

Light Engineering für die Praxis

Frank Beckmann

# Laserschweißbarkeit von laseradditiv gefertigten Aluminiumbauteilen

*Herausgegeben von Claus Emmelmann*

 Springer Vieweg

# **Laserschweißbarkeit von laseradditiv gefertigten Aluminiumbauteilen**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Frank Beckmann

aus  
Hamburg

2024

1. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann
2. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Tag der mündlichen Prüfung: 08.04.2024

---

# Light Engineering für die Praxis

**Reihe herausgegeben von**

Claus Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

---

Frank Beckmann

# Laserschweißbarkeit von laseradditiv gefertigten Aluminiumbauteilen

 Springer Vieweg

Frank Beckmann   
Technische Universität Hamburg  
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447                      ISSN 2522-8455 (electronic)  
Light Engineering für die Praxis  
ISBN 978-3-662-69527-2              ISBN 978-3-662-69528-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69528-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) sowie bei der Laser Zentrum Nord GmbH (LZN) sowie der Fraunhofer Einrichtung für additive Produktionstechnologien (IAPT).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, Leiter des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik der Technischen Universität Hamburg, sowie der Laser Zentrum Nord GmbH und des Fraunhofer IAPTs für die intensive Betreuung der Arbeit sowie die langjährige und stets vertrauensvolle Zusammenarbeit. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze, Professor für Produktionstechnik am Institut für Produktionsmanagement und -technik der TUHH für die Übernahme des Korefates danken. Herrn Prof. Ralf God, Leiter des Instituts für Flugzeug-Kabinensysteme der TUHH danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Großer Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen während der gemeinsamen Zeit am iLAS, LZN und IAPT. Der kollegiale Zusammenhalt, der fachliche Austausch und die große Hilfsbereitschaft waren stets motivierend und wichtig für das Vorankommen in dieser Arbeit. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Robert Lau für vielfältige fachlichen Unterstützung, Herrn Malte Becker für umfangreiche messtechnische Unterstützung und Herrn Dr. Dirk Herzog für intensive fachliche und formale Unterstützung in der finalen Korrekturphase der Arbeit. Bedanken möchte ich mich zudem bei Prof. Dr.-Ing. Ralf-Eckhard Beyer, für die gewährten Freiräume sowie den steten Ansporn in der finalen Phase der Promotion.

Weiterhin gilt mein Dank allen wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien- und Abschlussarbeitern, die einen relevanten Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit geleistet haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die stets mit Motivation und Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben und auf den ein oder anderen Urlaub oder ein gemeinsames Wochenende zugunsten dieser Doktorarbeit verzichtet haben.

Hamburg, im April 2024

Frank Beckmann





# Zusammenfassung

Die additive Fertigung von Aluminiumbauteilen im sogenannten pulverbettbasierten Laserschmelzprozess (engl. L-PBF) hat bereits eine weite Verbreitung in der industriellen Praxis erlangt. Hierbei werden die Bauteile jedoch in der Regel alleinstehend genutzt oder mittels Schrauben, Kleben oder Nieten in Gesamtstrukturen eingebunden. Eine stoffschlüssige Verbindung von L-PBF-Bauteilen untereinander oder mit konventionell gefertigten Strukturen mittels Laserstrahlschweißen würde weitere Anwendungspotentiale eröffnen, ist bisher jedoch kaum erforscht. Schweißversuche an Aluminium-L-PBF-Material zeigen eine sehr hohe Schweißnahtporosität, die die Grenzwerte der gültigen Norm weit übersteigt und aktuell einem industriellen Einsatz entgegen steht.

Im Rahmen dieser Dissertation wird somit ein tiefgehendes Verständnis über die Laserschweißbarkeit von laseradditiv gefertigten erarbeitet und Methoden entwickelt, um diese zu optimieren. Hierfür erfolgt eine werkstoffkundliche Eingrenzung der Porenursache. Über die mikroskopische Gefügeanalyse, die Elementaranalyse und die Wasserstoffanalyse wird der hohe Wasserstoffgehalt des Materials als Porenursache identifiziert.

Aus Basis dieser Erkenntnis wird die Schweißeignung der L-PBF-Bauteile in drei Bereichen analysiert und optimiert. In der Schweißprozessanalyse werden Laserschweißparameter sowie angepasste Systemtechnik, wie Doppelfokusoptiken, Strahlpendelung und Ring-Mode-Laser erforscht und die Porenentstehung sowie deren Ausgung positiv beeinflusst.

Über eine Optimierung des L-PBF-Prozesses wird der Ursache der Nahtporosität, der hohe Wasserstoffgehalt des L-PBF-Materials bereits in der Entstehung der Bauteile entgegengewirkt. Hierfür werden Einflüsse des Pulverzustandes sowie unterschiedlicher Pulvertrocknungsmethoden erforscht. Weiterhin werden Empfehlungen aufgestellt, die entlang der L-PBF-Prozesskette den Wasserstoffeintrag ins Material und somit die Porenursache minimieren.

Additiv gefertigter Bauteile bieten besondere Freiheitsgrade bei der Bauteilgestaltung. Im dritten Analysebereich, der Konstruktion, werden die sich hieraus ergebenden Vereinfachungspotentiale, aber auch Herausforderungen auf die laserschweißgerechte Bauteilgestaltung erforscht. Darauf aufbauend werden Konstruktionsrichtlinien erarbeitet, die dem Konstrukteur die prozessgerechte Gestaltung dieser Baugruppen erleichtern.

Anhand von Probekörpern sowie einer industriellen Baugruppe werden die Erkenntnisse der drei vorgenannten Einzelanalysen kombiniert und die sichere Erreichung normgerechter Schweißergebnisse demonstriert.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit ermöglichen das normgerechte Laserstrahlschweißen von Aluminium-L-PBF-Bauteilen. Hiermit wird es ermöglicht diese Bauteile untereinander zu verbinden, sowie die Einbindung der Bauteile in konventionell gefertigte Strukturen. Durch neuen Hybridbauweisen, bei denen hochfunktionale L-PBF-Segmenten, mit kostengünstigen konventionellen Segmenten kombiniert werden entstehen wirtschaftlich und funktional optimierte Gesamtbaugruppen. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich in weiten Teilen auch auf andere Schmelzschweißverfahren, z.B. das Metall-Schutzgas-Schweißen übertragen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>3</b>
2.1	Laseradditive Fertigung von Aluminiumbauteilen	3
2.1.1	Verfahrensgrundlagen des L-PBF	3
2.1.2	Laserstrahlschmelzen von Aluminiumbauteilen	6
2.1.3	Verfahrensgerechte Konstruktion für das L-PBF	7
2.2	Laserstrahlschweißen	8
2.2.1	Systemtechnik	8
2.2.2	Laserschweißprozess	10
2.2.3	Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen	18
2.2.4	Anwendungen von lasergeschweißten L-PBF-Bauteilen	21
2.2.5	Grundlagenbetrachtungen zum Schweißen von L-PBF-Bauteilen	23
2.2.6	Grundlagen der laserschweißgerechten Konstruktion	24
<b>3</b>	<b>Herausforderung, Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>27</b>
3.1	Porenphänomen beim Laserschweißen von additiv gefertigten Aluminiumbauteilen	27
3.2	Zielsetzung	29
3.3	Vorgehensweise	29
3.4	Werkstoffe und Equipment	31
3.4.1	Werkstoffe	31
3.4.2	Herstellung der Gussproben	31
3.4.3	Herstellung der L-PBF-Proben	31
3.4.4	Systemtechnik für das Laserstrahlschweißen	33
3.5	Bewertung der Ergebnisse	34
<b>4</b>	<b>Werkstoffkundliche Eingrenzung der Porenursache</b>	<b>35</b>
4.1	Mikroskopische Gefügeanalyse	35
4.1.1	Grundwerkstoff	35
4.1.2	Wärmeeinflusszone, Schmelzlinie und Schweißnaht	37
4.1.3	Vergleich der Siliziumgehalte in Schweißnaht und Grundwerkstoff	38
4.1.4	Ergebnis der mikroskopischen Analysen	40
4.2	Elementaranalyse	41
4.3	Wasserstoffanalyse	43
4.4	Zusammenfassung der Materialanalyse	46

---

<b>5</b>	<b>Schweißprozessanalyse</b>	<b>47</b>
5.1	Schutzgas	48
5.2	Schweißgeschwindigkeit	52
5.3	Schweißen mit gepulstem Laser	55
5.4	Strahlpendelung	56
5.5	Doppelfokustechnik	62
5.6	Ring-Mode-Laser	65
5.7	Schweißstrategien für hybride Verbindung	68
5.8	Zusammenfassung der Schweißprozessanalyse	70
<b>6</b>	<b>Maßnahmen zur Minderung des Wasserstoffgehalts im L-PBF-Bauteil</b>	<b>71</b>
6.1	Einflussanalyse auf Wasserstoffgehalt des L-PBF-Bauteils	71
6.2	Vergleich von Neupulver zu recyceltem Pulver	73
6.3	Pulvertrocknung im Ofen	74
6.4	Bauteilherstellung mit Bauplattenheizung	76
6.5	In-Prozess-Trocknung	76
6.6	Wärmebehandlung zur Wasserstoffausgasung	79
6.7	Heißisostatisches Pressen	80
6.8	Technologische und wirtschaftliche Bewertung der erprobten Optimierungsansätze	83
6.9	Handlungsempfehlungen entlang der L-PBF-Prozesskette	83
<b>7</b>	<b>Konstruktionsempfehlungen für laserstrahlgeschweißte Aluminium-L-PBF- Bauteile</b>	<b>91</b>
7.1	Aufbau des Konstruktionskataloges	91
7.2	Allgemeine Gestaltungsprinzipien der hybriden Bauweise	93
7.2.1	Auftrennen der Baugruppe	93
7.2.2	Leichtbau	95
7.2.3	Auswahl und Gestaltung des konventionellen Fügepartners	96
7.2.4	Festigkeit der hybriden Baugruppe	96
7.3	Gestaltungsempfehlungen basierend auf den Laserschweißprozessanforderungen	98
7.3.1	Zugänglichkeit, Nahtverlauf und Materialstärken	98
7.3.2	Spanngerechte Gestaltung	100
7.3.3	Schmelzbadabstützung	102
7.3.4	Nahtvorbereitung	104
7.3.5	Stoßgestaltung	109
7.4	Gestaltungsempfehlungen basierend auf den Spezifika der Laseradditiven Fertigung	111
7.4.1	Bauteilausrichtung	111
7.4.2	Verzugsreduktion	112

<b>8</b>	<b>Validierung</b>	<b>115</b>
8.1	Zusammenführung der Einzelmaßnahmen	115
8.1.1	Probenherstellung mit optimierter Prozessführung	115
8.1.2	Geometrische Nahtqualität und Porosität	116
8.1.3	Härte und mechanische Festigkeit	117
8.2	Validierung an einer Beispielbaugruppe	119
8.2.1	Laserschweißgerechte Konstruktion	120
8.2.2	Fertigung der L-PBF-Bauteile	123
8.2.3	Laserschweißprozessführung	123
8.2.4	Nahtfestigkeit im Crashversuch	125
8.3	Wirtschaftliche Potentiale	125
8.3.1	Ausschussvermeidung im Schweißprozess	126
8.3.2	Ermöglichen wirtschaftlicher Bauweisen	126
8.3.3	Reduktion der Positionier- und Spannaufwände	126
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Anhang: Konstruktionskatalog</b>	<b>143</b>



# Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
LAM	Laser Additive Manufacturing / laseradditive Fertigung
L-PBF	Laser powder bed fusion / pulverbettbasiertes Schmelzen mittels Laser
MSG	Metall Schutzgas
ppm	Parts per Million
REM	Rasterelektronenmikroskop
SLM	Selective Laser Melting
SPP	Strahlparameterprodukt
STL	Standard Tessellation Language
WEZ	Wärmeeinflusszone