im Bauraum beeinflusst werden (breit und flach wenig Zeit, schmal und hoch viel Zeit). Darüber hinaus hat die Baurichtung auch Einfluss auf die Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte des Bauteils. Eine Alternative ist die pulverbettbasierte Herstellung des Funktionsbereiches, welcher im Anschluss mit dem angrenzenden, konventionell gefertigten Bauteil verbunden wird. Dabei kann der konventionell gefertigte Teil auch deutlich größer sein als der Bauraum der Pulverbettanlage. Für das Fügen können bei metallischen Komponenten Standardschweißverfahren, z. B. das Laserstrahlschweißen, zum Einsatz kommen.

Um jedoch qualitativ hochwertige Schweißnähte an additiv gefertigten Bauteilen herzustellen, ist eine Anpassung der bekannten Prozessparameter für das Laserstrahlschweißen von konventionell gefertigten Bauteilen (Halbzeug) notwendig. Prozessbedingt weisen die L-PBF-Bauteile andere Eigenschaften als konventionell gefertigten Bauteil auf. Am Beispiel der Kombination aus konventionellem Al-Guss und additiv gefertigten Halbzeugen werden die Besonderheiten beim Laserschweißen von Hybridverbindungen vorgestellt. Dabei wurde bei den Schweißversuchen von einer Nahtvorbereitung und von Schweißzusatz abgesehen. Infolge dessen war die Fügezone von inneren (u.a. Porennester) und äußeren (u.a. Nahtunterwölbung und Randkerben) Unregelmäßigkeiten geprägt. Auf die Zusammenhänge zwischen Laser- und Prozessparametern und den resultierenden Nahtfehlern wird in diesem Beitrag schwerpunktmäßig eingegangen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Legierungen AlSi10Mg

Das Aluminium-Silizium-Zweistoffsystem (AlSi) bildet für Druckgusslegierungen das wichtigste Legierungssystem. Hauptvertreter dieser Legierungsgruppe mit eutektischen bzw. nahezu eutektischen Legierungen (Eutektikum bei 11,7 Gew.-% Siliziumgehalt) sind, GD-AlSi9Cu3, GD-AlSi12(Cu) und GD-AlSi12, GD-AlSi10Mg. Silizium erhöht dabei die Zugfestigkeit und Bruchdehnung der Legierung wobei Magnesium die Einstellung einer höheren Festigkeit und Duktilität ermöglicht. Die Fließfähigkeit der Schmelze verbessert sich mit steigenden Siliziumgehalt. Die günstigsten Werte für Festigkeit und Bruchdehnung in der Legierung liegen bei einer Zugabe von Magnesium von 0,3 % bis 0,5 %.[1]

### 2.2 Laserschweißen von Al-Legierungen

Hinsichtlich der Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen ist in Bezug zu den konventionellen Verfahren die Anfälligkeit gegen Wasserstoffporenbildung, der Rissneigung und der Entfestigung im Schweißnahtbereich besonders zu beachten.

Die Heißrissanfälligkeit ist insgesamt beim Laserstrahlschweißen geringer als beim MIG- bzw. WIG-Schweißen. Der Bereich hoher Rissanfälligkeit ist kleiner und auf ein kleines Legierungsintervall begrenzt. Die Heißrissanfälligkeit steigt mit zunehmenden Magnesiumgehalten auf ein Maximum bei 0,8 % an und geht auf ein Minimum zwischen 2 % bis 3 % zurück. Für den Siliziumgehalt befindet sich das Maximum bei 0,5 %. Der Heißrissarme Bereich für Siliziumgehalte beginnt ab 1,5 %. Entsprechend ist die hier genutzte Legierung GD-AlSi10Mg als nicht heißrissgefährdet einzustufen und bedarf für die folgende Untersuchung keiner tieferen Betrachtung der Rissneigung. [2]

In der DIN EN 1706 wird die Schweißbarkeit der Legierung GD-AlSi10Mg als bedingt angegeben und ist nur unter Einhaltung enger Prozessgrenzen für den jeweilige Schweißprozess möglich. Die Schweißbarkeit ist nicht nur vom Prozess, sondern besonders auch vom Wasserstoffgehalt des Materials selbst abhängig. Es existieren somit mindestens zwei wesentliche Mechanismen, Werkstoff und Prozess, die die Porenbildung beim Laser-

schweißen beeinflussen. Dabei gilt für Schmelzschweißverbindungen ein zulässiger Wert von 10ml/100g Wasserstoffgehalt für porenarme Verbindungen als Richtwert. [3] Um Porenfreie Schweißnähte zu erzielen, ist ein Wasserstoffgehalt von  $\leq 0,3$  ppm oder  $\leq 0,33372$  ml/100g ( $1 \text{ ppm} \hat{=} 1,1124 \text{ ml/100g}$ ) notwendig. [4]

In Aluminium ist von allen Gasen nur Wasserstoff in größerem Anteil löslich. [5] Der Wasserstoffgehalt ist dabei das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Schweißreignung [6] und der Porosität der Schweißverbindung von Aluminium-Druckguss.

Nach Erkenntnissen von [4] wird durch Veränderung der Schweißgeschwindigkeit (Vorschub) die Porenanzahl als auch die Porengröße, mit steigenden Geschwindigkeiten, trotz Restgehalt an Wasserstoff im Werkstoff, positiv beeinflusst.

Auf die Möglichkeiten der Beeinflussung der Porenbildung durch statische oder dynamische Strahlvariationen wird auf die Literatur verwiesen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung und wird im Weiteren nicht näher erläutert.

### 3. Experimentelle Methodik

#### 3.1 Laserschweißversuche

Bei der Definition des zu untersuchenden Parameterbereichs wurden zwei Grenzen festgelegt. Die untere Grenze wird durch Prozessinstabilitäten definiert, die sich in Form von Lochbildung in der Schweißnaht äußern. Als obere Grenze wurde eine ungenügende Durchschweißung festgelegt. Innerhalb dieser Grenzen wurden zwei gleichverteilte Versuchspläne mittels Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments-DoE) erstellt. Die Abmessung der rotationsymmetrischen Halbzeuge sind  $D=26,5 \text{ mm}$ ,  $t=3 \text{ mm}$  sowie  $D=30,5 \text{ mm}$ ,  $t=2 \text{ mm}$  beide aus AlSi10Mg. Das konventionelle bzw. additiv hergestellte Bauteil wurden systematisch miteinander kombiniert, verschweißt und im Anschluss mittels visueller Begutachtung, Schlibbildern und Porositätsmessung mittels Micro-CT ausgewertet. In Plan eins wurden 80 und in Plan zwei 72 Proben erstellt, wobei die Pläne sich aufgrund der Geometrie der Ausgangswerkstoffe unterscheiden. Im Versuchsraum ist mittels Faserlaser mit Laserleistungen (cw) von bis zu 2000 W die Schweißgeschwindigkeit zwischen 1200 mm/min und 8500 mm/min (Plan2) und 900 mm/min bis 4800 mm/min (Plan 1), im Rahmen der in den Voruntersuchungen erhaltenen Prozessgrenzen, variiert wurden. Die Variation der Rauigkeit, Ebenheit der Fügefläche und des Wasserstoffgehaltes der Ausgangsmaterialien sind durch das Herstellungsverfahren bedingt und sind Bestandteil der Untersuchung.

Als Inputvariablen sind Leistung [W], Vorschub [mm/min], Rauigkeit [ $\mu\text{m}$ ], Ebenheit [ $\mu\text{m}$ ] und Wasserstoffgehalt [ppm] und als Ergebnisvariablen Schweißnahtbreite [mm], Schlankheitsgrad [mm], Porosität [%], Porenvolumen [ $\text{mm}^3$ ] und Porenanzahl in die Auswertung eingeflossen.

### 3.2. werkstofftechnische Analyse

Es ist festzustellen, dass der tatsächliche Wasserstoffgehalt der Ausgangsmaterialien, speziell des konventionellen Guss-Materials, über den empfohlenen Werten für eine porenfreie Schweißnaht liegt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Mittlere Messwerte der Ausgangsmaterialien und der Materialkombination

Material	Ebenheit	Rauheit	H <sub>2</sub> -Gehalt
Guss - AlSi10Mg	8,0 $\mu\text{m}$	1,1 $\mu\text{m}$	14,8 ppm
LPBF - AlSi10Mg	50,0 $\mu\text{m}$	10,5 $\mu\text{m}$	5,2 ppm
Kombination L-PBF - Guss	29,0 $\mu\text{m}$	5,8 $\mu\text{m}$	8,4 ppm

Die Rauheit und die Ebenheit, welche in Abbildung 1 gegenübergestellt sind, ist bei den mittels LPBF hergestellten Bauteilen signifikant größer als bei den konventionell Bauteilen und streut zudem stärker. Der Unterschied zwischen den Baugrößen ist minimal und im Bereich der Standardabweichung.

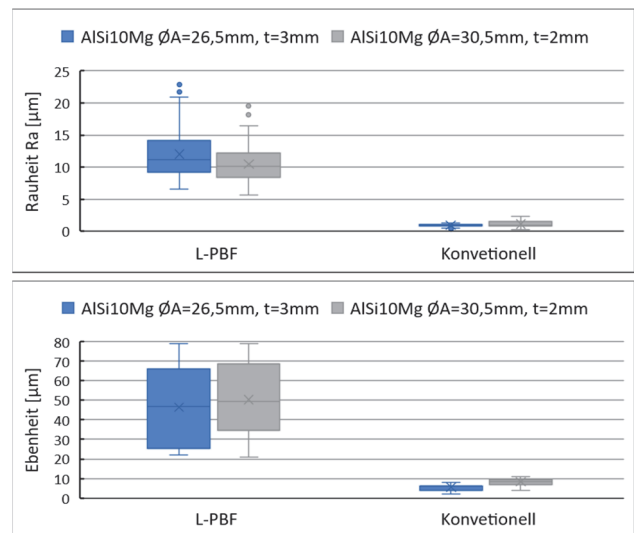


Abbildung 1: Diagramm Rauheit (oben) und Ebenheit (unten) der Ausgangsmaterialien nach Fertigungsverfahren

### 4. Ergebnisse

#### 4.1 Porosität

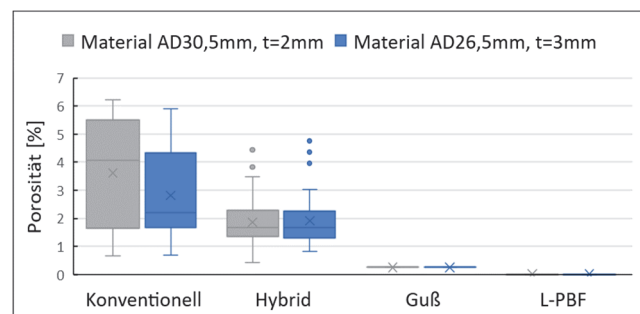


Abbildung 2: Porosität der Schweißverbindung und des Grundmaterials

Anhand von Abbildung 2 ist zu erkennen, dass die Porosität signifikant höher in der Schweißnaht bei den konventionellen Bauteilen ist.

ventionellen Gussbauteilen im Vergleich mit den Hybridbauteilen ist. Die Porosität des Grundmaterials beträgt bei LPBF im Mittel 0,0076 % und für das konventionelle Grundmaterial 0,2526 %.

Bezüglich der Minimal-, Mittel-, und Maximalporositätswerte der Schweißverbindungen sind diese bei den konventionellen Bauteilen wesentlich erhöht, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Porositätswerte der Schweißverbindung nach Material und Verbindungsart

Material		Min.	MW	Max.
AD30,5 mm, t=2 mm	konv.	0,67 %	3,61 %	6,22 %
	hybrid	0,43 %	1,86 %	4,44 %
AD26,5 mm, t=3 mm	konv.	0,69 %	2,82 %	5,91 %
	hybrid	0,82 %	1,91 %	4,75 %

#### 4.2 Porosität in Abhängigkeit von H<sub>2</sub> und Vorschub

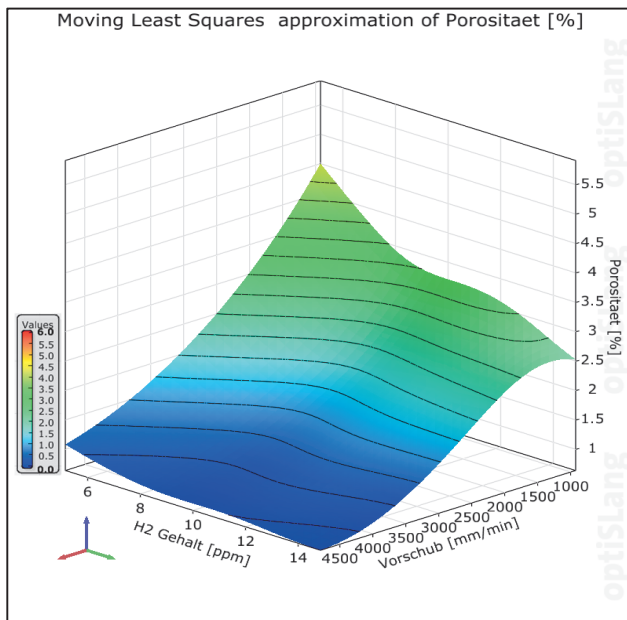


Abbildung 3: Porosität in Abhängigkeit von Wasserstoffgehalt und Vorschub bei Material AD26,5 mm, t=3 mm

Die Auswertung der Versuche bestätigt, die aus der Literatur bekannten Prozessbeobachtungen [4], dass eine erhöhte Schweißgeschwindigkeit die prozessbedingte Porenbildung entgegenwirkt und zu einer Reduzierung der Porosität in der Schweißnaht führt, siehe Abbildung 3 und 4. Dies trifft in unterschiedlicher Ausprägung für alle Versuche zu. Maßgeblich für die Lage geeigneter Prozessparameter zum Laserschweißen ist der Wasserstoffgehalt der Ausgangsmaterialien. Dieser bestimmt im erheblichen Maß die Grenzen und Höhe der Porosität der Schweißverbindung durch die werkstoffbedingte entstehende Porosität. Auffällig ist, dass die hybriden Verbindungen eine niedrigere Porosität als die konventionellen Verbindungen aufweisen. In Untersuchungen von [7] führen die Autoren an, dass aufgrund des hohen Wasserstoffgehaltes von 3,52 ppm im LAM - AlSi12 Werkstoff, die Ursache für die erhöhte Porosität in der Schweißnaht begründet ist. Bei den eigenen Versuchen

aus dieser Testreihe ist es genau umgekehrt. Entsprechend ist nicht das Grundmaterial selbst, sondern der Wasserstoffgehalt im Material von wesentlicher Bedeutung für die Verbindungsporosität. Dabei wirkt der Fügepartner mit dem kleineren Wasserstoffgehalt insgesamt porositätsmindernd auf die Schweißverbindung.

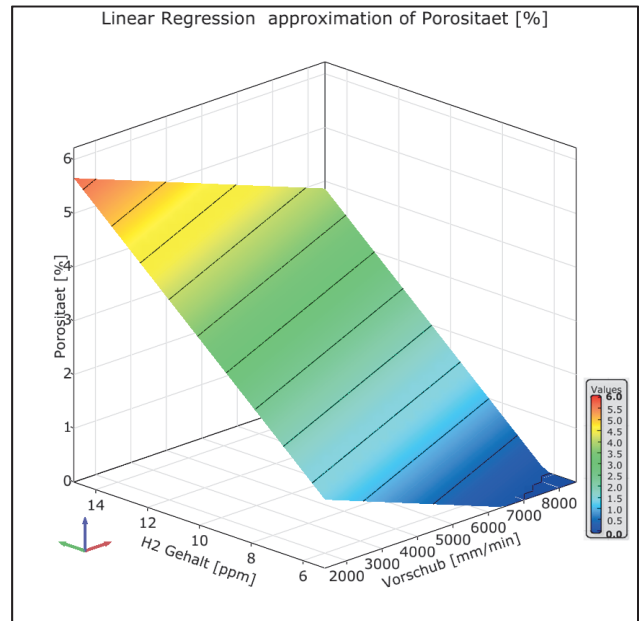


Abbildung 4: Porosität in Abhängigkeit von Wasserstoffgehalt und Vorschub bei Material AD30,5 mm, t=2 mm

#### 4.3 Porenvolumen in Abhängigkeit von Vorschub und Ebenheit

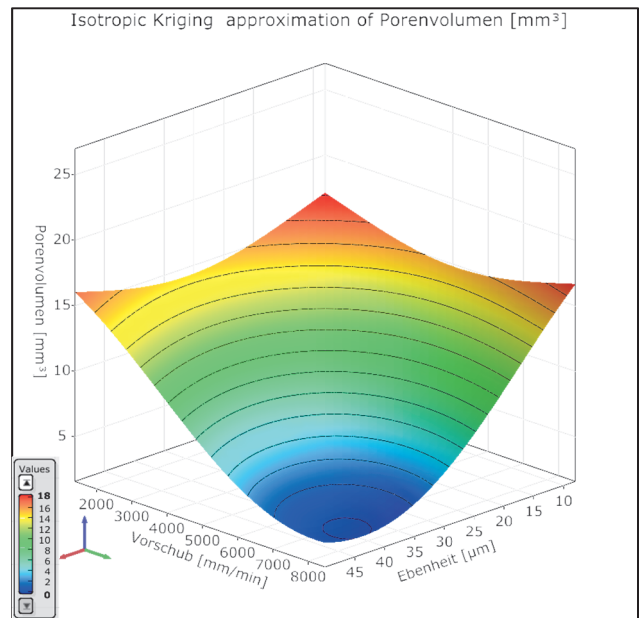


Abbildung 5: Porosität in Abhängigkeit von Ebenheit und Vorschub bei Material AD30,5 mm, t=2 mm

Als Eingangsparameter sind Rauheit und Ebenheit der Verbindungsflächen in die Versuche durch die Ausgangsmaterialien und die Herstellungsverfahren eingeflossen. Bei den Versuchen hat die Rauheit keinen wesentlichen Einfluss verursacht. Die Ebenheit der Materialien hat Einfluss auf das Porenvolumen in Verbindung mit der Schweißgeschwindigkeit was aus Abbildung 5

hervor geht. Es ist anzunehmen, dass die Ebenheit einen stärkeren Einfluss auf das Porenvolumen hat, je dünner die Wandungsstärke ( $t=2\text{ mm}$  oder  $t=3\text{ mm}$ ) des Bauteils ist. Mit steigender Schweißgeschwindigkeit reduziert sich in beiden Versuchsreihen das Porenvolumen.

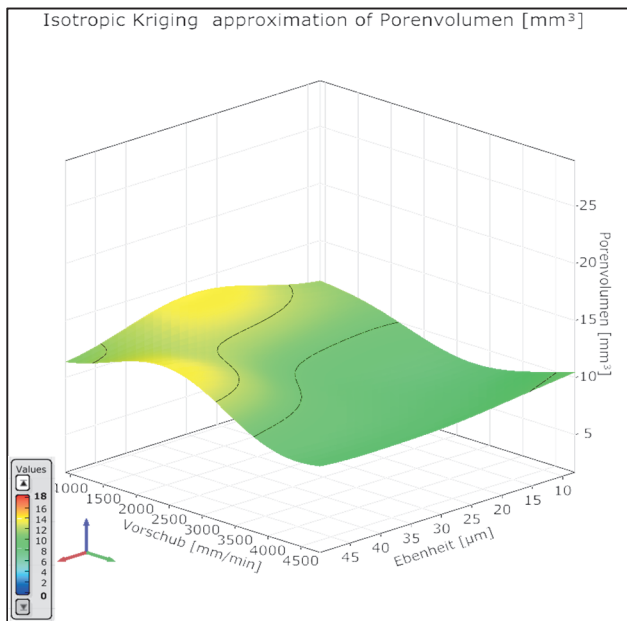


Abbildung 6: Porosität in Abhängigkeit von Ebenheit und Vorschub bei Material AD26,5 mm,  $t=3\text{ mm}$

Die Einzelauswertung der Messwerte zu dem minimalen und maximalen sowie Mittelwerten des Porenvolumens der Schweißverbindungen sind in erster Näherung ähnlich. Eine Halbierung der Mittelwerte und eine starke Reduzierung der Maximalwerte ist bei dünner Wandstärke im Hybridbauteil erkennbar. Es ist anzunehmen, dass die wesentlich höheren Schweißgeschwindigkeiten bei ausreichender Laserleistung das Porenvolumen, zumindest bei den Hybridbauteilen, positiv beeinflusst.

Tabelle 3: Porenvolumen der Schweißverbindung nach Material und Verbindungsart

Material		Min.	MW	Max.
AD30,5 mm, $t=2\text{ mm}$	konv.	1,6 mm <sup>3</sup>	15,9 mm <sup>3</sup>	27,0 mm <sup>3</sup>
	hybrid	1,9 mm <sup>3</sup>	7,8 mm <sup>3</sup>	19,0 mm <sup>3</sup>
AD26,5 mm, $t=3\text{ mm}$	konv.	1,7 mm <sup>3</sup>	14,7 mm <sup>3</sup>	29,0 mm <sup>3</sup>
	hybrid	5,2 mm <sup>3</sup>	11,7 mm <sup>3</sup>	28,0 mm <sup>3</sup>

## 5. Schlussbemerkung

Die durchgeführten Versuchsreihen zum Verschweißen von konventionellen mit LPBF Halbzeugen aus AlSi10Mg bestätigen die Machbarkeit der Herstellung dieser Verbindungsart mit dem Laserschweißen. Es konnte bestätigt werden, dass trotz Wasserstoffporenbildung aufgrund prozess- und werkstoffbedingter Herausforderungen beim Laserschweißen von Materialien wie AlSi10Mg, Prozesssicherheit erlangt werden kann. Wichtig dabei ist, die Parameterfestlegung für den Schweißprozess nach den Eigenschaften des Materials und die Art der Herstellung. Das finden und festlegen geeigneter

Werte für Leistung und Schweißgeschwindigkeit ist abhängig vom Wasserstoffgehalt des Materials und bestimmt maßgeblich die Restporosität in der Schweißnaht. Die geschweißten Proben haben die Anforderungen an Gasdichtheit der Verbindung und maximale Porengröße in der Schweißnaht nach Norm im Wesentlichen erfüllt. Mit der richtigen Wahl der Prozessparameter ist ein sicheres Prozessfenster für die Verarbeitung gegeben.

## Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden durch das BMWi im Rahmen des Projektes „Lake“ (FKZ 49MF180104) unterstützt. Hierfür sei ausdrücklich Danke gesagt.

## Literaturverzeichnis

- [1] C. Kramer, Aluminium Taschenbuch 1, Aluminium Verlag Düsseldorf (2002), 16. Auflage
- [2] C. Kramer, Aluminium Taschenbuch 3, Aluminium Verlag Düsseldorf (2003), 16. Auflage,
- [3] K. Nörrenberg, J. Ruge, Wasserstoffporosität von Aluminiumwerkstoffen, Teil II, Aluminium 68, Nr. 5 (1992), 406
- [4] R. Winkler, Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss, Dissertation, Universität Stuttgart, 2003, Forschungsberichte des IFSW, Laser in der Materialbearbeitung, Band 31, Herbert Utz Verlag, München, 2. Unveränderte Auflage, 2015
- [5] E. Fromm, Studie zur Wasserstoffaufnahme von Aluminiumschmelzen, Abschlussbericht, Schweizerische Aluminium AG; 1989
- [6] K. Nörrenberg, Untersuchung der Schweißbarkeit von Aluminiumdruckguss, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1991, Schweißtechnische Forschungsberichte, Band 44, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1992
- [7] C. Emmelmann, Hamburg, K. Wandtke, Apensen, F. Beckmann, Hamburg, Neue Leichtbaukonzepte für den Fahrzeugbau durch Laserfüge- und 3D-Druckverfahren, DVS-Berichte 327, S. 81 - 85