

Erik Zokoll

**Erweiterung des Einsatzgebiets
von MSG-Fügeprozessen
durch Prozessstabilisierung
mittels Laserstrahlung**



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

Band 5/2020

Shaker Verlag

**Erweiterung des Einsatzgebiets von MSG-Fügeprozessen durch
Prozessstabilisierung mittels Laserstrahlung**

**Expansion of the Application of GMA-Joining Processes through Process Stabilisation
by Laser Radiation**

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

vorgelegt von
Erik Zokoll

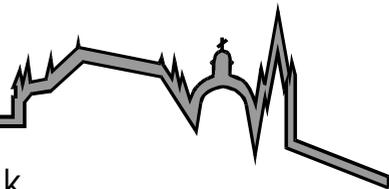
Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisinger
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Erik Zokoll

**Erweiterung des Einsatzgebiets
von MSG-Fügeprozessen
durch Prozessstabilisierung
mittels Laserstrahlung**



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

Band 5/2020

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, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7742-1

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 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen University mit finanzieller Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V. (AiF). Für diese Förderung bedanke ich mich.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen danke ich sehr herzlich für die Möglichkeit zur Promotion, die Betreuung der Arbeit, den Benötigten wissenschaftlichen Freiraum den er mir während der Arbeit eingeräumt hat und die Möglichkeit auch darüber hinaus in anderen Bereichen der Forschung und Lehre mitzuwirken. Ebenso gilt mein Dank dem zweiten Bericht Herr Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover für die kritische Durchsicht der Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Forschungskollegen Jan Leschke und Jörg Hermsdorf vom Laser Zentrum Hannover danke ich in diesem Zusammenhang für die gute Zusammenarbeit während des gemeinsamen Forschungsvorhabens und die von ihnen durchgeführten Versuche. Der Firma Laserline GmbH danke ich zudem für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche in ihrem Haus.

Unzählige ISF'ler aus allen Abteilungen halfen mir über viele Jahre hinweg entweder direkt durch sachliche Kritik, fachliche Diskussionen und die Möglichkeit über den *prozessspezifischen Tellerrand* hinauszuschauen oder indirekt durch Freundschaft, gemeinsame Unternehmungen und eine hervorragende kollegiale Atmosphäre. Stellvertretend hierfür danke ich: Lars Stein und Marion Purrio für die kritische Durchsicht meiner Dissertation. Alexander Schiebahn, Konrad Wilms und Rahul Sharma für ihre Betreuung, Rat und reichlich Geduld bei der Durchsicht meiner Arbeiten. Matthias Angerhausen für den Einstieg in die Fügetechnik. Gertrud, Leni, Katja und dem Bibliotheksteam bei allen Literaturanfragen und ebenso wie die Buchhaltung, Metallographie und IT auch persönlich. Xhafer und seinem Team von der Werkstatt, ohne welche viele Konstruktionen nicht realisiert werden könnten. Meinen Studenten (Matthias, Jens, Stefan, Gabriel, Lars und Markus) für die tatkräftige Unterstützung bei dieser und anderen Arbeiten. Malte, Isabel, Sascha, Sebastian, Jana, Johannes, Jens, Marion, Ellwyn sowie den üblichen Verdächtigen und Hiwi-Gruppen für die Institutsveranstaltungen und die anregenden wissenschaftlichen Gespräche.

Insbesondere jedoch gilt mein Dank meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Vertrauen in mich. Ohne euch hätte ich meinen akademischen Werdegang nicht verfolgen können. Zuletzt danke ich auch meinen Großeltern, welche zusammen mit meinen Eltern das Interesse für Technik früh in mir geweckt und gefördert haben.

Aachen, November 2020

Kurzfassung

Der MSG-Prozess ist ein hochproduktives Verfahren, welches durch seine Spaltüberbrückbarkeit und Prozessvarianten mit unterschiedlichen Leistungsbereichen zum Fügen von vielfältigen Werkstoffen und Blechdicken verwendet werden kann. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des MSG-Prozesses kann dieser mit anderen Prozessen oder Hilfsmitteln kombiniert werden. Bereits Laserstrahlung geringer Leistung und somit geringerer Anschaffungskosten kann einen Lichtbogenprozess beispielsweise in seinem Verhalten oder dem resultierenden Schweißergebnis beeinflussen. Bisher wurden jedoch nur wenige MSG-Prozessvarianten berücksichtigt, wodurch die Möglichkeiten und Grenzen dieser sogenannten Laserstabilisierung nicht ausgeschöpft sind.

In dieser Arbeit wird deshalb die Laserstabilisierung an unterschiedlichen MSG-Prozessen wie dem Kurz-, Impuls-, Sprühlichtbogen und dem elektronisch geregelten Kurzlichtbogen betrachtet. Ein Schwerpunkt ist die Identifikation der relevanten Wechselwirkungen zwischen Laserstrahl und MSG-Lichtbogen sowie das daraus resultierende Prozessverhalten und die Nahtformung. Hierfür wird das elektrische Signalverhalten ebenso wie der Lichtbogen und Tropfenübergang betrachtet, wobei die Anordnungsmöglichkeiten, Randbedingungen und Einstellungen sowohl des MSG-Prozesses als auch des Laserstrahlprozesses variiert werden.

Der laserstabilisierte MSG-Prozess, der mit vergleichsweise geringer Laserleistung und Intensität auskommt, zeigt sich robust in der Handhabung und führt insbesondere in Kombination mit dem Kurzlichtbogenprozess zu einer deutlichen Vergrößerung der möglichen Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten. Gleichzeitig ist das Konzept der Laserstabilisierung auch auf das MSG-Löten von Stahlfeinblechen und auf das Schweißen mit Metallpulverfülldrähten übertragbar. Je nach gewählten Einstellungen und Werkstoffen kann die zusätzliche Laserstrahlung jedoch auch destabilisierend auf den MSG-Prozess wirken.

Neben einer Stabilisierungswirkung, die teilweise auch durch andere Lichtbogenparameter oder Prozessvarianten erreicht werden kann, ist Laserstrahlung zum Führen der Schmelze, zur Beseitigung von Poren beim Fügen verzinkter Stahlfeinbleche und zur Veränderung der Nahtgeometrie auch zu großen Schweißgeschwindigkeiten hin geeignet.

Abstract

The Gas Metal Arc Welding process (GMAW) is a highly productive process that can be used for joining a wide range of materials and sheet thicknesses due to its gap-bridging capability using its various process variants with different power output ranges. To ensure the economic efficiency of the GMAW-process, it can also be combined with other processes or auxiliary measures. Even laser radiation of low power and thus lower acquisition costs can influence an arc process, for example in its behaviour or the resulting weld. So far, only a few GMAW-process variants have been studied, meaning that the possibilities and limits of laser stabilization are not completely known.

Therefore, in this thesis the laser stabilization at different GMAW-processes like the short arc, pulsed arc, spray arc and the electronically controlled short arc is investigated. One focus is the identification of the interactions between laser beam and gas metal arc as well as the resulting process behaviour and seam formation. For this purpose, the electrical signal behaviour as well as the arc and droplet transfer are analysed. Also, the different arrangement possibilities, conditions and settings of both the GMAW-process and the laser beam process are considered.

The laser-stabilized GMAW-process, which uses relatively low laser beam power and intensity, is robust in handling and, especially in combination with the short arc, leads to a significant increase in deposition rates and welding speeds on joint welds. At the same time, the concept of laser stabilization can also be transferred to GMA-Brazing of steel sheets and used with metal powder filler wire electrodes. However, depending on the selected settings and materials, the additional laser beam can also have a destabilizing effect on the GMAW-process.

In addition to a stabilizing effect, which can also be achieved in part by other arc parameters or process variants, the laser beam can also be used for guiding the molten pool, removing pores when joining galvanized steel sheets and changing the seam geometry, even at high welding speeds.

Auszüge dieser Arbeit sind bereits enthalten in:

Reisgen, U.; Kaierle, S.; Sharma, R.; Hermsdorf, J.; Zokoll, E.; Leschke, J:
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit beim MSG-
Schweißen durch Laserstabilisierung
AiF-Abschlussbericht 18.748 N, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH
Aachen, Laser Zentrum Hannover e.V., Aachen

Reisgen, U.; Kaierle, S.; Sharma, R.; Hermsdorf, J.; Zokoll, E.; Leschke, J:
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozesssicherheit beim MSG-Schweißen durch
Laserstrahlstabilisierung
Schweissen und Schneiden, 70 (9), 2018, S. 628 – 633

Reisgen, U.; Kaierle, S.; Sharma, R.; Hermsdorf, J.; Zokoll, E.; Leschke, J:
Investigations to increase process reliability in GMA welding by laser beam stabilisation
Welding and Cutting, 18(2), 2019, S. 125-129

Leschke, J.; Pacardo, K.; Zokoll, E.; Hermsdorf, J.; Sharma, R.; Kaierle, S.; Reisgen, U.:
Manipulating the melt propagation of short arc gas metal arc welding with diode lasers < 1 kW
for improvement in flexibility and process robustness
Journal of Laser Applications, 31, 2019, S. 022417-1 - 022417-7

Kaieler, S.; Hermsdorf, J.; Leschke, J.; Zokoll, E.:
Improving weld bead homogeneity in short arc GMAW processes applying low power diode
lasers
10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2018), 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Laserstrahlschweißen	3
2.1.1	Quellen und Strahlführung	4
2.1.2	Arten der Energieeinkopplung	5
2.2	Der Lichtbogen	6
2.3	WIG-Prozess	8
2.4	MSG-Prozess	8
2.4.1	Prinzip und Lichtbogenarten.....	8
2.4.2	Konstantspannungs-MSG-Prozesse:	9
2.4.3	Kennlinienverhalten, Innerer Selbstaussgleich, Synergiesteuerung	11
2.4.4	Modifizierte MSG-Prozesse.....	12
2.4.5	MSG-Löten.....	14
2.5	Kombinierte Laser-Lichtbogen-Prozesse	14
2.5.1	Laser-WIG-Prozesskombinationen.....	15
2.5.2	Laser-MSG-Hybridschweißen	16
2.5.3	Laserstabilisiertes MSG-Schweißen.....	17
2.5.4	Prozesstechnische Untersuchungen zu Laser-Lichtbogen-Wechselwirkungen .	18
2.6	Bewertung des Stands der Technik	24
3	Fragestellung und Ziel	25
4	Herangehensweise	26
4.1	Definition von Stabilität und Laserstabilisierung.....	28
5	Versuchsaufbauten und Versuchswerkstoffe	29
5.1	Lasersysteme	29
5.1.1	Trumpf TruDisk 16002 Scheibenlaser	29

5.1.2	Diodenlaser	31
5.1.3	Diodenlaser mit Laserline OTS-Optiksystemen.....	33
5.2	MSG-Technik.....	34
5.2.1	Cloos GLC 403 quinto	34
5.2.2	Fronius CMT Advanced 4000 R	34
5.2.3	Weitere Anlagentechnik	34
5.2.4	Merkle HighPulse 550 DW	36
5.3	Probeneinspannung, Probengeometrie und Bezugssystem	36
5.4	Versuchswerkstoffe.....	38
5.4.1	Härten von 22MnB5+AS.....	41
5.4.2	Schweißzusätze und Lot	41
6	Grundlagenuntersuchungen zur Laserstabilisierung von MSG-Schweißprozessen	43
6.1	Referenzkurzlichtbogen, ermittelte Stabilitätsgrenze und Instabilität	43
6.2	Fokusgröße und Fokuslage sowie Reihenfolge und Ausrichtung anhand von Blindschweißungen.....	44
6.2.1	Lichtbogenverhalten in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	45
6.2.2	Variation der Fokussierung und Ausrichtung des Laserstrahls	45
6.2.3	Vor- oder nachlaufende Anordnung des Laserstrahls und zeitliche Abfolge	50
6.2.4	Vergleichsversuche mit Diodenlasern nach [ZOK18]	52
6.2.5	Zwischenfazit zu Anordnung und Fokuslage	54
6.3	Sprühlichtbogen, Impulslichtbogen, Übergangslichtbogen und elektronisch geregelter Kurzlichtbogen	55
6.3.1	ColdMIG Vergleichsversuche nach [ZOK18]:.....	59
6.3.2	Zwischenfazit zu anderen Lichtbogenarten	60
6.4	Wellenlängenabhängigkeit.....	60
6.4.1	Versuche mit 940 nm und 1020 nm Diodenlasern mit OTS-Optiksystemen.....	60
6.4.2	Vergleichsversuche mit 811 nm und 1025 nm Diodenlasern nach [ZOK18]	62
6.4.3	Zwischenfazit zur Wellenlängenabhängigkeit.....	63

6.5	Lichtbogen und Nahtauslenkung durch Laserstrahlung	63
6.5.1	Auslenkung durch Laserstrahlung am Kurzlichtbogen	63
6.5.2	Auslenkung durch Laserstrahlung am Impulslichtbogen	68
6.5.3	Auslenkung durch Laserstrahlung am Sprühlichtbogen	70
6.5.4	Dynamische Auslenkung des Laserstrahls durch Verwendung eines Laserscanners	70
6.5.5	Zwischenfazit zur Lichtbogen- und Nahtauslenkung durch Laserstrahlung.....	76
6.6	Untersuchung der Lichtbogen-Laser-Wechselwirkung bei Konstantspannungscharakteristik ohne Kennlinienneigung bei leistungsreduzierten MSG-Parametern	77
6.7	Zwischenfazit zu Stabilisierung und Unterstützung des MSG-Prozesses durch Laserstrahlung	81
7	Laserstabilisiertes MSG-Schweißen von technisch beschichteten Stahlfeinblechen.	83
7.1	Stahlfeinbleche mit blanker Oberfläche (DC01).....	83
7.2	Stahlfeinbleche mit Feuerverzinkung (+Z)	87
7.2.1	mittelfeste Stahlfeinbleche mit Feuerverzinkung (HX220YD+Z100).....	88
7.2.2	hochfeste Stahlfeinbleche mit Feuerverzinkung (HCT980X+Z140).....	92
7.3	Stahlfeinbleche mit Aluminium-Silizium-Beschichtung (+AS).....	93
7.3.1	Schweißen unausgehärteter Bleche (22MnB5+AS150)	94
7.3.2	Schweißen warmausgehärteter Bleche (22MnB5+AS)	96
7.4	Mischverbindungen feuerverzinkter Bleche mit warmausgehärteten Blechen	99
8	Weitere Anwendungsmöglichkeiten	103
8.1	MSG-Löten von Stahlfeinblechen	103
8.1.1	MSG-Löten unbeschichteter Stahlfeinbleche (DC01).....	103
8.1.2	MSG-Löten verzinkter Stahlfeinbleche (HX220YD+Z)	106
8.2	MSG-Kurzlichtbogenschweißen mit großen Abschmelzleistungen durch 1,6 mm Drahtdurchmesser (Fülldraht und Massivdraht).....	109
8.3	MSG-Kurzlichtbogenschweißen des Aluminiumwerkstoffs EN AW5083.....	111

9 Kritische Bewertung der Ergebnisse	113
10 Zusammenfassung und Ausblick	115
11 Literatur	117

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Grundidee der Laserstabilisierung.....	1
Bild 2:	Laserstrahlkaustik nach [DIN05].....	4
Bild 3:	Energietransport beim Strahlschweißen. [REI16].....	5
Bild 4:	Wellenlängenabhängige Absorption bei unterschiedlichen Werkstoffen. [REI16].....	6
Bild 5:	Spektrale Intensitätsverteilung der optischen Emission eines Sprühlichtbogens. [HRF14].....	8
Bild 6:	Spannungs-Drahtvorschub-Kombinationen bei Konstantspannungs-MSG-Prozessen. [REI16].....	9
Bild 7:	Strom- und Spannungsverlauf des Kurzlichtbogens. [REI16].....	10
Bild 8:	Innerer Selbstausgleich von MSG-Prozessen. [REI16].....	12
Bild 9:	Beurteilung des Benetzungsverhaltens von Metalloberflächen beim Löten. [REI16].....	14
Bild 10:	Laser-WIG-Prozesskombinationen. Stabilisierung eines WIG-Prozesses durch Laserstrahlung bei $v_s = 4\text{m/min}$ [RIP08] (oben) und Möglichkeit der Lichtbogenstabilisierung eines angestellten WIG-Brenners ohne (unten, links) sowie mit Laserstrahlung (unten, rechts) [HER13].....	16
Bild 11:	Einzelprozesse beim Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen nach [ACH18].....	17
Bild 12:	Versuchsaufbau mit Emissionsspektrograph nach [CHE12].....	19
Bild 13:	Spannungsverlauf (schwarz) und Stromverlauf (rot) ohne Laser (WIG) sowie mit Laser (WIG + Laser) nach [CHE12].....	20
Bild 14:	Schematische Darstellung der Herangehensweise und zugehöriger Kapitel	27
Bild 15:	Fokuslage und Intensitätsverteilung im Fokus mithilfe Primes-Messsystem	31
Bild 16:	Versuchsaufbau für Vergleichsversuche mit OTS-Optiksystem.....	33
Bild 17:	Versuchsaufbau der Grundkonfiguration, schematisch (links), gesamter Versuchsaufbau (rechts).....	37

Bild 18:	Definition geometrischer Beziehungen beim Schweißen von Blechen im Überlappstoß.....	38
Bild 19:	Einsatz von hochfesten Stählen in der Automobilindustrie nach [THY16a, THY18a], Mangan-Bor-Stähle (grün) sowie Dualphasenstahl (rot) markiert.....	39
Bild 20:	Härtevorgang von Mangan-Bor-Blechen einschließlich resultierender Oberflächen und gemessene Härtewerte (ohne Beschichtung)	41
Bild 21:	Mögliche Anordnung der Fokusslage, schematisch dargestellt.....	44
Bild 22:	Auslenkung des Kurzlichtbogens durch vorlaufende Laserstrahlung in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit $v_s = 1,6$ m/min Schweißgeschwindigkeit	45
Bild 23:	Fokussierung auf die Werkstückoberfläche: Strom- und Spannungsverlauf mit und ohne Laserstrahlung bei Anordnung zwischen Lichtbogen und Schmelzbad (oben) sowie Nahtaussehen bei unterschiedlichen Laserleistungen und Anordnungen (unten).....	47
Bild 24:	Fokussierung 80 mm über der Werkstückoberfläche. Querschliffe bei Ausrichtung des Laserstrahls auf den Lichtbogenwirkbereich (oben) sowie Nahtaussehen bei unterschiedlichen Laserleistungen und Anordnungen (unten).....	48
Bild 25:	Fokussierung 80 mm über der Werkstückoberfläche. Strom- und Spannungsverlauf bei Anordnung zwischen Lichtbogen und Schmelzbad...	49
Bild 26:	MSG-Prozess mit nachlaufendem Laserstrahl, Strom und Spannungsverlauf (oben) sowie Nahtaufsicht (unten), Spotgröße 2 mm	51
Bild 27:	MSG-Prozess mit vorlaufendem Laserstrahl (Spotdurchmesser 4 mm) zunächst laserstabilisiert, anschließend wird im laufenden Betrieb der Laserstrahl ausgeschaltet.....	52
Bild 28:	Gegenüberstellung unterschiedlicher Schweißabläufe zur Veranschaulichung des Effekts der Laserstabilisierung an einem deutlich instabilen MSG-Prozess, nach [ZOK18]	53

Bild 29:	Einfluss der Fokuslage und des resultierenden Spotdurchmessers auf das Stabilisierungsvermögen des Laserstrahls, exemplarische Darstellung, LDM2000-40, 2"-Optik, [ZOK18].....	54
Bild 30:	Blindschweißungen mit einem konventionellen, spannungsgeführten Sprühlichtbogenprozess. Querschlitze (oben) sowie Strom- und Spannungsverlauf des Sprühlichtbogens ohne und mit 1000 W Laserstrahlung (unten).....	56
Bild 31:	Stromgeführte MSG-Lichtbogenvarianten zur Diagnostik des elektrischen Signalverhaltens der Lichtbogen-Laser-Wechselwirkung (oben) sowie Strom- und Spannungsverlauf des stromgeführten Sprühlichtbogens ohne und mit Laserstrahlung (unten) sowie Querschlitze (rot markiert).....	57
Bild 32:	Eliminierung von Humping beim CMT-Prozess durch zusätzliche Laserstrahlung an Schweißraupen an DC01 einschließlich Betrachtung der Streckenenergien	59
Bild 33:	Exemplarische Nahtaufsichten der Schweißversuche mit Spot im Fokus und variierenden Wellenlängen. Bewertungskriterien siehe Tabelle 7	62
Bild 34:	Blindschweißung mit und ohne Laserstabilisierung mit 1 mm seitlicher Auslenkung des Laserstrahls beim Kurzlichtbogen. Oben: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Drahtelektrode durch Strichlinie hervorgehoben Lasereinstrahlung durch roten Pfeil markiert. Unten: Nahtbild und Vergleich der Nahtgeometrien im Querschleiff.	65
Bild 35:	Grenzbereich der Nahtauslenkung. Links: Grenzbereich des gemeinsamen Schmelzbads. Rechts: MSG-Prozess und Laserstrahl weitestgehend unabhängig. $v_s = 1,6$ m/min.....	66
Bild 36:	Verbindungsschweißung einer Kehlnaht mit erzwungenem Bindefehler durch einen seitlichen Offset des MSG-Brenners sowie Korrektur durch seitlich versetzten Laserstrahl. Werkstoff S235JRC+C, 6 mm Dicke	67
Bild 37:	Vergleich des Schmelzverhaltens bei Erzeugung eines Versatzes von Oberblechkante (rechts) und Schweißdraht von 3 mm, a) ohne, b) mit ausgelenktem Laserstrahl (LDM2000-40). $v_s = 0,6$ m/min, $U = 16,5$ V, $v_D = 2,9$ m/min, $P_L = 340$ W. [ZOK18]	68

Bild 38:	MSG-Impulslichtbogen mit und ohne Laserstrahlung mit seitlichem Versatz des Lasers. Oben: Nahtbild und Vergleich der Nahtgeometrien im Querschliff. Unten: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während der Tropfenablösung. Lasereinstrahlung durch roten Pfeil markiert. 69
Bild 39:	Dynamische Laserstrahlpendelung mithilfe eines Laserscanners, schematische Darstellung..... 70
Bild 40:	Orthogonale Pendelung des Laserstrahls. oben: Nahtaussehen mit statischem Laserstrahl (Referenz) und mit verschiedenen Pendelungen. unten: Strom- und Spannungsmessschriebe aus rot markierter Schweißung..... 72
Bild 41:	Prozessstörungen bei ähnlicher orthogonaler Laserstrahlpendel- wie MSG-Kurzschlussfrequenz in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die zu groben Spritzern und zum Abtrennen von Teilen der Drahtelektrode unter Bildung von Doppellichtbögen führen. Laserleistung 600 W (oben, links) bzw. 1.000 W (oben, rechts). Blindschweißungen auf S235JRC+C, 4 mm Dicke..... 73
Bild 42:	Laserstabilisierung mit kollinearer Pendelung des Laserstrahls mit größerer erreichbarer Schweißgeschwindigkeit bei Verbindungsschweißung an DC01 als bei orthogonaler Laserpendelung. 75
Bild 43:	Zweidimensionale dynamische Laserstrahlauslenkungen beim MSG-Schweißen mit vorlaufend (oben) beziehungsweise nachlaufend (unten) angeordnetem Laserstrahl. Position des Laserstrahls durch Kreis markiert. [SUS18] 76
Bild 44:	Konstantspannungs-Kurzlichtbogen mit und ohne zugeschalteten Laserstrahl einschließlich Schweißparametern und errechnete gemittelte elektrische Größen bei Betrieb an Stabilitätsgrenze. 78
Bild 45:	Konstantspannungs-Kurzlichtbogen mit und ohne zugeschaltetem Laserstrahl. Oben: Schweißparametern und errechnete gemittelte elektrische Größen. Unten: Detailausschnitt aus Bereichen mit und ohne Laserstrahlung. 50 A-Linie zur besseren Anschaulichkeit hervorgehoben. 79
Bild 46:	Konstantspannungs-Kurzlichtbogen geringer Leistung mit und ohne zugeschalteten Laserstrahl einschließlich Schweißparametern und errechneten gemittelten elektrischen Größen. 50 A Linie zur besseren Anschaulichkeit hervorgehoben..... 80

Bild 47:	Ermittlung der erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten und Laserleistung bei festen MSG-Parametern an DC01, 1 mm zur Übertragung auf Verbindungsschweißungen 84
Bild 48:	Strom- und Spannungsverlauf bei Verbindungsschweißung an DC01, 1 mm im Überlappstoß mit und ohne Laserstabilisierung..... 85
Bild 49:	Überlappstoß an DC01, 1 mm mit größtmöglicher stabil erreichbarer Schweißgeschwindigkeit mit dem MSG-Kurzlichtbogen..... 86
Bild 50:	CMT-Prozess an DC01, 1 mm mit und ohne zusätzlichen Laserstrahl. Reduzierung der Nahtüberhöhung (oben) durch Laserstrahlung sowie Korrektur einer künstlich erzeugten Fehlpositionierung der Drahtelektrode . 87
Bild 51:	Eliminierung von Prozessinstabilitäten und Nahtfehlern bei verzinkten Stahlfeinblechen (HX220YD+Z100, Blechdicke: 1 mm) mit 1,6 m/min Schweißgeschwindigkeit. Poren rot markiert. Unten: Detailaufnahmen des Strom- und Spannungsverlaufs ohne sowie mit Laserstrahlung..... 88
Bild 52:	Blindschweißungen zur Ermittlung der notwendigen Laserleistung zur Prozessstabilisierung und Eliminierung von Poren in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit einschließlich Spannungsverlauf (oben) sowie daraus entstandene Verbindungsschweißung (unten) 89
Bild 53:	Eliminierung von Poren und Stabilisierung bei feuerverzinkten Stahlfeinblechen durch kollineare Laserstrahlpendelung 90
Bild 54:	Eliminierung von Poren beim CMT-Prozess an verzinktem Stahl einschließlich Detailaufnahmen des Spannungsverlaufs ohne und mit Laserstrahlung..... 92
Bild 55:	Eliminierung von Poren ,rot markiert, und optimierte Parameter bei HCT980+Z140, 1,5 mm mit 1,6 m/min Schweißgeschwindigkeit (oben). Mit zunehmender Laserleistung (unten) können auftretende Poren weiter reduziert werden..... 93
Bild 56:	Ermittlung der maximalen Drahtvorschub- und Schweißgeschwindigkeit, Nahtaufsicht und Querschleife. Oben und mittig: Ausgangsparameter, Flankenbindefehler rot markiert. Unten: Kombination aus geringerem Drahtvorschub und größerer Laserleistung zur Optimierung der Nahtgeometrie..... 95

Bild 57:	Verhalten der Laserstabilisierung an ausgehärteten Mangan-Bor-Stählen an Blindnähten mit und ohne Laserstabilisierung einschließlich Strom- und Spannungssignalverlauf. [ZOK18].....	96
Bild 58:	Reduzierung von Einbrandkerben an ausgehärtetem 22MnB5+AS. Ermittlung der optimalen Laserstrahlanordnung.	97
Bild 59:	Reduzierung von Einbrandkerben an ausgehärtetem 22MnB5+AS. Variation von Draht- und Laseroffset sowie Schweißgeschwindigkeit.	98
Bild 60:	Härteverlauf nach Schweißvorgang mit Laserstabilisierung	99
Bild 61:	Ermittlung der optimalen Laserstrahlanordnung bei Mischverbindungen. Oben: Parameter und Nahtaufsichten, Schweißfehler rot markiert. Unten: Querschliffe aus den günstigsten Anordnungen	100
Bild 62:	Rasterelektronische Untersuchung der Fügezone bei Mischverbindungen zwischen 22MnB5 und HCT980X Stahlfeinblechen	102
Bild 63:	MSG-Löten ohne und mit Laserstabilisierung an unbeschichteten Stahlfeinblechen (DC01) einschließlich Strom- und Spannungsverlauf.....	104
Bild 64:	MSG-Löten mit dem CMT-Prozess mit und ohne Laserstrahlung an unbeschichteten Stahlfeinblechen (DC01). Drahtelektrode auf Fügekannte Unterblech (oben) sowie künstlich erzeugter Fehler durch Drahtelektrode auf Oberblech (unten) ausgerichtet.	105
Bild 65:	MSG-Löten an verzinktem Stahlfeinblech (HX220YD+Z140) ohne und mit Laserstrahlung.....	107
Bild 66:	Rasterelektronische Aufnahmen MSG-gelöteter verzinkter Stahlfeinbleche einschließlich Messung der Zusammensetzung. Kupfergehalt (rot) sowie Eisengehalt (grün) markiert.	108
Bild 67:	MSG-Löten verzinkter Stahlfeinbleche mithilfe des CMT-Prozesses. Reduzierung von Poren durch Laserstrahlung ohne (oben) sowie mit zusätzlich reduzierter Lötgeschwindigkeit (unten). Wärmeeinflusszone rot markiert...	109
Bild 68:	Blindschweißungen von MSG-Kurzlichtbogenprozessen mit 1,6 mm Massivdrahtelektrode und Laserstrahlung	110
Bild 69:	Querschliffe von Blindschweißungen laserstabilisierter MSG-Kurzlichtbogenprozesse mit 1,6 mm Massivdrahtelektrode.....	111

Bild 70: Blindnähte am Aluminiumwerkstoff 5083. 5 mm (oben) sowie 1 mm (unten)
Dicke..... 112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erstionisationsenergie relevanter Elemente [UNI06]	7
Tabelle 2:	Mithilfe von Strahlkaustikmessungen ermittelte Spotdurchmesser für die Laserstrahlkonfigurationen am TruDisk 16002.	30
Tabelle 3:	Optische Systeme und Spotdurchmesser im Fokus der Laserstrahlquellen in [ZOK18]	32
Tabelle 4:	Mechanische Eigenschaften der Grundwerkstoffe	40
Tabelle 5:	Verwendete Schweißzusätze und Lot nach Grundwerkstoff einschließlich verwendetem Kapitel	42
Tabelle 6:	Untersuchte Ausrichtungen und Anordnungen mit der jeweiligen Laserleistung. Schutzgas M21	50
Tabelle 7:	Versuchsmatrix der Vergleichsversuche bei der Firma Laserline einschließlich Nahtergebnis.	61
Tabelle 8:	Versuchsplan zur Untersuchung des seitlichen Versatzes am Kurzlichtbogen und schematische Anordnung frontal zur Schweißrichtung bei unterschiedlichen Laserleistungen.	64
Tabelle 9:	Prozessgrenzen der Laserstabilisierung bei Mischverbindungen zwischen ausgehärteten Mangan-Bor- und verzinkten Stahlfeinblechen	101

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

A5	Bruchdehnung	[%]
A _{C3}	Austenitisierungstemperatur	[°C]
B	Schweißbadbreite	[mm]
c	spezifische Wärmeleitfähigkeit	[-]
CET	Kohlenstoffäquivalent	[-]
d	Spotdurchmesser	[mm]
d _F	Fokusbereich	[mm]
DIN	Deutsches Institut für Normung	
EN	Europäische Norm	
E	Streckenenergie (elektrisch)	[J/cm]
E _{MSG}	Streckenenergie (elektrisch)	[J/cm]
E _{ML}	Summe aus Laser und MSG-Streckenenergie	[J/cm]
E _{M1}	MSG-Streckenenergie bei ausgeschaltetem Laserstrahl	[J/cm]
E _{M2}	MSG-Streckenenergie bei eingeschaltetem Laserstrahl	[J/cm]
f	Brennweite	[mm]
I	Strom	[A]
ISO	Internationale Organisation für Normung	
λ	Wellenlänge	[nm]
MSG	Metallschutzgas	
MIG	Metallinertgas	
P	Leistung	[W]
P _L	Laserleistung	[W]
LATIG	Laserunterstützter Wolfram inertgasprozess	
L _O	Laseroffset	[mm]
L _P	Laserposition	[mm]
D _O	Drahtoffset	[mm]
R	Widerstand (elektrisch)	[V/A]
s	seitliche Auslenkung	[mm]
SEP	Stahl Eisen Prüfblatt	
t	Zeit	[s]
T	Zeitintervall	[s]
U	Spannung	[V]
v _s	Schweißgeschwindigkeit, Lötgeschwindigkeit	[m/min]
v _D	Drahtvorschubgeschwindigkeit	[m/min]

WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolframinertgas
TIG	Wolframinertgas