

Sebastian Stüßer-Ufer

**Modellgestützte Determinierung der
Strahlcharakteristika beim Elektronen-
strahlschweißen und ihre Auswirkung
auf das Prozessresultat**



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

Band 4/2022

Shaker Verlag

**Modellgestützte Determinierung der Strahlcharakteristika beim
Elektronenstrahlschweißen und ihre Auswirkung auf das Prozessresultat**

**Model-Based Determination of the Beam Characteristics in Electron
Beam Welding and their Effect on the Process Result**

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

vorgelegt von

Sebastian Stüßer-Ufer, geborener Ufer

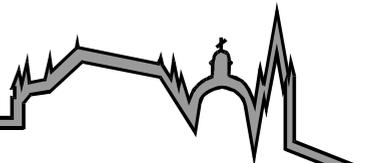
Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm

Tag der mündlichen Prüfung: 23.02.2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online
verfügbar.

Sebastian Stüßer-Ufer

**Modellgestützte Determinierung der
Strahlcharakteristika beim Elektronen-
strahlschweißen und ihre Auswirkung
auf das Prozessresultat**



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

Band 4/2022

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, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8784-0

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 Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Reisgen danke ich herzlich für die Gelegenheit und Unterstützung, an derart komplexen und interessanten Themen forschen zu können.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes danke ich für die hervorragende und kollegiale Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern und Kollegen der Abteilung Strahlschweißen, insbesondere Stefan Jakobs, Aleksej Senger und Timm Evers. Ohne den intensiven Austausch wären viele Lösungen unberücksichtigt geblieben.

Ein weiterer großer Dank gebührt den technisch-administrativen Mitarbeitern des Institutes in der mechanischen und elektrischen Werkstatt, der Metallografie und EDV, die meine Anliegen unbürokratisch, mit äußerster Präzision umsetzten.

Meine größte Dankbarkeit gilt jedoch meiner Familie, allen voran meiner Mutter Hilde. Ohne die bedingungslose Unterstützung meiner Eltern wäre mir der Weg in die Akademische Welt nicht möglich gewesen.

Meiner Frau Barbara danke ich in aller Liebe. Ihr Rückhalt hat mich während der stressigen Zeit gestützt und meine Motivation aufrechterhalten. Ihre Geduld gab mir Zeit, meine Zweifel auszuräumen.

I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis	I
II. Abbildungsverzeichnis	III
III. Tabellenverzeichnis	VI
IV. Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	VII
V. Zusammenfassung	XI
VI. Abstract	XII
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Zielsetzung	3
3 Grundlagen der Strahlverfahren und der Strahlvermessung	6
3.1 <i>Strahlerzeugung, Strahlformung und Strahlführung</i>	6
3.1.1 Elektronenstrahlerzeugung	6
3.1.2 Die Kathode	9
3.1.2.1 Wehnelt und Anode	10
3.1.3 Strahlformung und Führung	13
3.2 <i>Strahlvermessung</i>	15
3.2.1 Messprinzipien	15
3.3 <i>Aufbereitung und Interpretation von Messergebnissen</i>	19
3.4 <i>Strahl-Stoff-Wechselwirkung</i>	22
3.4.1 Energieumsetzung an der Strahlauftreffstelle	23
3.4.2 Elektronenstrahlschweißen / der Tiefschweißeffekt.....	23
3.4.3 Die Strahl-Stoff-Wechselwirkung beim Tiefschweißprozess	24
4 Entwicklung des Strahlvermessungsgerätes DiaBEAM	28
4.1 <i>Entwicklung der Messhardware</i>	31
4.1.1 Das Messprinzip	31
4.1.2 Sensorbauformen.....	33
4.1.3 Steuerungsmodul	34
4.1.4 Messkopf.....	34
4.1.5 Kaustiksensoren.....	34
4.1.6 Miniatursensoren.....	35
4.2 <i>Zentrale Funktionen</i>	35
5 Fehler bei der Strahlvermessung	39
5.1 <i>Bedienerinduzierte Fehler, Installation und Kalibrierung</i>	41
5.2 <i>Nutzen und Genauigkeit</i>	45

5.3	<i>Referenzgeometrie</i>	46
5.3.1	Tauglichkeit der Referenzgeometrie und Verschleiß	47
5.3.2	Automatische Wahl der Messauflösung	53
5.4	<i>Einfluss des Rausch-Signal -Verhältnisses</i>	55
6	Korrelation von Strahlerzeugung, Strahlvermessung und Schweißresultat	58
6.1	<i>Versuchsaufbau/ Experimentalentwurf</i>	60
6.1.1	Maschinendaten	63
6.1.2	Strahlvermessung	63
6.1.3	Einschweißuntersuchungen	67
6.1.4	Strahlberechnung	70
6.2	<i>Messergebnisse und Ergebnisverknüpfung</i>	71
6.2.1	Maschinendaten	71
6.2.2	Strahlvermessung	77
6.2.2.1	Analytische Beschreibung der Strahlerzeuereigenschaften	77
6.2.2.2	Prozesseinfluss auf den Fokus	82
6.2.2.3	Strahlvermessungsergebnisse im Detail	88
6.2.3	Einschweißuntersuchungen	93
6.2.3.1	Phasenverschiebung:	96
6.2.3.2	Maximalwerte Schmelzfläche und Einschweißtiefe	99
6.2.3.3	Änderungsamplitude	102
6.2.4	Strahlberechnung	105
7	Anwendungstechnischer Nutzen	112
8	Fazit und Ausblick	115
9	Literaturverzeichnis	118
10	Anhang	123