

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung

von Dr.-Ing. Karin Heller
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2017

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2017

ISBN 978-3-8316-4654-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	5
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	17
1.1 Motivation	17
1.2 Aufbau der Arbeit	20
2 Stand der Technik	21
2.1 Laserstrahlschweißprozess	21
2.2 Analytische Temperaturfeldbeschreibung	23
2.3 Thermographische Prozessbeobachtung	25
2.4 Wärmestrahlung und Strahlungsmodell	26
3 Schweißmodell basierend auf Wärmeleitung	30
3.1 Mathematische Problemstellung	30
3.2 Transformation	33
3.3 Skalen innerhalb des Modells	33
3.4 Bedeutung der Längenskala	34
3.5 Abschätzung des Einflusses von vernachlässigten Effekten	35
4 Temperaturfelder erzeugt von einer konzentrierten Wärmequelle	38
4.1 Analytische Lösung für eine konzentrierte Punktwärmequelle	38
4.2 Temperaturfelder bestimmter Grenzfälle	40
4.2.1 Definition	40
4.2.2 Analytische Beschreibung des Nahfeldradius	42
4.2.3 Analytische Beschreibung des Fernfeldradius	44
4.2.4 Skalierung mit Prozessparametern	46
4.2.5 Aus den Wärmetransportmechanismen resultierende Prozess- regime	47
4.3 Charakteristische Größen an der Oberfläche	49
4.3.1 Parametrisierung des Schmelzbades	49

4.3.2	Parametrisierung der Wärmeeinflusszone	50
4.4	Charakteristische Größen im vereinfachten Modell	51
4.4.1	Nachlaufänge und Breite des Schmelzbades	51
4.4.2	Abklinglänge und -breite hinter der Erstarrungszone	55
4.4.3	Experimenteller Abgleich des Skalierungsverhaltens	56
4.5	Erkennung von Anbindefehlern am Überlappstoß	62
4.5.1	Anbindefehler: „Falscher Freund“	62
4.5.2	Thermographische Detektion des Anbindefehlers	64
4.5.3	Fazit	68
5	Temperaturfelder erzeugt durch beliebige Wärmequellen	70
5.1	Analytische Lösung für beliebig verteilte Wärmequellen	70
5.1.1	Lösung durch Integration über durch Punktwärmequellen erzeugte Temperaturfelder	71
5.1.2	Lösung der homogenen Wärmeleitungsgleichung	71
5.1.3	Lösung der inhomogenen Wärmeleitungsgleichung	73
5.1.4	Räumlich begrenzte Wärmequellen	74
5.2	Leistung und Asymptotik einzelner Moden	74
5.3	Anwendung auf spezifische Wärmequellverteilungen	76
5.4	Bestimmung der Schmelzbadgeometrie aus dem Oberflächentemperaturfeld	78
5.4.1	Eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Temperaturfeld an der Oberfläche und im Inneren	78
5.4.2	Berechnung des Temperaturfeldes im Inneren aus diskreten Messungen der Temperatur an der Oberfläche	80
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Anhang	97
	Abbildungsverzeichnis	109
	Tabellenverzeichnis	110
	Literaturverzeichnis	111
	Danksagung	117

Kurzfassung der Arbeit

Der Einsatz von Thermographiesensorik während des Laserstrahlschweißprozesses hat sich für industrietaugliche Überwachungssysteme bewährt. Dabei wird die vom Prozess ausgehende thermische Strahlung in einem Thermographiebild visualisiert. Hauptbestandteil dieser Arbeit ist die analytische Beschreibung des stationären Temperaturfeldes im festen d. h. auch im wiedererstarteten Material, um das Potenzial einer Thermographiesensorik grundlegend zu untersuchen und zu erweitern. Dieses Potenzial liegt insbesondere in der Möglichkeiten, durch eine Auswertung der Oberflächeninformationen Rückschlüsse auf innen liegende Zustände zu erhalten. Dafür wird ein vereinfachtes auf Wärmeleitung beruhendes Schweißmodell mit einer definierten Wärmequelle eingeführt. Durch die Advektions-Diffusions-Differentialgleichung wird die Temperaturverteilung im Werkstück beschrieben. Phasenänderungen und die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter sowie Wärmeverluste werden vernachlässigt. Die Modellannahmen machen einen experimentellen Abgleich der mit dem Modell gewonnenen Erkenntnisse notwendig.

Zunächst wird die aus der Literatur bekannte Temperaturfeldlösung des Schweißmodells für eine Punktwärmequelle an der Oberfläche eines endlich dicken Blechs untersucht. Diese kann in zwei von Rosenthal [1] definierten Grenzfällen, gekennzeichnet durch den Abstand zur Wärmequelle, mit der Lösung für eine Punktwärmequelle in einem unendlich dicken Blech (Nahfeldbereich) bzw. mit der Lösung für eine Linienvärmequelle (Fernfeldbereich) approximiert werden. Für das Ende des Nah- und den Beginn des Fernfeldbereiches an der Oberfläche des Werkstücks werden explizite analytische Gleichungen angegeben. Das Ende des Nahfeldbereichs ist ein Maß dafür, wann sich die endliche Blechdicke durch die an der Unterseite stattfindende Wärmereflexion signifikant an der Oberseite des Blechs abzeichnet, was repräsentativ für den mittels Wärme stattfindenden Informationstransport aus der Tiefe an die Oberfläche steht.

Die sich an der Oberfläche ausbildende Temperaturverteilung wird durch geometrische Merkmale des Schmelzbades und des Abklingverhaltens in der angrenzenden

Wärmespur charakterisiert. Innerhalb der definierten Grenzbereiche des vereinfachten Schweißmodells werden diese Merkmale durch explizite analytische Ausdrücke beschrieben. Dabei ist auf eine weitere Unterteilung der Grenzbereiche zu achten: Durch die Bewegung der Wärmequelle entsteht neben der Diffusion ein advektiver Wärmetransport, der ab einer bestimmten Entfernung zur Wärmequelle den diffusiven Wärmetransport in Vorschubrichtung dominiert. Damit entstehen entweder im Nah- oder im Fernfeld zwei Bereiche, in denen jeweils entweder der diffusive oder der advektive Wärmetransport dominieren. Das aus der analytischen Beschreibung der Merkmale gewonnene Skalierungsverhalten mit der Vorschubgeschwindigkeit und der Leistung der Wärmequelle wird innerhalb eines typischen Prozessregimes durch experimentelle Untersuchungen mit dem Einsatz einer Thermographiekamera während des Laserstrahlschweißprozesses abgesichert.

Die Ergebnisse innerhalb des vereinfachten Schweißmodells mit einer konzentrierten Wärmequelle werden angewandt, um die robuste Erkennung eines Anbindefehlers beim Überlappstoß mittels Thermographie zu analysieren. Dabei wird ein Merkmal, eine charakteristische Länge des Abklingverhaltens (Abklinglänge) der Wärmespur, als zuverlässiger Indikator identifiziert, da dessen Größe im Falle des Anbindefehlers ansteigt. Wie stark und in welcher Entfernung zur Wärmequelle diese Veränderung beim Auftreten des Anbindefehlers deutlich wird, kann mit dem vereinfachten Schweißmodell quantifiziert werden.

Mit Hilfe des vereinfachten Schweißmodells wird zudem für eine beliebige räumlich ausgedehnte Wärmequellverteilung eine Lösung für das Temperaturfeld analytisch bestimmt. Dadurch können realitätsnähere Schmelzbadeometrien erzeugt werden. Es wird eine neue Darstellung eingeführt, bei welcher das Temperaturfeld mit Moden beschrieben wird. Für von einem Zylinder begrenzte Wärmequellverteilungen werden die Moden in Bezug auf den Leistungstransport ins Material und das asymptotische Verhalten in weiter Entfernung von der Wärmequelle analysiert.

Mit Hilfe dieser modalen Beschreibung wird gezeigt, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur (außerhalb des Zylinders) und dem vollständigen Temperaturfeld im Inneren des Werkstücks (außerhalb des Zylinders) besteht. Das Modell kann angewandt werden, um während des Laserstrahlschweißprozesses mittels (thermographischer) Temperaturmessungen an der Oberfläche Rückschlüsse auf die Form des Schmelzbades und insbesondere auf die Form des Schmelzbadquerschnittes ziehen zu können. Damit wird die Basis für eine Alternative zu

zerstörenden Querschliffen, die zur geometrischen Schweißnahtcharakterisierung dienen, entwickelt. Zur Demonstration der Anwendbarkeit werden exemplarisch analytische und experimentelle Untersuchungen vorgestellt, um die bei einer praktischen Umsetzung vorliegenden Herausforderungen aufzuzeigen.

Extended Abstract

Thermal observation of the laser welding process is established as a contact-free and non-destructive quality assurance technique. The radiation emitted from the workpiece mainly depends on the temperature distribution and is visualized in a radiation image. Within this work an analytical description of the stationary temperature field in the solid material is the basis for fundamental investigations of the potential of thermal observations. A simplified model for laser welding based on heat conduction with a heat source moving relative to the workpiece is introduced. An advection-diffusion differential equation describes the temperature distribution viewed from the frame of the moving heat source. Phase changes and heat losses are neglected and material properties are assumed to be constant. Because of these assumptions an experimental validation of the knowledge gained from the analytical investigations is necessary.

As the most simple case for concentrated heat input, the simplified model of a point heat source on the top surface of a plate with finite thickness is used to describe the temperature field during the welding process. Rosenthal [1] distinguished two limit region, which depend on the distance from the heat source. A point heat source on an infinitely thick plate generates the temperature field which represents the temperature distribution in the vicinity of the heat source (near-field region). However, for large distances (far-field region) the temperature distribution approaches the field generated by a line heat source. For the end of the near-field region and the beginning of the far-field region on the upper plate surface explicit analytical expressions are derived. The end of the near-field region is a measure for the distance to the heat source in which the limited plate thickness becomes appreciable on the top surface due to heat reflection on the bottom. This example illustrates how the heat transports information from the inside of the workpiece to the top surface.

The temperature field on the top surface is characterized by geometrical quantities of the melt pool and quantities describing the temperature decay in the heat affected zone. In the limit regions the values of these quantities are derived analytically. Here,

an additional division of the limit regions is necessary: Due to the movement of the heat source an advective heat transport mechanism arises beside the diffusive transport, and in particular distance to the heat source the advection dominates the diffusion. Hence, there are two additional regions, within the near- or the far-field region, where either the diffusive or the advective heat transport mechanism is dominant. The derived scaling behavior of the quantities with the feed rate and the heat source power is confirmed in a typical process regime by experiments with thermographic imaging during the laser welding process.

The analytical results are used to investigate the robustness of the detection of a loss of fusion of overlap welds by thermographic imaging. The temperature decay behind the melt pool is identified as a reliable indicator, because in case of a loss of fusion a significant increase of the temperature profile occurs. By the use of the simplified welding model with the concentrated heat source, it is quantified how strong and at which distance to the heat source this change becomes visible.

With the help of the simplified welding model a solution for the temperature field is also analytically found for an arbitrary heat source distribution with the aim to generate almost arbitrarily shaped isotherms, which enables the simulation of more realistic shapes of the melt pool. A new form for the solution is shown, for which the temperature field is decomposed into modes. For heat source distributions confined by a cylinder the modes are analyzed with respect to their power transport into the material and their asymptotic behavior far away from the heat source.

Finally, it is shown with the help of the modal description that the knowledge of the surface temperature distribution (outside the cylinder) is sufficient to uniquely conclude the whole three dimensional temperature field (outside the cylinder). Based on the measured temperature field on the top surface, e. g. by a thermographic sensor, the model can be used to obtain the temperature field inside the workpiece with a certain degree of accuracy. This allows to derive the geometry of the melt pool and the shape of the cross section of the seam. These investigations are the theoretical basis for an alternative to destructing methods to obtain cross sections for a geometrical characterization of the welding seam. Analytical and exemplary experimental investigations to demonstrate the practical application are shown. The challenges during the industrial implementation are identified, which can be investigated in further work.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontakterung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrisen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8