



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge



LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Volker Rominger

**Untersuchungen der Prozessvorgänge
bei Einschweißungen in Baustahl mit
Lasern hoher Brillanz**

Herbert Utz Verlag



Volker Rominger

**Untersuchungen der Prozessvorgänge bei
Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher
Brillanz**

Herbert Utz Verlag · München 2017

Laser in der Materialbearbeitung
Band 89

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7391-9 Version: 1 vom 27.07.2018
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4692-0
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

V. Rominger
Untersuchungen der Prozessvorgänge
bei Einschweißungen in Baustahl mit
Lasern hoher Brillanz

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz

von Dr.-Ing. Volker Rominger
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. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

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 978-3-8316-4692-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Formelzeichen und Abkürzungen	5
Kurzfassung der Arbeit	8
Extended Abstract	12
1 Einleitung	15
2 Experimenteller Aufbau	21
2.1 Strahlquellen und Absorptionsverhalten	21
2.2 Schutz- und Prozessbegasung	24
2.3 Kamerasysteme zur Prozessdiagnostik	26
3 Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Schweißungen mit dem FKL	29
3.1 Thermographische Beobachtungen	34
3.1.1 Definition geometrischer Prozesskenngrößen	36
3.1.2 Einfluss der Fokusslage	42
3.1.3 Einfluss der Leistung	50
3.2 Kapillargeometrie und Energieeinkopplung	58
3.2.1 Kapillaröffnung	59
3.2.2 Wechselwirkung der Laserstrahlung und der Kapillaroberfläche	67
3.3 Metaldampfeinfluss in Abhängigkeit der Begasung	75
3.3.1 Visualisierung der Wärmestrahlung	77
3.3.2 Nahtkenngrößen und Nahtqualität	83
3.4 Fluiddynamische Effekte	91
3.4.1 Strömungsgeschwindigkeit um die Dampfkapillare	91
3.4.2 Spritzerablösungen und Spritzereigenschaften	96
3.4.2.1 Visualisierung von Spritzerablösungen	97

3.4.2.2	Quantifizierung von Spritzereigenschaften	100
3.5	Zusammenführung der Ergebnisse in detaillierte Modellvorstellungen	118
4	Vergleich der Prozessvorgänge bei Schweißungen mit FKL und CO₂-Lasern	129
4.1	Nahtqualität und Nahtkenngrößen	131
4.2	Prozessdiagnostik mit der HSK	141
4.2.1	Untersuchungen der Kapillarausbildung	142
4.2.2	Untersuchungen von Spritzerablösungen und Prozessemissionen	144
4.3	Zusammenfassung und Diskussion	150
5	Zusammenfassung und Ausblick	153
	Literatur- und Quellenverzeichnis	163
	Danksagung	173

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

A	-	Absorptionsgrad eines Werkstoffs
A_0	-	Absorptionsgrad eines Werkstoffs bei Strahleinfall unter $\varphi_{in} = 0^\circ$
A_{Br}	-	Absorptionsgrad eines Werkstoffs bei Strahleinfall unter dem Brewster-Winkel φ_{Br}
A_{Sp}	mm ²	Spritzeroberfläche
AKL	mm	Abklinglänge
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
d_f	μm	Fokusedurchmesser
d_p	nm	Partikeldurchmesser
d_{Sp}	nm	Spritzerdurchmesser
d_{WO}	mm	Strahldurchmesser an der Werkstückoberseite
$ED_{Sp,kin}$	kJ/mm ³	Kinetische Energiedichte eines Spritzers
$ED_{Sp,\sigma}$	kJ/mm ³	Oberflächenenergiedichte eines Spritzers
EST	mm	Einschweißtiefe
FL	mm	Fokuslage bezüglich der Werkstückoberseite
h_p	J·s	Planck'sches Wirkungsquantum
I_0	W/cm ²	Intensität der Laserstrahlung
I_A	W/cm ²	Absorbierte Intensität der Laserstrahlung
k	-	Extinktionskoeffizient
k_B	J/K	Boltzmann-Konstante
KB	mm	Kapillarbreite
KL	mm	Kapillarlänge
KM	mm	Kapillarmitte
l	mm	Länge der Spritzerhauptachse
$L_{\lambda,S}$	W/(cm ² ·μm·sr)	Spektrale Strahlungsdichte eines Planck'schen Strahlers
n	-	Brechungsindex
NB	mm	Nahtbreite an der Werkstückoberseite
P	W	Laserleistung
R^2	-	Regressionskoeffizient
SBB	mm	Schmelzebadbreite

SBB_{max}	mm	Maximale Schmelzebadbreite
SBL	mm	Schmelzebadlänge
SPP	mm · mrad	Strahlparameterprodukt
SQ	mm	Strahlquerschnitt
T	K	Temperatur
T_S	K	Schmelztemperatur
T_V	K	Verdampfungstemperatur
T_0	K	Umgebungstemperatur
u_D	m/s	Metалldampfgeschwindigkeit
u_S	m/min	Schmelzgeschwindigkeit
u_{Sp}	m/min	Spritzergeschwindigkeit
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit des Lasers
v_L	-	Vorschubrichtung des Lasers
V	mm ³	Spritzervolumen
WSB	mm	Wärmespurbreite
z_K	mm	Kapillartiefe
z_R	mm	Rayleighlänge
α_{Ext}	m ⁻¹	Extinktionskoeffizient der Laserstrahlung
α_B	m ⁻¹	Absorptionskoeffizient aufgrund inverser Bremsstrahlung
β_K	°	Beobachtungswinkel bezüglich der Werkstückoberseite
γ	°	Neigungswinkel der Dampfkapillare
ε	-	Emissionsgrad
ε_{MDF}	°	Abströmwinkel der Metалldampffackel bezüglich der Werkstückoberseite
ε_{Sp}	°	Ablöswinkel eines Spritzers bezüglich der Werkstückoberseite
κ	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge
λ_{Det}	nm	Von einem Kamerachip detektierte Wellenlänge
$\lambda_{L,max}$	nm	Wellenlänge des Maximums einer emittierten spektralen Strahldichte L
ρ	g/cm ³	Massendichte
σ	N/m	Oberflächenspannung
φ_{In}	°	Einfallswinkel der Laserstrahlung
φ_{Br}	°	Brewster-Winkel
Ω_0	sr	Einheitsraumwinkel $\Omega_0 = 1$ sr

Abkürzungen

Ar	Argon
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor; dt. komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
fps	Frames per second; dt. Bilder pro Sekunde
EKL	Festkörperlaser im Wellenlängenbereich zwischen $\lambda \approx 900 - 1070 \text{ nm}$: Dioden-, Scheiben- und Faserlaser
FWHM	Full width at half maximum; dt. volle Halbwertsbreite
Gl.	Gleichung
He	Helium
HSK	Highspeed-Kamera, dt. Hochgeschwindigkeitskamera
InGaAs	Indium-Gallium-Arsenid
NIR	Nahinfrarotes Spektrum
PS	Profilschnitt durch die räumliche Verteilung der aus der Kapillaröffnung emittierten Strahlungsintensität
R1	Regime mit hoher Nahtqualität
R2	Regime mit starken Spritzerablösungen nach hinten
R3	Regime mit stark verlängerter Kapillaröffnung
Si	Silizium
ÜB1	Übergangsbereich zwischen den Regimen R1 und R2
ÜB2	Übergangsbereich zwischen den Regimen R2 und R3
VIS	Visuelles Spektrum
WELD- One	BMBF Projekt: Hochproduktive Schweißprozesse mit brillanten Laser- strahlquellen durch quantifizierende Prozessdiagnostik und -regelung
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium

Kurzfassung der Arbeit

Die Vorstellungen von den Abläufen im Schweißprozess konnten in den letzten Jahren wesentlich erweitert und einzelne physikalische Teilaspekte gut verstanden werden. Stationäre Vorgänge im Schmelzebad können durch starke Spritzerbildung zu einer Einengung des Prozessfensters führen. In gängigen Modellvorstellungen wird davon ausgegangen, dass die zur Spritzerablösung notwendige Energie maßgeblich durch Verdampfung des Werkstoffs und die Wechselwirkung von Metaldampf mit der Kapillarwand bereitgestellt wird [1] [2][3][4][5].

Dennoch sind die zugrundeliegenden, gewöhnlich als Prozessinstabilität bezeichneten Mechanismen bis heute nicht vollständig verstanden [1] und es sind noch Fragen offengeblieben, insbesondere über die genaue geometrische Ausbildung von Dampfkapillare, Schmelzebad, Metaldampfströmung und Spritzer in Abhängigkeit der Prozesseingangsgrößen. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit von Erkenntnissen häufig schwierig, da bereits kleine Variationen der Versuchsparameter, insbesondere in Grenzbereichen, den Schweißprozess massiv beeinflussen können.

Um die gängigen Modellvorstellungen zu validieren und offene Fragen möglichst umfassend zu beantworten, sollen in dieser Arbeit alle wesentlichen physikalischen Mechanismen anhand systematischer Parametervariationen bei Einschweißungen in Baustahl 1.0038 mit einem Festkörperlaser (FKL) und einem CO₂-Laser erörtert werden.

Wesentliche Ziele der Arbeit sind es, die Auswirkungen systematischer Parametervariationen auf den Schweißprozess anschaulich zu visualisieren und zu beschreiben, die resultierenden Nahtqualitäten in charakteristische Regime einzuteilen sowie charakteristische Prozesskenngrößen zu quantifizieren. Zur Untersuchung der Prozessvorgänge wurden verschiedene Kamerasysteme eingesetzt, die sich neben ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung wesentlich in ihrem detektierbaren Spektralbereich unterscheiden. Es wurden die von der Dampfkapillare, dem Schmelzebad und dem Metaldampf emittierte Prozesssekundärstrahlung aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen und daraus direkte geometrische Prozesskenngrößen, wie bspw. die Länge und die Breite des Schmelzebades und der Kapillaröffnung, der Kapillarfrontverlauf oder die Spritzereigenschaften gemessen. Dies ermöglicht es, wesentliche physikalische Teil-

prozesse wie die Energieeinkopplung, Metaldampfströmung und Fluidodynamik sowie deren komplexen Wechselwirkungsmechanismen zu erörtern.

Eine Herausforderung für eine systematische Auswertung und anschauliche Visualisierung stellten die hochdynamischen Fluktuationen des Schweißprozesses dar. Durch die Entwicklung neuer Auswertestrategien konnte jedoch mit Hilfe statistischer Verfahren der Einfluss von Schwankungen zwischen Einzelbildern einer Schweißsequenz reduziert, die Einflüsse von Parametervariationen anhand geometrischer Messgrößen untersucht und charakteristische Fingerabdrücke der Prozesse bestimmt werden.

In Untersuchungen der **Prozessvorgänge bei Schweißungen mit FKL** wurden anhand koaxialer Prozessbeobachtungen der Werkstückoberfläche mit einer Nahinfrarot-Kamera geometrische Kenngrößen von Dampfkapillare, Schmelzebad und Wärmespur der bereits wieder erstarrten Schmelze ermittelt. Dadurch konnten für unterschiedliche Leistungen, Fokuslagen und Vorschubgeschwindigkeiten eindeutige Zusammenhänge der gemessenen Werte mit den Schweißergebnissen sowie den Nahtkenngrößen Einschweißtiefe und Nahtbreite an der Werkstückoberseite gefunden werden. Diese Erkenntnisse können dabei helfen, den Aufwand von Parameterstudien zu reduzieren, in denen bis heute noch viele industrielle Anwendungen aufwändig optimiert werden.

In weiteren Versuchen mit konstanter Leistung von 5 kW und konstanter Fokusslage von -2 mm wurde der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Prozessvorgänge und die Nahtqualität untersucht. Durch einen Vergleich mit dem Gewichtsverlust durch Spritzerablösungen sowie Beurteilungen des Erscheinungsbildes der Nahtoberflächen konnten drei Schweißregime identifiziert werden, die sich wesentlich in der resultierenden Nahtqualität unterscheiden. Während bei moderaten Geschwindigkeiten bis 4 m/min eine sehr hohe Nahtqualität entstand, kam es zwischen 6 m/min und 15 m/min zu starker Spritzerbildung nach hinten. Bei noch höherer Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/min wurde die Nahtqualität im Regime mit stark verlängerter Kapillaröffnung wieder besser, wobei leicht inhomogene Nahtoberflächen entstanden.

Um die hochdynamischen Vorgänge in den verschiedenen Schweißregimen besser zu verstehen, wurden Kapillaröffnung, Prozessemissionen, Schmelzebad und Spritzereigenschaften mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera betrachtet. Anhand von Röntgenuntersuchungen konnte zudem der Kapillarfrontverlauf gemessen und die resultierenden Strahleinfallswinkel abgeschätzt werden.

Durch eine Zusammenführung der Ergebnisse erfolgte eine umfassende Beschreibung der Prozessvorgänge und der Antriebsmechanismen für die Spritzerentstehung in den

verschiedenen Schweißregimen, wobei die bestehenden Modellvorstellungen bestätigt und detailliert werden konnten. Die quantitativen Ergebnisse können zudem als Eingangsgrößen theoretischer Betrachtungen und Simulationen sowie deren Verifizierung einen wertvollen Beitrag dazu leisten, um das Prozessverständnis zukünftig weiter zu verbessern. Dadurch können weitere Aspekte abgeschätzt werden, die durch Messtechnik nicht oder nur schwer untersucht werden können, wie bspw. fluiddynamische Effekte im Schmelzebad oder Einflüsse von Oberflächenspannungskräften auf die Schmelzeströmungen [6].

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die **Unterschiede von Schweißungen mit CO₂-Lasern und FKL** bezüglich Nahtqualität und Nahtkenngrößen zu quantifizieren sowie die Ursachen hierfür zu beschreiben. In vergleichenden Untersuchungen der Prozessvorgänge konnten bei Schweißungen mit beiden Strahlquellen ähnliche Strahlparameterprodukte und Strahldurchmesser auf der Werkstückoberseite erzielt werden, wodurch Rückschlüsse auf die unmittelbaren Einflüsse der Wellenlänge auf den Schweißprozess möglich waren. Obwohl mit beiden Strahlquellen ähnliche Fokussierbedingungen und vergleichbare Leistungsdichten erzielt wurden, unterscheiden sich deren resultierende Nahtkenngrößen und Nahtqualitäten wesentlich in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beide Strahlquellen aufgrund der wellenlängenbedingten Unterschiede bei der Energieeinkopplung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit unterschiedliche Verläufe der Einschweißtiefe aufweisen. Während die Einschweißtiefe mit dem CO₂-Laser bei niedrigen Geschwindigkeiten höher ist, wird bei höheren Geschwindigkeiten mit dem Festkörperlaser tiefer eingeschweißt.

Während bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten mit beiden Strahlquellen sehr gute Schweißergebnisse erzielt wurden, entstanden mit dem Festkörperlaser bei höheren Geschwindigkeiten starke Schmelzeauswürfe nach hinten. Dagegen entstanden mit dem CO₂-Laser über den gesamten Geschwindigkeitsbereich erheblich weniger Spritzer.

Durch Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera (HSK) konnte zudem aufgezeigt werden, wie sich Kapillarausbildung, Prozessemissionen und Fluidodynamik bei den beiden Strahlquellen unterscheiden. Bei gleichen Vorschubgeschwindigkeiten sind die Kapillaröffnungen mit beiden Strahlquellen vergleichbar groß. Dagegen konnten bei den Prozessemissionen und der Fluidodynamik wesentliche Unterschiede nachgewiesen werden. So sind bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser lokale Helligkeitsunterschiede, die auf Verformungen der Kapillaroberfläche zurückschließen lassen, ge-

ringer ausgeprägt. Die Schmelzebadwölbung und die Schmelzedynamik sind bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser über den gesamten Geschwindigkeitsbereich geringer als beim Festkörperlaser ausgeprägt. Offensichtlich ist die zur Oberfläche gerichtete Schmelzebadströmung aufgrund einer geringeren Wechselwirkung mit Metaldampf weniger stark ausgeprägt. Bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser ist auch kein diffus ausströmender Schweißrauch oder eine Metaldampffackel erkennbar. Stattdessen bildet sich über der Kapillaröffnung ein Plasma aus, dessen kompakte Leuchterscheinung einer Kerzenflamme ähnelt.

Diese Untersuchungen untermauern die bestehende Modellvorstellung, dass die unterschiedliche Energieeinkopplung bei den Strahlquellen den wesentlichen physikalischen Unterschied ausmacht [1]. Bei Schweißungen mit dem CO₂-Laser ist die absorbierte Intensität bei senkrechtem Strahleinfall geringer als bei denen mit Festkörperlasern durchgeführten. Da bei CO₂-Lasern der Absorptionsgrad eines Plasmas durch inverse Bremsstrahlung hoch ist, wird neben direkter Fresnel-Absorption auch ein Teil der Laserenergie über Wärmeleitung und Strahlung aus dem Plasma an den Werkstoff abgegeben. Die Absorptionseigenschaft der Laserstrahlung auf der Schmelzebadoberfläche ist stark von der Laserwellenlänge und dem Einfallswinkel abhängig und stellt den wesentlichen physikalischen Unterschied bei der Wirkungsweise der Strahlquellen dar.

Extended Abstract

Because of their different wavelengths, CO₂ and solid-state lasers differ in their beam guidance, process behavior and the resulting seam quality with deep penetration welding. Although the spatter formation of CO₂ lasers is substantially less, solid-state lasers are being increasingly used in industrial manufacture because of system advantages and their higher efficiency.

In the last few years, it has been possible to considerably expand the understanding of the sequence of events in the welding process and in the meantime, parts of single physical aspects have become well understood. In current models it is assumed that the energy needed to cause spattering is essentially provided by the evaporation of material and the interaction of metal vapor with the capillary wall [1][2][3][4][5].

The transferability of knowledge is, however, often difficult, because only small variations in experimental parameters, especially in marginal areas, can significantly influence the welding process. Many questions remain unanswered when it comes to the exact geometrical formation of vapor capillaries, of the weld pool, of the metal vapor flow and of the spatter, and when it comes to the complex interaction mechanisms as they depend on process input parameters. In order to validate the current models and answer unanswered questions as comprehensively as possible, the research was done using one solid-state laser and one CO₂ laser to weld mild steel 1.0038. Using the most modern measuring technology, the main objectives were to visualize and describe the effects of parameter variations on the welding process, to quantify and compare them using characteristic parameters and to classify the resulting seam qualities in characteristic regimes.

With the help of different cameras in the visible and near infrared spectral range it was possible to examine in detail the essential physical part-processes which occur when welding, for example, capillary shape, weld pool formation, the in-coupling of energy, metal vapor influence, molten material dynamics and spatter release, and to measure direct process parameters such as, e.g. the length and width of the melt pool, the capillary opening, the capillary front progression and spatter properties. The welding process fluctuated in a very dynamic way, posing a challenge for systematic evaluation and clear visualization. Because of the development of new evaluation strategies, the

influence of fluctuations between single images of the welding process could be reduced, the influences of parameter variations could be investigated using geometric measuring variables and characteristic fingerprints of the processes could be determined.

In the examinations of process occurrences while welding with solid-state lasers, geometrical parameters of the vapor capillaries, melt pool and heat trace of the already solidified molten material were determined using coaxial process monitoring of the workpiece surface with a near-infrared camera. In this way, clear interrelationships between the measured values and welding results and seam parameters such as the welding depth and seam width on the upper workpiece surface could be found for different powers, focal positions and feed rates. These findings can help to reduce the efforts and costs of parameter studies whose many industrial applications are optimized in a costly way.

In further experiments with a constant power of 5 kW and constant focal position of -2 mm, the influence of the feed rate on the process occurrences and seam quality was examined. Using a comparison of the weight loss resulting from spatter spray and an evaluation of the appearance of the upper weld bead along the seam, three welding regimes which differ substantially in their resulting seam quality could be identified. With moderate speeds up to 4 m/min in the regime with high seam quality, a very high seam quality was attained, but in the regime with pronounced spatter spray to the rear, between 6 m/min and 15 m/min there was a high rate of spatter formation to the rear. With the yet higher feed rate of 20 m/min, the seam quality in the regime with substantially longer capillary opening was again improved, although there were slightly inhomogeneous upper seam weld beads.

Capillary opening, process emissions, the melt pool and spatter characteristics were observed using a high-speed camera in order to better understand the highly dynamic processes in the different welding regimes. Using X-ray experiments, the progression of the capillary fronts could also be measured and the effects on the in-coupling of energy and the resulting metal vapor flow could be estimated.

Using a summary of the findings, a comprehensive description of the process occurrences and of the drive mechanisms leading to the development of spatter in the different welding regimes was made, and with it the existing models can be confirmed and specified. The quantitative results could provide a valuable contribution as input variables of theoretical observations and simulations and as their verification in order to further improve the understanding of the process in future. In this way, further aspects