

**Geometriebasierte Prozessüberwachung
und -regelung beim Laserstrahlschweißen
durch koaxiale Beobachtung des
Schmelzbades mit Fremdbeleuchtung**

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Boris Regaard

aus Leonberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

Tag der mündlichen Prüfung: 24. August 2012

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Berichte aus der Lasertechnik

Boris Regaard

**Geometriebasierte Prozessüberwachung und
-regelung beim Laserstrahlschweißen durch koaxiale
Beobachtung des Schmelzbades mit Fremdbeleuchtung**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1723-6

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

Unserem Sohn Tamino Lucien

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen und als Senior Engineer Image Processing and Optics am Fraunhofer Center for Laser Technology, Plymouth, Michigan. Sie fasst Erkenntnisse einer Vielzahl unterschiedlicher Projekte zusammen, die die hier entwickelten Verfahren und Werkzeuge einsetzen.

Meinen herzlichsten Dank möchte ich an dieser Stelle Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhard Poprawe M.A. für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit aussprechen. Ohne seine wohlwollende Förderung wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Für die Übernahme des Koreferates danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, dem Leiter der Instituts für Regelungstechnik der RWTH Aachen.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Stefan Kaierle, der mit vielen fruchtbaren Diskussionen dieses Projekt unterstützt und begleitet und mit der kritischen Durchsicht des Manuskripts wichtige inhaltliche Anregungen gegeben hat.

Herzlich danken möchte ich auch allen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer ILT und CLT sowie allen studentischen Hilfskräften, Diplom- und Studienarbeitern, die dieses Projekt tatkräftig unterstützt haben. In diesem Zusammenhand danke ich Herrn Dipl.-Ing. Peter Abels, Dipl.-Ing. Martin Dahmen, Dipl.-Ing. Wolfgang Fiedler, Dipl.-Ing. Christian Fraas, Dipl.-Ing. Christoph Franz, Dipl.-Ing. Jens Gedicke, Dr.-Ing. Stefan Heinemann, Dipl.-Ing. Hans Herfurth, cand.-Ing. Carlo Holly, cand.-Inform. Hans Jabs, Dr.-Ing. Christian Kratzsch, cand.-Inform. Sebastian Krämer, Dipl.-Ing. Stefan Mann, Dipl.-Ing. Anas Moalem, B. Eng. Rahul Patwa, Dipl.-Phys.; Dipl.-Inform. Jochen Petereit, Dipl.-Ing. Torssten Schmidt, Dipl.-Inform. Markus Stahl und Dipl.-Ing. Jens-Peter Steinbrecher. Ein besonderer Dank geht auch an Herrn cand.-Ing. Julian Löchner für die Korrektur des Manuskripts.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meiner Frau Sabine, die mich mit fast grenzenloser Geduld während all der Jahre unterstützt hat, und unserem Sohn Tamino, der mit seiner Geburt das Zieldatum für die Fertigstellung dieser Arbeit festgelegt hat.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Schweißen mit Laserstrahlung.....	3
2.1.1 Verfahrensprinzip Laserstrahl-tiefschweißen.....	3
2.1.2 Verfahrensprinzip Punktschweißen.....	5
2.1.3 Plasmabildung.....	5
2.1.4 Ursachen für Schweißnahtunregelmäßigkeiten.....	7
2.1.5 Klassifizierung der Schweißnahtunregelmäßigkeiten.....	9
2.2 Sensorprinzipien zur Erfassung von Prozessgrößen.....	11
2.2.1 Klassifizierung prozessnaher Sensoren.....	11
2.2.2 Erfassung von Prozesseingangsgrößen.....	12
2.2.3 Erfassung von Prozesszustandsgrößen.....	18
2.2.4 Erfassung von Prozessergebnisgrößen.....	21
2.3 Anwendung prozessnaher Sensoren beim Laserstrahlschweißen.....	21
2.3.1 Terminologie der Verfahren zur Parameter- und Prozesskontrolle.....	21
2.3.2 Prozessüberwachung beim Nahttiefschweißen.....	23
2.3.3 Prozessüberwachung beim Punktschweißen.....	24
2.3.4 Ergebnisgrößenüberwachung.....	25
2.3.5 Prozesssteuerung und -regelung.....	26
2.3.6 Eingangsgrößenüberwachung am Beispiel der Bahnvermessung.....	27
2.3.7 Eingangsgrößenregelung am Beispiel der Nahtfolgeregelung.....	27
3 Aufgabenstellung.....	30
3.1 Zielstellung	30
3.2 Vorgehen und Prinzip der koaxialen Beobachtung mit Fremdbeleuchtung.....	31
4 Sensortechnik zur geometriebasierten Prozessbeobachtung.....	36
4.1 Bilderfassung.....	36
4.1.1 Kopplung des Beobachtungsstrahlengangs.....	36
4.1.2 Auslegung der Abbildungsoptik.....	40
4.1.3 Fremdbeleuchtungsquelle.....	45
4.1.4 Kameratechnik.....	50
4.2 Bildverarbeitung.....	55
4.2.1 Hardwareanforderungen.....	55
4.2.2 Softwaretechnik.....	58
4.2.3 Bildvorbereitung.....	61
4.3 Anwendbarkeit des Beobachtungsprinzips	64

5 Bildverarbeitung und Merkmalsextraktion.....	67
5.1 Referenzbildvergleich.....	67
5.1.1 Differenzbasierte Ähnlichkeitsfunktionen.....	67
5.1.2 Kreuzkorrelation.....	68
5.1.3 Korrelationskoeffizient.....	69
5.1.4 Optimierungsverfahren für das Referenzbildvergleichsverfahren.....	69
5.2 Messung der Lateralverschiebung.....	72
5.2.1 Optimierung der Suchfenster- und Referenzbildgröße.....	74
5.2.2 Variable Suchfensterposition bei gleichzeitiger Prozessbeobachtung.....	75
5.2.3 Erhöhung der Messauflösung durch adaptive Bildfrequenz.....	76
5.2.4 Messung der Verschiebung unter Berücksichtigung der Rotation.....	76
5.3 Messung der Phasengrenze fest – flüssig.....	79
5.3.1 Separation der Phasengrenze durch Analyse der örtlichen Frequenz.....	79
5.3.2 Separation der Phasengrenze durch Bilddifferenzverfahren.....	79
5.3.3 Konturanalyse.....	82
5.4 Messung der Fugenposition.....	84
5.4.1 Fugenerkennung durch Kantendetektion.....	84
5.4.2 Fugenerkennung mit Referenzbildvergleichsverfahren.....	85
5.4.3 Koaxiales Lichtschnittverfahren.....	86
5.5 Bildkontrastmessung.....	87
6 Anwendung der geometriebasierten Prozessbeobachtung.....	90
6.1 Prozessüberwachung beim Nahtiefschweißen.....	90
6.1.1 Detektion von Bindefehlern und Spaltabweichung beim Überlappschweißen..	90
6.1.2 Detektion von Bindefehlern beim Stumpfstoßschweißen.....	94
6.1.3 Detektion von Schweißgutüberlauf und Schmelzbadauswurf (Spritzer).....	95
6.1.4 Detektion von Verunreinigungen der Werkstückoberfläche.....	98
6.1.5 Durchschweißüberwachung beim Überlappschweißen.....	99
6.1.6 Charakterisierung der Schweißnaht.....	101
6.1.7 Überwachung der Vorschubgeschwindigkeit	102
6.2 Prozessüberwachung beim Punktschweißen.....	102
6.2.1 Puls- / Bildsynchronisierung.....	103
6.2.2 Detektion von Spalt	104
6.2.3 Abschmelzen des oberen Fügepartners.....	107
6.2.4 Detektion von Schmelzbadauswurf (Spritzer).....	108
6.2.5 Positionierung des Laserstrahls beim Punktschweißen.....	109
6.3 Vermessung der Bahngenaugigkeit des Handhabungssystems.....	111
6.3.1 Betrachtungen zur Messunsicherheit.....	112
6.3.2 Messergebnisse.....	117

6.4 Autonome Nahtfolgeregelung.....	119
6.4.1 Analyse des konventionellen Nahtfolgeprinzips.....	120
6.4.2 Prinzip der autonomen Nahtfolge.....	131
6.5 Beispielhafte Systemrealisierungen.....	135
6.5.1 Prozessüberwachung	135
6.5.2 Autonome Nahtfolge.....	140
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	144
8 Literatur.....	146
9 Abkürzungsverzeichnis.....	154
10 Anhang: Codebeispiele.....	156
10.1 Berechnung der SAD zwischen zwei Referenzbildern.....	156
10.2 Implementierung eines Abbruchkriteriums am Beispiel der SAD.....	156
10.3 Berechnung der Lateralverschiebung.....	157
10.4 Berechnung der Lateralverschiebung mit optimiertem Suchfenster.....	158