

Thorsten Twiehaus

**Optimierung des Laserstrahl-
schweißens im Vakuum zu einem
hochqualitativen Schweißverfahren
für nichtrostende Stähle und
Refraktärmetalle**

Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 2/2023

Shaker Verlag

**Optimierung des Laserstrahlschweißens im Vakuum
zu einem hochqualitativen Schweißverfahren für
nichtrostende Stähle und Refraktärmetalle**

**Optimization of Laser Beam Welding under Vacuum
to a High-quality Welding Process for
Stainless Steels and Refractory Metals**

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

vorgelegt von
Thorsten Twiehaus

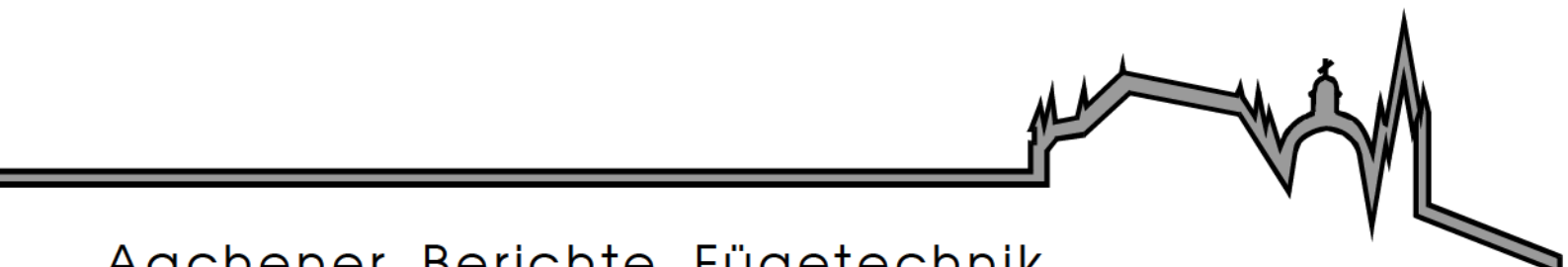
Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen
apl. Prof. Dr.-Ing. Arnold Gillner

Tag der mündlichen Prüfung: 09.08.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfü-
bar.

Thorsten Twiehaus

**Optimierung des Laserstrahl-
schweißens im Vakuum zu einem
hochqualitativen Schweißverfahren
für nichtrostende Stähle und
Refraktärmetalle**



Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 2/2023

Shaker Verlag

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, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9296-7

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der FEF Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft Fügetechnik GmbH in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, für die Unterstützung bei der Verwirklichung meines Promotionsvorhabens. Das vertrauensvolle Arbeitsverhältnis und die Entwicklungsmöglichkeiten in einem spannenden und lehrreichen Themenumfeld haben mir bei meiner fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung sehr geholfen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Arnold Gillner für die Übernahme des Korreferats im Rahmen meines Promotionsvorhabens und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Carlo Holly für den Prüfungsvorsitz.

Ein weiterer besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Simon Olschok für die fachlichen Diskussionen und die stets hilfreichen Einschätzungen zu Herausforderungen im Bereich des Strahlschweißens. Auch meinen Kolleginnen und Kollegen von der FEF GmbH, namentlich Matthias Angerhausen, Guido Buchholz, Martin Christ, Christoph Geffers, Pascal Österreich, Alexandros Pipinikas und Marion Purrio sowie den Kolleginnen und Kollegen aus der Strahlabteilung des ISF möchte ich für die abwechslungsreiche und spannende gemeinsame tägliche Arbeit sehr danken.

Ebenso möchte ich mich bei allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von der FEF und dem ISF (nicht-wissenschaftlich und wissenschaftlich) für die sehr kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Mein ausdrücklicher Dank gilt auch den studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern, die mich bei meinen Arbeitsinhalten unterstützt haben und unterstützen.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Familie und meiner Partnerin. Meine Eltern Hermann und Ira Twiehaus und mein Bruder Niklas, ihr habt mich bedingungslos auf all meinen bisherigen Wegen bekräftigt und gefördert. So habt ihr sehr dazu beigetragen, dass ich meinen Weg bis hin zur Promotion erfolgreich beschreiten konnte. Und meine Partnerin Sarah, die meine berufs- und promotionsbedingten Abwesenheiten mit viel Verständnis mitgetragen hat und mich stets liebevoll und bestärkend begleitet hat. Vielen Dank für Alles!

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis	IV
III	Tabellenverzeichnis	XII
IV	Abkürzungen	XIII
V	Formelzeichen.....	XVI
VI	Kurzfassung	XIX
VII	Abstract.....	XX
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Laserstrahlschweißen im Vakuum	3
2.1.1	Verfahrensprinzip Laserstrahlschweißen.....	3
2.1.2	Einfluss des Umgebungsdrucks	8
2.1.3	Schutzsystem – Einkoppelfenster	13
2.1.4	Abgrenzung zum Elektronenstrahlschweißen.....	14
2.2	Schweißen von Refraktärmetallen	16
2.2.1	Titanwerkstoffe.....	17
2.2.2	Niob	18
2.3	Modellbildung in der Schweißtechnik	19
2.3.1	Modellbegriff	20
2.3.2	Strömungsmodell/Strömungssimulationen	20
3	Zielsetzung der Arbeit	22
3.1	Problemstellung und Zielsetzung	22
3.2	Lösungsansatz.....	25
4	IST-Analyse – LaVa-Schweißen von nichtrostenden Stählen	27
4.1	Versuchsaufbau und Versuchsrandbedingungen	28
4.1.1	Anlagenaufbau Focus LaVa 95	28

4.1.2	Versuchswerkstoffe	31
4.1.3	Steuergrößen – Prozessparameter	31
4.1.4	Definition der Schweißnaht-Zielgrößen	33
4.2	Einfluss der Prozessparameter auf die Schweißnahtqualität	36
4.3	Einfluss der Prozessströmungen	44
4.3.1	Beobachtungen zum Prozessverhalten beim LaVa-Schweißen	47
4.3.2	Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten beim LaVa-Schweißen	50
4.4	Einfluss der Prozessemissionen	58
4.4.1	Quantifizieren der entstehenden Prozessemissionen	58
4.4.2	Zusammensetzung der Prozessemissionen	60
4.4.3	Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung	65
5	Modellerstellung	68
5.1	Theoretisches Anlagenmodell (Modellbildung)	68
5.2	Strömungsmodell (Simulationsmodell)	70
5.2.1	Strömungsmodell in ANSYS	70
5.2.2	Verifikation des Strömungsmodells	78
5.3	Simulationsergebnisse/Prozessmodell („Ersatzmodell“)	80
5.3.1	Definition des Auswertebereichs	80
5.3.2	Modellvalidierung (Vergleich „Realversuch“ <-> „Strömungsmodell“)	83
6	Optimierung der Prozessführung	87
6.1	Betrachtung des Anlagenaufbaus	87
6.1.1	Randbedingungen für Optimierung	87
6.1.2	Simulative Optimierung des Anlagenaufbaus	90
6.2	Betrachtung der prozessseitigen Anpassungsmöglichkeiten	94
7	Übertragbarkeit der Optimierung auf Refraktärmetalle	116
7.1	Schweißen von Titanlegierungen	116
7.1.1	Referenzschweißungen	116
7.1.2	Übertrag der bisherigen Erkenntnisse	118

7.2	Schweißen von Niob	123
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
9	Literaturverzeichnis	133
9.1	Studentische Arbeiten	143
10	Anhang	144
10.1	Analysen der verwendeten Grundwerkstoffe	144
10.2	Strahlvermessung	145
10.3	Versuchspläne für Untersuchung Einfluss Prozessparameter	146
10.4	Korrosionsuntersuchungen	148
10.5	Spektrometer-Messungen	149
10.6	Strömungsmodell	151
10.7	Prüfverfahren	152
10.7.1	Sichtprüfung	152
10.7.2	Makro- und Mikroschliff	152
10.7.3	Härteprüfung	153
10.8	Visualisierungen Morphologischer Kasten	153
10.9	Schweißungen von Titanlegierungen	160