

Qualifizierung des Laserstrahl-Auftragschweißens zur generativen Fertigung von Luftfahrtkomponenten

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Johannes Michael Fidelis Witzel

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Dezember 2014

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Berichte aus der Lasertechnik

Johannes Witzel

**Qualifizierung des Laserstrahl-Auftragschweißens
zur generativen Fertigung von Luftfahrtkomponenten**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3470-7

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und am Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A. danke ich für die Überlassung des Themas. Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Dr. Andrés Gasser und Herrn Adj. Prof. (RMIT) Dr.-Ing. Ingomar Kelbassa danke ich für ihre Unterstützung, motivierenden Anregungen und die Durchsicht des Manuskriptes. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Norbert Pirch für die Unterstützung bei der CAD Programmierung sowie für die zahlreichen Fach-Diskussionen bedanken.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Lasertechnik und der Gruppe Auftragschweißen des Fraunhofer ILT bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere danke ich meinen Kollegen Chen Hong, Marco Goebel, Thomas Schopphoven, Johannes Schrage, Gerhard Backes, Stefan Jung, Frank Mentzel, Jochen Kittel, Jana Kelbassa, Patrick Albus, Moritz Alkhayat, Stefanie Linnenbrink, Wolfgang Küppers und Herbert Horn-Solle.

Zudem bedanke ich mich bei meinen Studien-, Diplom-, Projekt-, Bachelor- und Masterstudenten für ihre geleistete Arbeit. Ihr Engagement war auch Ansporn für mich, diese Arbeit voranzubringen. An dieser Stelle möchte ich mich ebenfalls bei Daniel Waschkau, Tobias Dörpinghaus, Marc Pingel, Manuel Wolter, Carsten Zibull, Salay Stannard, Sven Gäsert und Björn Wiese bedanken.

Neben den Kolleginnen und Kollegen des ILT und LLT gilt mein Dank auch den Kollegen des Fraunhofer IPT, die mich sowohl mit Hintergrundinformationen als auch durch Bereitstellen und Nachbearbeiten von Demonstratorbauteilen unterstützt haben.

Mein Dank geht auch an die Herren Dr. Thomas Haubold, Dr. Andreas Kohns sowie Herrn Jan Strässer von Rolls-Royce Deutschland für Ihre Diskussionsbereitschaft und die Durchsicht dieser Arbeit sowie an die Erich-Becker-Stiftung, die durch ihr großzügig gewährtes Stipendium diese Arbeit maßgeblich unterstützt hat.

Meiner Familie danke ich für die immerwährende Unterstützung in den Jahren meiner Ausbildung und meiner Ehefrau Akane möchte ich von Herzen für ihr Verständnis, ihren Optimismus und ihre Aufmunterung danken.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3 Stand der Technik	7
3.1 Definition und Anwendungsbereiche der Generativen Verfahren	7
3.2 Verfahrensprinzip Laser-Auftragschweißen	10
3.3 Werkstoffe und Entwicklungstrends	11
4 Metallurgische Analyse- und mechanische Testverfahren	17
4.1 NDT-Analyseverfahren	17
4.2 DT-Analyseverfahren	18
5 Anlagen- und Systemtechnik	20
5.1 Pulverförderer	20
5.2 Pulverzufuhrsysteme	20
5.3 Bearbeitungsoptiken	21
5.4 Strahlquellen	22
5.5 Anlagen	22
5.6 Experimentelle Aufbauten	23
6 Verwendete Werkstoffe	25
6.1 Nickelbasis-Superlegierung Inconel 718 (IN 718)	25
6.1.1 Gefügebestandteile im Werkstoff IN 718	29
6.1.2 Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften	31
6.2 Pulverförmiger Zusatzwerkstoff	34
7 Verfahrensentwicklung	37
7.1 Steigerung der Auftragsrate und Entwicklung eines empirischen Werkstoffmodells	37
7.1.1 Herstellung von Zugproben und erzielte statische mechanische Eigenschaften	50

7.1.2	Entwicklung eines empirischen Werkstoffmodells zur Abschätzung der Zugfestigkeit	66
7.2	Übertragung geeigneter Verfahrensparameter und –strategien auf komplexe bauteilspezifische Modellgeometrien	79
7.3	Umsetzung des Verfahrens mit CAD/CAM/NC-Kopplung an einem Originalbauteil	91
8	Zusammenfassung und Ausblick	105
9	Literatur	VI
10	Anhang	XVII
10.1	Untersuchte Verfahrensparameter für 2 mm Spurbreite sowie ermittelte Werte für Auftraggraten, Porositäten und Volumenenergiedichten	XVII
10.2	Untersuchte Verfahrensparameter für 4 mm Spurbreite sowie ermittelte Werte für Auftraggraten, Porositäten und Volumenenergiedichten	XIX
10.3	Untersuchte Verfahrensparameter für 10 mm Spurbreite sowie ermittelte Werte für Auftraggraten, Porositäten und Volumenenergiedichten	XX
10.4	Beschichtungsdiagramm für 2 mm, 4 mm und 10 mm breite Einzelspuren	XXI
10.5	Statische mechanische Eigenschaften nach Festigkeitsprüfung	XXI
10.6	Zuordnung der Verfahrensparameter zu den Zugprobennummern	XXIV
10.7	Parameter der Porenverteilung und ermittelte Werte des DAS	XXV
10.8	Kalibrierkurve zur Bestimmung der Pulvermassenströme	XXVI
10.9	Ergebnis einer BSE Untersuchung zur Bestimmung der Phasen im Gefüge	XXVIII
10.10	Kalibrierkurve zur Anpassung des Laserstrahldurchmessers	XXVIII
10.11	Intensitätsverteilung der Laserstrahlung	XXX
10.12	Fertigungszeichnung Demonstrator-BLISK	XXXIII
10.13	Ressourcenverbrauch bei der Pulverherstellung – Protokoll des Interviews	XXXIV