

Schlussbericht vom 31.05.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21716 BG

Thema

Erweiterung der Prozessgrenzen beim MSG-Heißdrahtschweißen durch Anpassung von Material- und Energieeintrag mittels einer vorgelagerten Heißdrahtvorwärmung

Berichtszeitraum

01.06.2021 - 30.11.2023

Forschungsvereinigung

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Bitte hier die Angaben zu den Autoren eintragen!

**Technische Universität Dresden
Professur für Fügetechnik und Montage**

Dipl.-Ing. Tim Ungethüm

Dipl.-Ing. Tom Dilger

Dipl.-Ing. Paul Schilling

Dr.-Ing. Erik Spaniol

Dipl.-Ing. Matthias Schäfer

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dipl.-Ing. Rainer Salomon

Beteiligte am Projektbegleitenden Ausschuss:

Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG	Buseck
EWM GmbH	Mündersbach
FIT Ag	Lupburg
Gefertec GmbH	Berlin
Häschel Metalltechniuk GmbH & Co. KG	Heidenau
Ilsenburger Grobblech GmbH	Ilsenburg
Ingenieurbüro Marcus Trautmann	Braunschweig
Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH	Finsterwalde
Linde AG	Unterschleißheim
Lorch Schweißtechnik GmbH	Auenwald
Metallbau Simmert	Königsstein
Münch GmbH	Karlstadt
Oscar PLT GmbH	Klipphausen
Stahl- und Kranbau Schilling GmbH	Mülsen
Witzenmann GmbH	Pforzheim

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „HOHEIT“, IGF-Projekt Nr. 21716 BG, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden für die Forschungseinrichtung **Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden** insgesamt **24** Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt. Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Es wurden keine Geräte beschafft und keine Leistungen Dritter herangezogen.

Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

Kurzzusammenfassung

Trotz der sehr großen Verbreitung von MSG (Metallschutzgas)-Schweißprozessen weisen diese Prozesse den inhärenten Nachteil der Kopplung von Material- und Energieeintrag auf. In mechanisierten Anwendungen kann ein lichtbogenbehafteter Zusatzdraht (Heißdraht) genutzt werden, um diesen Nachteil zu kompensieren. Durch den Heißdrahtstrom tritt jedoch die magnetische Blaswirkung auf, wodurch Prozessfenster und Variabilität des Prozesses wiederum eingeschränkt sind. Daher ist das Ziel dieses Forschungsvorhabens die Entwicklung eines MSG-Heißdrahtverfahrens mit vorgelagerter ohmscher Zusatzdrahtvorwärmung (zwischen zwei Stromdüsen) für das Verbindungsschweißen, Auftragschweißen sowie die additive Fertigung. Neben einer Steigerung der Abschmelzleistung wird eine Entkopplung und gezielte Steuerung des Material- und Energieeintrages in Abhängigkeit des Anwendungsfalles angestrebt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der MSG-Heißdrahtprozess mit vorgewärmtem Heißdraht sowohl hinsichtlich seiner Prozesscharakteristik als auch seines Potenzials für verschiedene Schweißaufgaben eingehend untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Heißdrahtvorschub einen signifikanten Einfluss auf den Prozessverlauf hat, wobei ein Anstellwinkel von 50° zu einer stabileren und homogeneren Nahtausbildung führt. Der MSG-Prozess selbst wird primär durch die elektrische Erwärmung bestimmt und nicht durch den vorgewärmten Heißdraht beeinflusst, wobei Optimierungen der Drahtführung und der Gasspülung die Prozessstabilität weiter erhöhen können. Das Verfahren zeigt eine hervorragende Eignung für das einlagige Schweißen von 8 mm dicken Baustahlblechen und weist auch ein großes Potenzial für das Schweißen dickerer Bleche (bis 20 mm) auf. Hinsichtlich der additiven Fertigung und des Auftragschweißens ermöglicht das Verfahren eine hohe Produktivität und eine gute Aufmischung, wobei die Bahnplanung entsprechend angepasst werden muss. Ein steiler Drahtvorschubwinkel (65°) führt zu einer starken Wechselwirkung zwischen Zusatzwerkstoff und MSG-Draht, was kurze Lichtbögen erfordert. Außerdem sollte die Vorwärm länge 30 mm nicht übersteigen, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Insgesamt zeigt der MSG-Heißdrahtprozess ein hohes Potenzial für verschiedene Schweißaufgaben und Anwendungsszenarien, insbesondere im Bereich des Verbindungsschweißens und der additiven Fertigung, wobei die Anpassung der Prozessparameter entscheidend zur Optimierung beiträgt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Abstract

Despite the widespread use of MIG (gas metal arc) welding processes, these processes have the inherent disadvantage of coupling material and energy input. In mechanised applications, an arc filler wire (hot wire) can be used to compensate for this disadvantage. However, the hot wire current causes the magnetic blowing effect, which in turn limits the process window and variability of the process. The aim of this research project is therefore to develop a MSG hot wire process with upstream ohmic filler wire preheating (between two current nozzles) for joint welding, build-up welding and additive manufacturing. In addition to increasing the deposition rate, the aim is to decouple and specifically control the material and energy input depending on the application.

As part of the research project, the MSG hot wire process with preheated hot wire was analysed in detail both in terms of its process characteristics and its potential for various welding tasks. It was shown that the hot wire feed has a significant influence on the process, with an approach angle of 50° leading to a more stable and homogeneous seam formation. The MSG process itself is primarily determined by the electrical heating and is not influenced by the preheated hot wire, whereby optimisation of the wire feed and gas purging can further increase the process stability. The process shows excellent suitability for single-layer welding of 8 mm thick mild steel sheets and also has great potential for welding thicker sheets (up to 20 mm). With regard to additive manufacturing and build-up welding, the process enables high productivity and good mixing, although the path planning must be adapted accordingly. A steep wire feed angle (65°) leads to a strong interaction between the filler material and MSG wire, which requires short arcs. In addition, the preheating length should not exceed 30 mm to ensure a stable process. Overall, the MSG hot wire process shows great potential for various welding tasks and application scenarios, especially in the field of joint welding and additive manufacturing, whereby the adjustment of the process parameters makes a decisive contribution to optimisation.

The objective of this research project was accomplished.

Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme TM1: Ergebnistransfer durch Veröffentlichungen

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen, Behörden und Planungsbüros.	TM1.1 Vorstellung des Themas auf der GST des DVS	09/2021 09/2022
	TM1.2 Vorstellung des Themas auf der IIW Annual Assembly	07/2022 07/2023
	TM1.3 Vorstellung des Themas auf dem Assistentenseminar der WGF	10/2021
	TM1.1 Veröffentlichung in der Fachzeitschrift <i>Welding in the World</i>	04/2023 08/2023 (preprint)

Maßnahme TM2: Ergebnistransfer in die Industrie

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen	TM2.1 Vorstellung des Themas beim Dresdner Fügetechnischen Kolloquium	10/2024
	TM2.2 Vorstellung des Themas beim Alumnitreffen der SFI Dresden	07/2023 07/2024
	TM2.3 Vorstellung des Themas bei Industriebesuchen	seit 06/2021

Maßnahmen TM2.1 Nutzung und Industrialisierung der Projektergebnisse

Bereitstellung der Ergebnisse an die Industriepartner, die die Ergebnisse zur Verbesserung Ihrer Produkte nutzen können	TM2.1.1 Weitergabe der Ergebnisse im Rahmen von PA Treffen	seit 06/2021
---	---	-----------------

Maßnahme TM3: Projektbegleitender Ausschuss PA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PA ausführlich diskutiert.	TM3.1 PA-Sitzung online	29.07.2021
	TM3.2 PA-Sitzung online	08.03.2022
	TM3.3 PA-Sitzung hybrid in Dresden	29.11.2022
	TM3.4 PA-Sitzung online	29.09.2023

Maßnahme TM4: Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung

Die TU Dresden bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen sowie dem Diplom aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Diplomarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	TM4.1 Übernahme in die akademische Lehre (Vorlesungen) - Fertigungstechnik - Schweißverfahren	seit WS 21
	TM4.2 Übernahme in Übungen: - Fügetechnik 1 - Fakultatives Schweißpraktikum	seit WS 21
	TM4.4 Diplomarbeit: - „Entwicklung und Analyse eines MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Drahtvorwärmung für das Verbindungsschweißen“	13.09.2021 bis 13.01.2022
	TM4.5: Diplomarbeit: - „Weiterentwicklung und Analyse eines MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Drahtvorwärmung“	02.12.2021 bis 01.05.2022

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme TM5: Projektbegleitender Ausschuss PA nach der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PA ausführlich diskutiert.	A1 5. PA-Sitzung online	17.04.2024

Maßnahme TM 5.1: Ergebnistransfer durch Veröffentlichungen

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen	TM5.1.1 Ausgabe des Abschlussberichtes an interessierte Unternehmen, die im Bereich der Forschungsschwerpunkte tätig sind.	Ab 06/2024
	TM5.1.2 Präsentation der Ergebnisse auf dem Innovationstag von DVS und FOSTA	04/2024
	TM5.1.3 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit interessierten Unternehmen	Ab 06/2024

Maßnahme TM6: Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	TM6.1: Vorlesungen an der TU Dresden: „Fertigungstechnik I“, „Schweißfertigung- und Mikrofügetechnik“, „Sonderverfahren der Fertigungstechnik“, „Schweißverfahren“	WS 24
	TM6.2: Aus- und Weiterbildung von SFI und SFM an der TU Dresden in Kooperation mit den schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalten (u.a. SLV Halle)	SS 25
	TM6.3 Beitrag zur Dissertation	2024

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Im Rahmen des Forschungsprojekts zur Untersuchung des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung des Heißdrahtes konnte das Verständnis und die Anwendung dieser Prozessvariante erstmalig aufgezeigt werden. Eine zentrale Erkenntnis ist, dass der Heißdrahtvorschub einen bedeutenderen Einfluss auf den Prozess hat als die Heißdrahtstromstärke. Diese Erkenntnis hat Implikationen für die Optimierung des Schweißprozesses, insbesondere hinsichtlich der Nahtqualität und der Prozessstabilität. Es wurde festgestellt, dass ein Anstellwinkel von 50° eine stabilere Nahtform erzeugt und weniger Ausreißer verursacht als ein Winkel von 30°. Diese Erkenntnis trägt zur Verbesserung der Prozesssicherheit und zur Reduzierung von Prozessfehlern bei.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der MSG-Prozess selbst nicht durch den vorgewärmten Heißdraht beeinflusst wird, sondern primär durch die Stromwärme begrenzt wird. Dies ist ein entscheidender Faktor für die Feinabstimmung der Prozessparameter, um eine optimale Schweißnahtqualität zu gewährleisten. Die Erkenntnisse über die Dressierung des Drahtes und die Oxidation als wesentliche Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität bieten konkrete Ansatzpunkte für weitere Optimierungen, insbesondere durch eine verbesserte Drahtführung und die Integration einer Gasspülung in die Vorwärmeinheit.

Ein weiterer technischer Nutzen besteht in der hohen Produktivität des MSG-Heißdrahtprozesses beim Schweißen von Baustahlblechen. Die erzielte Abschmelzleistung von bis zu 13,5 kg/h bei gleichzeitiger Gewährleistung guter mechanischer Eigenschaften belegt die Eignung des Prozesses für anspruchsvolle industrielle Anwendungen, insbesondere im Bereich der Schweißtechnik für dickwandige Bauteile und Großstrukturen.

Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes bieten erhebliche wirtschaftliche Vorteile, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die in der Schweißtechnik tätig sind. Die Fähigkeit, dicke Baustahlbleche effizient und mit hoher Qualität zu verschweißen, eröffnet KMU neue Marktchancen und Wettbewerbsvorteile. Die erhöhte Abschmelzleistung sowie die Möglichkeit, den Prozess stabil und reproduzierbar zu gestalten, erlauben es KMU, ihre Produktivität erheblich zu steigern und gleichzeitig die Produktionskosten zu senken. Dies ist insbesondere in Branchen wie dem Maschinenbau, der Bauindustrie und der Automobilindustrie von Relevanz, in denen qualitativ hochwertige Schweißverbindungen bei gleichzeitiger Kostenreduktion gefragt sind.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil ergibt sich aus der Flexibilität des MSG-Heißdrahtprozesses. Die Möglichkeit, den Prozess durch Variation der Heißdrahtstromstärke und des Vorschubs zu steuern, ohne den Energieeintrag ins Bauteil zu verändern, ermöglicht eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Schweißaufgaben und Materialien. Dadurch werden sowohl Umrüstzeiten reduziert als auch die Effizienz in der Produktion erhöht, was insbesondere für KMU mit begrenzten Ressourcen von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist.

Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der MSG-Heißdrahtprozess stellt einen signifikanten innovativen Beitrag zur Schweißtechnologie dar. Die gezielte Vorwärmung des Heißdrahtes ermöglicht eine Optimierung der Nahtgeometrie und Prozessstabilität, wodurch sich neue Anwendungsmöglichkeiten in der additiven Fertigung und beim Auftragsschweißen eröffnen. Von besonderer Relevanz ist die hohe Produktivität des Prozesses bei der Fertigung großvolumiger Bauteile. Es konnte demonstriert werden, dass durch eine geeignete Anpassung der Pfadplanung und der Prozessparameter eine Verdopplung der Abschmelzleistung möglich ist, was die Effizienz und Wirtschaftlichkeit in der industriellen Fertigung erheblich steigert.

In der industriellen Anwendung zeigt sich der MSG-Heißdrahtprozess als vielseitig einsetzbar. Im Bereich des Verbindungsschweißens erweist sich der Prozess als exzellent geeignet für das Schweißen von Baustahlblechen, sowohl für dünne als auch für dicke Materialien. Die Möglichkeit, den Prozess ohne Modifikation der Anlage für Wurzelschweißungen zu nutzen, unterstreicht seine Flexibilität und Effizienz. Des Weiteren ermöglicht der Prozess im Auftragsschweißen eine hohe Produktivität bei guter Aufmischung und kontrolliertem Legierungsabbrand, was insbesondere in der Reparatur und Wartung von Bauteilen von Vorteil ist.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse weisen insgesamt einen erheblichen wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen auf. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Schweißtechnologie und eröffnen kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) neue Möglichkeiten zur Verbesserung ihrer Wettbewerbsfähigkeit und Produktivität in der industriellen Fertigung.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung / Introduction	1
1.1	Problemstellung / Problem definition	1
1.2	Motivation / Motivation.....	2
1.3	Zielsetzung / Objective	3
2	Stand der Technik / State of the art	5
2.1	Grundlagen des Schweißens	6
2.2	Metall-Schutzgasschweißen.....	8
2.3	MSG-Mehrdrahtschweißen.....	11
2.4	MSG-Zusatzdrahtschweißen	16
3	Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments	26
3.1	Vorgehensweise.....	26
3.2	Versuchsplanung.....	27
4	Untersuchungsmethoden und Weiterentwicklung der Versuchsanlagen / Research methods and further development of the experimental equipment.....	30
4.1	Untersuchungsmethoden von Heißdrahtprozessen	30
4.2	Weiterentwicklung eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Heißdrahtprozessen	34
5	Durchführung und Auswertung der Schweißversuche zur Charakterisierung des Prozessverhaltens / Welding Experiments for Process Characterization.....	39
5.1	Charakterisierung des Prozessverhaltens	39
5.2	Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.4301	43
5.3	Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.0045	50
5.4	Einfluss der Prozessparameter auf die Schweißnahtausbildung.....	52
5.5	Energieeintragsmessungen.....	57
6	Durchführung und Auswertung der Verbindungsschweißversuche / Joint Welding Experiments	61
6.1	Experimenteller Aufbau	61
6.2	Ergebnisse	62
6.3	Zusammenfassung der Möglichkeit zum Verbindungsschweißen mit dem MSG Heißdrahtprozess	68
7	Entwicklung eines Demonstrators mit in die Gasdüse integrierter Drahtzufuhr / Development of a demonstrator with integrated wire feed	69
7.1	Beschreibung der Randbedingungen und Anforderungen	69

7.2	Entwicklung der prinzipiellen Lösung und konstruktive Ausgestaltung	72
7.3	Diagnostische Untersuchung des Demonstrators	75
7.4	Auswahl Vorzugsvariante	82
7.5	Validierung der Konstruktion	82
7.6	Optimierung der Konstruktion	83
7.7	Richtungsabhängigkeitsuntersuchungen	85
8	Durchführung und Auswertung der Auftragschweißversuche und der additive Fertigung / Testing and analysing cladding and additive manufacturing	87
8.1	Auftragschweißversuche	87
8.2	Versuche zur additive Fertigung	93
8.3	Schlussfolgerungen zum Auftragschweißen und der additiven Fertigung	98
9	Empfehlungen zum Einsatz des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung und Zusammenfassung / Recommendations for the use of the GMAW hot wire process and summary	99
10	Ausblick / Perspective	101
11	Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project	102
12	Literaturverzeichnis / Bibliography	104
Anhang / Appendix		112
A.1	Messdaten zur Bestimmung des Energieeintrags	112
A.2	Anforderungsliste	115
A.3	Aufbau mit 70° Anstellwinkel	116
A.4	Technische Zeichnungen der Gasdüsenvarianten	117
A.5	Versuchsunterlagen Sauerstoffmessungen	120
A.6	Versuchsaufbau Schlierenmessung	123
A.7	Punktmessungen der Metallschäume	123
A.8	Ermittlung der Gewichtung der Nutzwertanalyse	124
A.9	Auftragschweißen	125
A.10	Additive Fertigung	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Hauptgruppen Fertigungsverfahren	6
Abbildung 2-2: Lichtbogenschweißverfahren Prinzipskizzen.....	8
Abbildung 2-3: Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens.....	9
Abbildung 2-4: Lichtbogenarten	10
Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip des MSG-Doppeldrahtschweißens.....	13
Abbildung 2-6: Verfahrensprinzip MSG-Tandemschweißens.....	15
Abbildung 2-7: Verfahrensprinzip des MSG-Kaltdrahtschweißens.....	17
Abbildung 2-8: Verfahrensprinzip des konventionellen MSG-Heißdrahtprozesses	19
Abbildung 2-9: Einfluss der Polung auf die Auslenkung des Lichtbogens.....	21
Abbildung 2-10: Verfahrensprinzip des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Drahterwärmung	23
Abbildung 3-1: Methodisches Vorgehen zur Untersuchung des MSG Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung des Heißdrahtes.....	27
Abbildung 4-1: Hochgeschwindigkeitskinematographie von Schweißprozessen: mit Schattentechnik in (links), mit seitlicher Beleuchtung (rechts) [75].....	31
Abbildung 4-2: Schlierenversuchsstand in Toepler'scher Z-Anordnung zur qualitativen Bewertung der Schutzgasabdeckung mit Beispielen.....	32
Abbildung 4-3: Messprinzip der Restsauerstoffmessung	33
Abbildung 4-4: 4-Achs-CNC-Anlage zur Bestimmung des Energieeintrages sowie der thermischen Dauerbelastbarkeit	35
Abbildung 4-5: Energieeintragungsmessung für Verfahren mit abschmelzender Elektrode [75]	36
Abbildung 4-6: Ablaufsteuerung der CNC-Anlage für den MSG Heißdrahtprozess.....	37
Abbildung 4-7: Anschluss der Stromquellen und Kühlungen für den MSG- Heißdrahtprozess.....	38
Abbildung 4-8: Schnittansicht der von Spaniol entwickelten Heißdrahtzufuhr für den MSG-Heißdrahtprozess mit vorgelagerter Drahtvorwärmung [75]	38
Abbildung 5-1: Einfluss der Vorwärmstrecke auf das Prozessverhalten [75]	40
Abbildung 5-2: Einfluss der Vorwärmstrecke auf die Nahtausbildung [75].....	41
Abbildung 5-3: Einfluss des Heißdrahtzuführwinkels auf das Prozessverhalten [75].....	41

Abbildung 5-4: Einfluss des Heißdrahtzuführwinkels auf die Nahtausbildung [75]	42
Abbildung 5-5: Einfluss des MSG-Kontaktrohrabstandes auf das Prozessverhalten [75].....	43
Abbildung 5-6: Einfluss des MSG-Kontaktrohrabstandes auf die Nahtausbildung [75]	43
Abbildung 5-7: Schweißbereichsdiagramme für 30° Zuführwinkel bei 1.4301	45
Abbildung 5-8: Darstellung der Versagensarten beim MSG-Heißdrahtprozess.....	46
Abbildung 5-9: Schweißbereichsdiagramme für 50° Zuführwinkel bei 1.4301	47
Abbildung 5-10: Äußere Nahtgeometrie für ausgewählte Schweißversuche mit 1.4301	48
Abbildung 5-11: Höhenprofile und innere Nahtgeometrie für ausgewählte Schweißversuche mit 1.4301.....	49
Abbildung 5-12: Schweißbereichsdiagramm für 30° Zuführwinkel und 10 m/min MSG bei 1.0045.....	51
Abbildung 5-13: Schweißbereichsdiagramm für 30° Zuführwinkel und 12 m/min MSG bei 1.0045.....	51
Abbildung 5-14: Schweißbereichsdiagramm für 50° Zuführwinkel und 10 m/min MSG bei 1.0045.....	52
Abbildung 5-15: Schweißbereichsdiagramm für 50° Zuführwinkel und 12 m/min MSG bei 1.0045.....	52
Abbildung 5-16: Einfluss des Heißdrahtstromes auf die Nahterscheinung	53
Abbildung 5-17: Einfluss des Heißdrahtvorschubs auf die Nahterscheinung	54
Abbildung 5-18: Einfluss des MSG-Vorschubs auf die Nahterscheinung	54
Abbildung 5-19: Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahterscheinung	55
Abbildung 5-20: Sankey Diagramm für die Prozessenergie	58
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Y-Naht-Vorbereitung	62
Abbildung 6-2: Ergebnisse der Verbindungsschweißversuche.....	63
Abbildung 6-3: Ergebnisse der Verbindungsschweißungen bei unterschiedlichen Energieeinträgen	64
Abbildung 6-4: Ergebnisse der Verbindungsschweißungen für stehenden und schleppenden Heißdraht.....	64
Abbildung 6-5: Äußeres Nahterscheinungsbild einer Verbindungsschweißung mit Vorzugsparametern	65

Abbildung 6-6: Ergebnisse der Zugversuche und Vergleich mit [29].....	66
Abbildung 6-7: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche und Vergleich mit [29]	66
Abbildung 6-8: Ergebnisse der Versuche zum Verbindungsschweißen von 20 mm dicken Blechen.....	67
Abbildung 7-1: Anordnung bis 60° bei kritischem Winkel	70
Abbildung 7-2: Demonstratorvarianten: a) Bauraumoptimiert, b) Schutzgasoptimiert, c) Verschleißgerecht	74
Abbildung 7-3: Schlierenmessung der Referenzdüse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min.....	77
Abbildung 7-4: Sauerstoffmessung der Referenzdüse in a) Linienmessung b) Flächenmessung.....	78
Abbildung 7-5: Schlierenmessung der bauraumoptimierten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	78
Abbildung 7-6: Sauerstoffmessung der bauraumoptimierten Düse in a) Linienmessung b) Flächenmessung.....	79
Abbildung 7-7: Darstellung der Metallschaumringe mit Ausschnitten b) Punktmessungen des Schaums 2.....	80
Abbildung 7-8: Schlierenmessung der schutzgasoptimierten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	80
Abbildung 7-9: Sauerstoffmessung der schutzgasoptimierten Düse in a) Linienmessung b) Flächenmessung.....	80
Abbildung 7-10: Schlierenmessung der verschleißgerechten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	81
Abbildung 7-11: Sauerstoffmessung der verschleißgerechten Düse in a) Linienmessung b) Flächenmessung.....	81
Abbildung 7-12: Schweißnaht bei einem steilen Anstellwinkel	83
Abbildung 7-13: Schnittdarstellung der optimierten Demonstrator konstruktion und Restsauerstoffmessung.....	84
Abbildung 7-14: Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Demonstrators und Einfluss der Lichtbogenart auf den Werkstoffübergang.....	85
Abbildung 7-15: Darstellung des Einflusses der Schweißrichtung und des Anstellwinkels auf die Richtungsabhängigkeit des MSG-Heißdrahtprozesses.....	86
Abbildung 8-1: Berechnung des Aufmischungsgrades.....	88

Abbildung 8-2: Innere Nahtgeometrie der Auftragschweißversuche.....	89
Abbildung 8-3: Abhängigkeit der äußeren Nahtgeometrie von den Heißdrahtparametern	90
Abbildung 8-4: Abhängigkeit des Aufmischungsgrades von den Heißdrahtparametern	91
Abbildung 8-5: Darstellung des Legierungsabbrandes beim MSG- Heißdrahtprozess in Abhängigkeit des Heißdrahtstroms.....	92
Abbildung 8-6: Darstellung des Legierungsabbrandes beim MSG- Heißdrahtprozess in Abhängigkeit vom Heißdrahtvorschubd	93
Abbildung 8-7: Mittels MSG-Heißdrahtprozess hergestellte Wandstruktur	95
Abbildung 8-8: Mittels MSG-Heißdrahtprozess hergestellte Blockstruktur.....	96
Abbildung 8-9: Innere Nahtgeometrie der additive gefertigten Blockstruktur	97

List of figures

Figure 2-1: Main groups of manufacturing processes	6
Figure 2-2: Arc welding process principle sketches	8
Figure 2-3: Process principle of MSG welding	9
Figure 2-4: Arc types	10
Figure 2-5: Process principle of GMAW double wire welding.....	13
Figure 2-6: Process principle of MSG tandem welding	15
Figure 2-7: Process principle of GMAW cold wire welding.....	17
Figure 2-8: Process principle of the conventional MSG hot wire process	19
Figure 2-9: Influence of polarity on the deflection of the arc.....	21
Figure 2-10: Process principle of the MSG hot wire process with upstream wire heating	23
Figure 3-1: Methodical procedure for investigating the MSG hot wire process with upstream preheating of the hot wire.....	27
Figure 4-1: High-speed cinematography of welding processes: with shadow technique in (left), with side lighting (right) [75]	31
Figure 4-2: Schlieren test rig in Toeplerian Z arrangement for qualitative evaluation of shielding gas coverage with examples	32
Figure 4-3: Measuring principle of residual oxygen measurement.....	33
Figure 4-4: 4-axis CNC system for determining the energy input and the continuous thermal load capacity	35
Figure 4-5: Energy input measurement for processes with melting electrode [75].....	36
Figure 4-6: Sequence control of the CNC system for the MSG hot wire process.....	37
Figure 4-7: Connection of the power sources and cooling systems for the MSG hot wire process	38
Figure 4-8: Sectional view of the hot wire feeder developed by Spaniol for the MSG hot wire process with upstream wire preheating [75]	38
Figure 5-1: Influence of the preheating section on the process behavior [75].....	40
Figure 5-2: Influence of the preheating section on the seam formation [75].....	41
Figure 5-3: Influence of the hot wire feed angle on the process behavior [75]	41
Figure 5-4: Influence of the hot wire feed angle on seam formation [75].....	42
Figure 5-5: Influence of the MSG contact tube spacing on the process behavior [75]	43

Figure 5-6: Influence of the MSG contact tube spacing on the seam formation [75]	43
Figure 5-7: Welding range diagrams for 30° feed angle with 1.4301	45
Figure 5-8: Representation of the failure modes in the MSG hot wire process.....	46
Figure 5-9: Welding range diagrams for 50° feed angle with 1.4301	47
Figure 5-10: Outer seam geometry for selected welding tests with 1.4301	48
Figure 5-11: Height profiles and internal seam geometry for selected welding tests with 1.4301.....	49
Figure 5-12: Welding range diagram for 30° feed angle and 10 m/min MSG at 1.0045	51
Figure 5-13: Welding range diagram for 30° feed angle and 12 m/min MSG at 1.0045	51
Figure 5-14: Welding range diagram for 50° feed angle and 10 m/min MSG at 1.0045	52
Figure 5-15: Welding range diagram for 50° feed angle and 12 m/min MSG at 1.0045	52
Figure 5-16-: Influence of the hot wire current on the seam appearance	53
Figure 5-17: Influence of the hot wire feed on the seam appearance.....	54
Figure 5-18-: Influence of the MSG feed rate on the seam appearance.....	54
Figure 5-19: Influence of the angle of attack on the seam appearance.....	55
Figure 5-20: Sankey diagram for the process energy.....	58
Figure 6-1: Schematic representation of Y-seam preparation	62
Figure 6-2: Results of the joint welding tests	63
Figure 6-3: Results of the joint welds with different energy inputs.....	64
Figure 6-4: Results of the joint welds for piercing and trailing hot wire	64
Figure 6-5: External seam appearance of a joint weld with preferred parameters.....	65
Figure 6-6: Results of the tensile tests and comparison with [29].....	66
Figure 6-7: Results of the notched bar impact tests and comparison with [29].....	66
Figure 6-8: Results of the tests for joint welding of 20 mm thick sheets	67
Figure 7-1: Arrangement up to 60° at critical angle	70
Figure 7-2: Demonstrator variants: a) space-optimized, b) shielding gas-optimized, c) wear-optimized.....	74

Figure 7-3: Schlieren measurement of the reference nozzle with a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	77
Figure 7-4: Oxygen measurement of the reference nozzle in a) line measurement b) area measurement	78
Figure 7-5: Schlieren measurement of the installation space-optimized nozzle with a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	78
Figure 7-6: Oxygen measurement of the installation space-optimized nozzle in a) line measurement b) area measurement	79
Figure 7-7: Representation of the metal foam rings with cut-outs b) Spot measurements of foam 2.....	80
Figure 7-8: Schlieren measurement of the shielding gas-optimized nozzle with a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	80
Figure 7-9: Oxygen measurement of the shielding gas-optimized nozzle in a) line measurement b) area measurement.....	80
Figure e 7-10-: Schlieren measurement of the wear-resistant nozzle with a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min	81
Figure 7-11-: Oxygen measurement of the wear-resistant nozzle in a) line measurement b) area measurement	81
Figure 7-12-: Weld seam at a steep angle of attack.....	83
Figure 7-13-: Sectional view of the optimized demonstrator design and residual oxygen measurement.....	84
Figure 7-14-: Proof of the demonstrator's suitability for use and influence of the arc type on the material transition	85
Figure 7-15-: Illustration of the influence of the welding direction and the angle of attack on the directional dependence of the MSG hot wire process.....	86
Figure 8-1: Calculation of the degree of mixing.....	88
Figure 8-2: Inner seam geometry of the build-up welding tests.....	89
Figure 8-3: Dependence of the outer seam geometry on the hot wire parameters	90
Figure 8-4: Dependence of the degree of mixing on the hot wire parameters.....	91
Figure 8-5: Illustration of the alloy burn-off in the MSG hot wire process as a function of the hot wire current	92
Figure 8-6: Illustration of the alloy burn-off in the MSG hot wire process as a function of the hot wire feed rated	93

Figure 8-7: Wall structure produced using the MSG hot wire process 95
Figure 8-8: Block structure produced using the MSG hot wire process 96
Figure 8-9: Inner seam geometry of the additively manufactured block structure 97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile des MSG-Doppeldrahtschweißens	14
Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile des MSG-Tandemschweißens.....	16
Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile des Kaltdrahtschweißens.....	18
Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile des konventionellen Heißdrahtschweißens.....	22
Tabelle 2-5: Vor- und Nachteile des Heißdrahtschweißens mit vorgelagerter Drahtvorwärmung.....	25
Tabelle 3-1: Versuchsplanung für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen und Aufbau von Prozessverständnis.....	27
Tabelle 3-2: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Verbindungsschweißen	28
Tabelle 3-3: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Auftragschweißen.....	28
Tabelle 3-4: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für die additive Fertigung	29
Tabelle 5-1: Versuchsparameter für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.4301	44
Tabelle 5-2: Versuchsparameter für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.0045	50
Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Einflüsse auf äußere und innere Nahtparameter	56
Tabelle 5-4: Vollständige Energieeintragungsmessung	59
Tabelle 5-5: Verhältnis Kühlleistung zu Heißdrahtstrom	60
Tabelle 6-1: Versuchsparameter für die Untersuchungen Verbindungsschweißen....	61
Tabelle 6-2: Varianten der verschiedenen Nahtvorbereitungen	62
Tabelle 7-1: Morphologischer Kasten Düsenentwicklung.....	73
Tabelle 7-2: Nutzwertanalyse.....	82
Tabelle 8-1: Versuchsparameter für die Untersuchungen zum Auftragschweißen.....	88
Tabelle 8-2: Versuchsparameter für die Untersuchungen zur additiven Fertigung.....	93
Tabelle 8-3: Vergleich der Prozessparameter bei der additiven Fertigung mit einem konventionellen CMT-Prozess.....	96

List of tables

Table 2-1: Advantages and disadvantages of GMAW double-wire welding	14
Table 2-2: Advantages and disadvantages of GMAW tandem welding	16
Table 2-3: Advantages and disadvantages of cold wire welding	18
Table 2-4: Advantages and disadvantages of conventional hot wire welding	22
Table 2-5: Advantages and disadvantages of hot wire welding with upstream wire preheating	25
Table 3-1: Test planning for setting up welding range diagrams and building up process understanding	27
Table 3-2: Test planning for the investigations into the suitability of the process for joint welding	28
Table 3-3: Test planning for the investigations into the suitability of the process for deposition welding	28
Table 3-4: Test planning for the investigations into the suitability of the process for additive manufacturing	29
Table 5-1: Test parameters for drawing up welding range diagrams for 1.4301	44
Table 5-2: Test parameters for drawing up welding range diagrams at 1.0045	50
Table 5-3: Summary of influences on external and internal seam parameters	56
Table 5-4: Complete energy input measurement	59
Table 5-5: Ratio of cooling capacity to hot wire current	60
Table 6-1: Test parameters for the joint welding tests	61
Table 6-2: Variants of the different seam preparations	62
Table 7-1: Morphological box Nozzle development	73
Table 7-2: Utility value analysis	82
Table 8-1: Test parameters for the deposition welding tests	88
Table 8-2: Test parameters for the additive manufacturing tests	93
Table 8-3: Comparison of the process parameters in additive manufacturing with a conventional CMT process	96

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

CMT	Cold-Metal-Transfer
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DC	Direct current (Gleichstrom)
DIN	Deutsche Industrienorm
Fa.	Firma
HD	Heißdraht
i.O.	In Ordnung
MAG	Metall-Aktivgas
MIG	Metall-Inertgas
MSG	Metall-Schutzgas
NC	Numerical control
NE	Nichteisen
n.i.O.	Nicht in Ordnung
ON	Ordnungsnummer
Pos.	Position
SBD	Schweißbereichsdiagramm
SKD	Stromkontaktdüse
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inertgas

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Lateinische Symbole

A	Fläche	m^2
c	Spezifische Wärmekapazität	$J kg^{-1} K^{-1}$
E	Streckenenergie	$kJ m^{-1}$
F	Nahtformfaktor	–
I	Stromstärke	A
l	Länge	m
P	Leistung	W
Q	Energie	J
\dot{Q}	Wärmefluss	W
R	Widerstand	Ω
T	Temperatur	$^{\circ}C$
t	Zeit	s
\dot{V}	Volumenstrom	$m^3 s^{-1}$
v	Geschwindigkeit	$m s^{-1}$
X	Koordinate	m
Y	Koordinate	m
Z	Koordinate	m

Griechische Symbole

α	Anstellwinkel	$^{\circ}$
ρ	Dichte	$kg m^{-3}$
ρ	Materialspezifischer elektrischer Widerstand	Ωm

Indizes

0	Ausgangstemperatur
3	3-dimensional
8/5	800 °C bis 500 °C
<i>BR</i>	MSG-Brenner
<i>BT</i>	Bauteil
<i>D</i>	Draht
el	elektrisch
<i>HD</i>	Heißdraht
<i>MSG</i>	Metall-Schutzgas
<i>R</i>	Widerstand
<i>S</i>	Schweißen
<i>Str.</i>	Strahlung
<i>VE</i>	Vorwärmeinheit

1 Einleitung / Introduction

Kurzfassung

Der MSG-Prozess gehört den in der industriellen Praxis am häufigsten eingesetzten Schweißprozessen. Aufgrund der guten Automatisierbarkeit und hohen Produktivität wird der Prozess für eine Vielzahl an Fügeaufgaben oder aber auch für das Auftragschweißen und die additive Fertigung eingesetzt. Dem Prozess inhärent ist jedoch die Kopplung von Energie- und Materialeintrag, was eine höhere Abschmelzleistung (Materialeintrag) immer an einen hohen Wärmeeintrag in das Bauteil koppelt. Um diese Kopplung zu reduzieren, wurde der MSG-Heißdrahtprozess entwickelt. Beim Einsatz des Heißdrahtprozesses treten jedoch andere Störfaktoren, wie die magnetische Blaswirkung des Zusatzdrahtes und ein kleines Prozessfenster auf. Daher ist es Ziel dieses Forschungsvorhabens eine Weiterentwicklung hinsichtlich hochproduktiver MSG-Heißdrahtprozesse zu realisieren. Durch eine innovative Zusatzdrahtvorwärmung sollen die Prozessnachteile minimiert werden.

Abstract

The GMAW process is one of the most frequently used welding processes in industrial practice. Due to its good automation capability and high productivity, the process is used for a wide range of joining tasks as well as for cladding and additive manufacturing. Inherent to the process, however, is the coupling of energy and material input, which means that a higher deposition rate (material input) is always coupled with a higher heat input into the component. The GMAW hot wire process was developed to reduce this coupling. When using the hot wire process, however, other interference factors occur, such as the magnetic blowing effect of the filler wire and a small process window. Therefore, the aim of this research project is to develop highly productive GMAW hot wire processes. The process disadvantages are to be minimized through innovative filler wire preheating.

1.1 Problemstellung / Problem definition

Das Metall-Schutzgasschweißen (MSG) wird aufgrund der sehr guten Mechanisierbarkeit und Automatisierbarkeit des Prozesses sowie der zahlreichen Verfahrensvarianten in einem breiten Anwendungsfeld eingesetzt.

Für die Realisierung von Dickblech- und Auftragsschweißungen im Bereich des Stahlbaues, des Maschinen- bzw. Anlagenbaues [1], des Schienenfahrzeugbaus sowie der Offshore-Industrie und des Schiffbaues [2, 3] ist der Einsatz von MSG-Verfahrensvarianten mit erhöhter Abschmelzleistung sinnvoll. Konventionelle MSG-Schweißverfahren zeichnen sich durch die gleichzeitige Material- und Wärmeeinbringung über eine lichtbogenführende Drahtelektrode aus. Dadurch

bedingt eine Erhöhung der Stromstärke zeitgleich eine Steigerung der Abschmelzleistung und somit folgt zwangsläufig eine Steigerung des Energieeintrages. Eine weitere Steigerung von Produktivität und Wirtschaftlichkeit kann durch die Anwendung von MSG-Hochleistungsprozessen mit mehreren lichtbogenführenden Elektroden, wie dem Tandem- oder Doppeldrahtschweißen, erreicht werden [4]. Die große Abschmelzleistung dieser Verfahren führt insbesondere beim Mehrlagenschweißen von großen Blechdicken zu einer Verringerung der notwendigen Lagenanzahl. Die Anwendung dieser Verfahren bringt jedoch eine sehr hohe thermische Beanspruchung des Grundwerkstoffes mit sich, sodass es zu einer Verringerung der mechanisch-technologischen Güterwerte durch Grobkornbildung kommt [5] sowie zu Eigenspannungen und Verzug.

Eine Alternative zu den beschriebenen Prozessen stellt die Kombination von MSG-Verfahren mit lichtbogenlosen Zusatzdrähten dar. Diese Verfahren bieten die Möglichkeit, den werkstofftechnischen Einfluss infolge des Wärmeeintrages zu minimieren sowie die Abschmelzleistung zu erhöhen, da eine Entkopplung von Energie- und Zusatzwerkstoffzufuhr erreicht werden kann [6]. Die erzielbaren Produktivitätssteigerungen sind jedoch relativ gering, da aus der Zufuhr des nichtlichtbogenführenden Drahtes eine starke Abkühlung des Schmelzbades resultiert. Folglich kommt es bei Verbindungsschweißungen zu einer deutlichen Verschlechterung des Einbrandverhaltens, zur Aufhärtung [7] sowie einer erhöhten Porenanfälligkeit. Daher werden diese Verfahren vor allem für das Auftragsschweißen und Beschichten eingesetzt [8 bis 10]. Gleichzeitig führt die Schmelzbadabkühlung infolge der Zusatzdrahtzufuhr auch zu einer Kornfeinung, sodass hohe Festigkeitswerte erreicht werden [11].

Der Einsatz von mehreren lichtbogenführenden sowie lichtbogenlosen Elektroden geht mit einer signifikanten Steigerung der Prozessdynamik einher, da es zu einer ausgeprägten magnetischen Blaswirkung aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Potentiale kommt [12 bis 14]. Dies führt zu einer stark verringerten Prozessstabilität und –reproduzierbarkeit [15] sowie zu einer signifikanten Beeinflussung der Schutzgasatmosphäre [16] sowie des Werkstoffüberganges [17]. Zwar ist es möglich dem Einfluss der magnetischen Blaswirkung durch die Kombination unterschiedlicher Gleich- und Wechselströme entgegenzuwirken, allerdings schränkt dies die Anwendbarkeit der Verfahren stark ein, da das die Ausprägung der magnetischen Blaswirkung von Art und Zusammensetzung der Grundwerkstoffe abhängt.

1.2 Motivation / Motivation

In Deutschland wird die Entwicklung und Anwendung von Schweißtechnologien noch immer maßgeblich durch Unternehmen des Mittelstandes (kmU) geprägt. Die zunehmende Globalisierung und der daraus resultierende internationale Wettbewerbsdruck zwingen diese Unternehmen ihre Prozesse sowie Fertigungsabläufe kontinuierlich weiterzuentwickeln, um ihre Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Die wettbewerbstechnischen Kostennachteile von Industrieländern hinsichtlich Energie- und Lohnkosten müssen, zur Reduktion der Lohnstückkosten,

durch die konsequente Nutzung von Automatisierungsmöglichkeiten sowie die Entwicklung von Hochleistungsprozessen ausgeglichen werden.

In der industriellen Praxis stehen kmU eine Vielzahl von MSG-Prozessvarianten zur Verfügung, deren Anwendung sich jedoch oft auf bestimmte, meist eingeschränkte Einsatzgebiete erstreckt. Bauteilgeometrie und -eigenschaften sind dabei für die Auswahl einer Verfahrensvariante maßgebend. Zum Erreichen einer hohen Wirtschaftlichkeit ist zwangsläufig die Steigerung der Produktivität durch eine Erhöhung der Abschmelzleistung erforderlich, woraus jedoch gleichzeitig eine Steigerung des Energieeintrages resultiert. Die damit einhergehende hohe thermische Beanspruchung des Grundwerkstoffs, führt zu einer Verringerung der mechanisch-technologischen Eigenschaften sowie zur Entstehung von Eigenspannungen und Verzug.

1.3 Zielsetzung / Objective

Im Rahmen des Projektvorhabens sollen grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Prozessverhaltens des MSG-Heißdrahtschweißens mit vorgelagerter Drahtvorwärmung erarbeitet und daraus abgeleitet ein Konzept zur industriellen Umsetzung der Technologie erarbeitet werden. Eine Steigerung der Produktivität durch hohe Abschmelzleistungen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen steht dabei im Vordergrund. Das entwickelte Lichtbogenverfahren soll sowohl für das Verbindungsschweißen als auch das Auftragsschweißen und die additive Fertigung eingesetzt werden können, wodurch kmU in die Lage versetzt werden, sehr flexibel auf sich ständig ändernde Bauteilgeometrien, Bauteileigenschaften, Prozessabläufe und Produktionsbedingungen zu reagieren. Damit wird es auch kleinen Unternehmen des Mittelstandes ermöglicht, neue Anwendungsfelder zu überschaubaren Kosten zu erschließen. Diese Weiterentwicklung dient ebenfalls zur Sicherung des Absatzes nationaler Stahlerzeugnisse. Aus den Erkenntnissen hinsichtlich des Werkstoff- und Prozessverhaltens sollen sich folgende wirtschaftlichen Vorteile, insbesondere für stahlverarbeitende kmU, ergeben:

Verbindungsschweißen

Die angestrebte Heißdrahttechnologie soll eine signifikante Steigerung der Abschmelzleistung und somit der Schweißgeschwindigkeit beim Verbindungsschweißen ermöglichen und folglich zu einer Steigerung von Produktivität und Wirtschaftlichkeit führen. Damit soll vor allem bei Mehrlagenschweißungen die erforderliche Lagenanzahl reduziert verringert werden. Gleichzeitig soll trotz eines reduzierten Wärmeeintrages ein qualitätsgerechtes Einbrand- und Benetzungsverhalten sowohl im Dünnblech- als auch Dickblechbereich gewährleistet werden können. Hohe Einschweißstiefen sollen das erforderliche Nahtvolumen reduzieren. Die angestrebte Steuerung des Wärmeeintrages soll eine Verbesserung der werkstofftechnischen Güterwerte zulassen und zudem eine Reduktion von Eigenspannungen und Verzug sicherstellen. Darüber hinaus soll auch die Eignung des Verfahrens für das wirtschaftliche Schweißen von temperaturempfindlichen Werkstoffen wie Austeniten nachgewiesen werden.

Auftragsschweißen bzw. additive Fertigung

Beim Auftragsschweißen sowie der additiven Fertigung soll mit Hilfe der MSG-Heißdrahttechnologie der Energieeintrag so weit abgesenkt werden, dass eine sichere Anbindung und Benetzung erreicht wird, gleichzeitig aber der Aufmischungsgrad so gering wie möglich gehalten werden kann. Der Wärmeeintrag in das Bauteil soll somit auf ein Minimum reduziert werden, um die mechanisch-technologischen Gütewerte möglichst wenig zu beeinflussen sowie der Entstehung von Eigenspannungen und Verzug entgegenzuwirken. Darüber hinaus soll durch eine Veränderung der Vorwärmparameter eine gezielte Beeinflussung des Gefügestandes und somit der Festigkeitskennwerte erreicht werden. Durch Integration der Vorwärmeinheit in die Gasdüse soll die Richtungsunabhängigkeit des MSG-Heißdrahtprozesses stark verbessert sowie die Zugänglichkeit bei der generativen Fertigung von komplexen Bauteilgeometrien (z.B. Hinterschnitten) vereinfacht werden.

2 **Stand der Technik / State of the art**

Kurzfassung

Im Rahmen der Literaturrecherche werden bestehende Schweißverfahren analysiert und miteinander verglichen, um deren Effektivität und Anwendbarkeit zu bewerten. Hierbei werden auch verschiedene Zusatzdrahtprozesse im MIG/MAG-Schweißen betrachtet, sowohl solche, die bereits in der Industrie weit verbreitet sind, als auch solche, die bisher weniger Verwendung finden. Eine gründliche Untersuchung der vorhandenen Literatur ermöglicht es, den MSG-Heißdrahtprozess mit einer vorgelagerten Vorwärmung des Zusatzdrahtes als vielversprechende Alternative zu identifizieren.

Bislang existieren jedoch nur begrenzte wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse über das volle Potenzial dieses spezifischen Prozesses. An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt an, indem es diese Lücke durch umfassende Untersuchungen schließt. Dabei stehen die Charakterisierung des Prozesses sowie die Evaluierung seiner Leistungsfähigkeit im Fokus. Durch eine systematische Analyse der Prozessparameter und deren Einfluss auf die Schweißergebnisse wird angestrebt, das Verständnis für die Anwendungsmöglichkeiten und die Potenziale des MSG-Heißdrahtprozesses zu vertiefen.

Abstract

In the state of the art, the previously employed welding processes are described and compared to each other in terms of their productivity. Similarly, previously utilized MIG/MAG wire feed processes are introduced, including those that have seen widespread application in practice as well as those that have been less commonly adopted. Based on the findings, the MIG hot wire process with preheating of the filler wire is identified as a promising approach. However, due to the lack of comprehensive investigations into the potential of this process in both academic and practical domains, the research project focuses on addressing this gap.

Thus, the project aims to conduct thorough examinations to characterize the process and assess its performance. This entails a systematic analysis of process parameters and their impact on welding outcomes, with the goal of deepening understanding regarding the application possibilities and potentials of the MIG hot wire process.

2.1 Grundlagen des Schweißens

In Kapitel 2 erfolgt zunächst eine Einführung in das thermische Fügen durch Schweißen. Die Einordnung in die Fertigungstechnik dient als Grundlage und ermöglicht die Unterteilung verschiedener Schweißverfahren. Daran schließt sich die Beschreibung der, für dieses Forschungsprojekt relevanten, Lichtbogenschweißprozesse an.

Fertigungsverfahren

Um eine Übersicht der diversen Fertigungsverfahren zu ermöglichen, werden diese nach DIN 8580 [18] in sechs Hauptgruppen unterteilt. Die Einteilung erfolgt entsprechend der Wirkweise der Verfahren, wobei, wie in Abbildung 2-1 zu erkennen ist, der Komplex Fügetechnik die vierte Gruppe bildet. Beim Fügen wird der Zusammenhalt vermehrt, indem zwei oder mehr Werkstücke dauerhaft, aber nicht zwangsweise unlösbar, verbunden werden. [18] Innerhalb der vierten Gruppe erfolgt eine detailliertere Einteilung nach der Art des Zusammenhaltes und der Lösbarkeit [19]. Das Fügen durch Schweißen (Ordnungsnummer (ON) 4.6) zeichnet sich dabei durch eine Stoffverbindung aus, die auf den Adhäsions- und Kohäsionskräften zwischen den Fügeteilen basiert und i.d.R. nicht zerstörungsfrei lösbar ist [20].

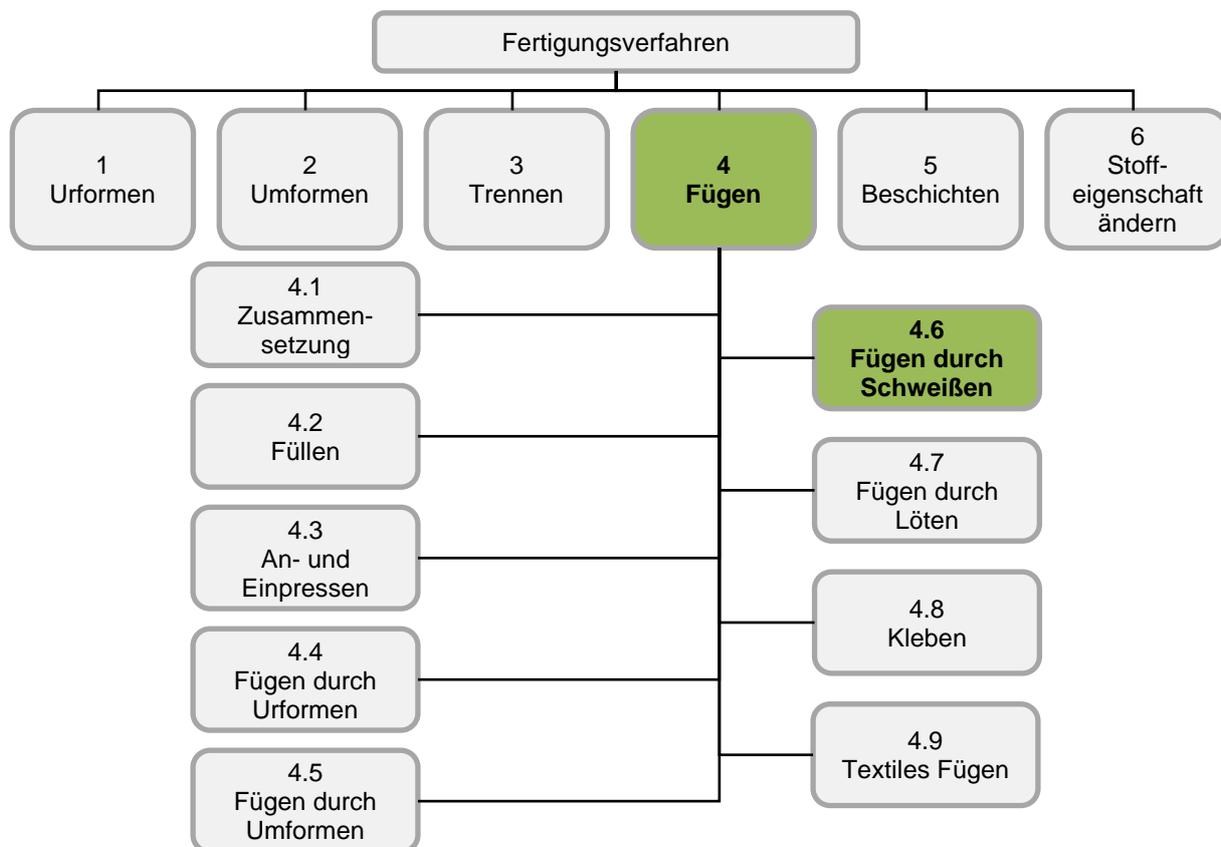


Abbildung 2-1: Hauptgruppen Fertigungsverfahren nach [18]

Fügen durch Schweißen

Aufgrund der in der industriellen Umgebung häufigen Anwendung, ist das Schweißen als eine wichtige Gruppe der Fügeverfahren zu sehen. Beim Fügen durch Schweißen wird ein Stoffschluss hergestellt, indem die Fügeteile aufgeschmolzen (Schmelzschweißen) oder nach örtlicher Verformung plastifiziert (Pressschweißen) werden. Die dafür notwendige Energiezufuhr kann auf unterschiedliche Weisen aufgebracht werden:

1. Reibung: Werkstücke werden durch Reibung erwärmt und miteinander verpresst
2. Gas: Verbrennendes Gas schmilzt die Fügeteile im Schweißbad auf
3. Strahlen: Die Fügestelle wird durch einen hochenergetischen nicht kohärenten Lichtstrahl bestrahlt
4. elektrische Gasentladung: Über ein gasförmiges Medium fließt ein elektrischer Strom zwischen zwei Elektroden

Innerhalb dieses Forschungsprojekts liegt der Fokus auf dem Schweißen mit Lichtbogen (elektrische Gasentladung). [21]

Lichtbogenschweißverfahren

Beim Einsatz von Lichtbogenschweißverfahren wird der Werkstoff durch einen frei brennenden Lichtbogen aufgeschmolzen. Dabei wird über den gasgefüllten Bereich zwischen den Elektroden ein hoher Strom übertragen und elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt. Möglich ist dieser Vorgang aufgrund von Elektronen und ionisierten Molekülen im Gas, welche infolge verschiedener Emissionsvorgänge, durch hohe Temperaturen oder ein starkes elektrisches Feld, frei werden. Mittels Potenzialdifferenz (Schweißspannung) zwischen den Elektroden werden die Ladungsträger in Richtung Kathode (Ionen) bzw. Anode (Elektronen) beschleunigt. Entlang des Lichtbogens werden beim Zusammenstoß mit weiteren Teilchen, der Stoßionisation, neue Ladungsträger freigesetzt und der Lichtbogen aufrechterhalten. Das Aufprallen der Ladungsträger an den Elektroden wandelt deren kinetische Energie in Wärme um, welche für den Schweißprozess genutzt werden kann. [21] [22]

Ein Lichtbogen wird in unterschiedlichen Prozessen als Werkzeug eingesetzt. Die DIN EN ISO 4063 [23] listet alle Schweißprozesse mit Einsatz eines Lichtbogens unter ON 1, welche in Abbildung 2-2 als Funktionsprinzipien abgebildet werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird ein Prozess auf Basis des MSG-Schweißens (ON 13) untersucht. Daher wird dieses lichtbogenbasierte Verfahren im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

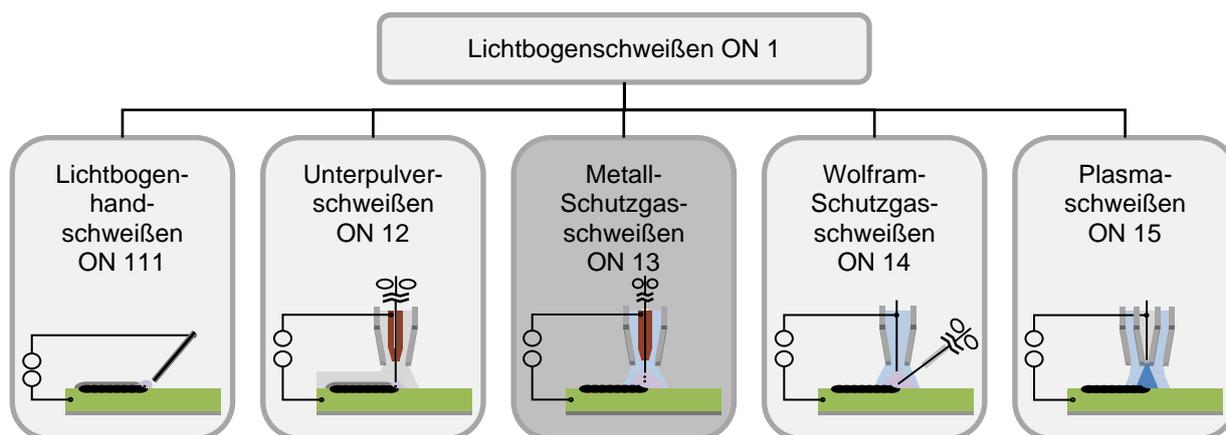


Abbildung 2-2: Lichtbogenschweißverfahren Prinzipskizzen nach [21], [23] und [24]

2.2 Metall-Schutzgasschweißen

In Abbildung 2-3 wird das Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens dargestellt. Das MSG-Verfahren ist durch eine kontinuierliche, koaxial geförderte Drahtelektrode charakterisiert. Auf die Drahtelektrode wird innerhalb des für den Prozess verwendeten Brenners über eine Stromkontaktdüse (SKD) ein Strom aufgeprägt. Dabei ist in der üblichen Konfiguration die Drahtelektrode positiv und das Werkstück negativ gepolt. Dazwischen wird der Lichtbogen ausgebildet. Infolge der Nutzung der abschmelzenden Drahtelektrode sind MSG-Prozesse nur mit Zusatzwerkstoff zu realisieren. Das entstehende Schmelzbad muss mit Schutzgas vor Oxidation an der Umgebungsluft geschützt werden. Durch die Schutzgasdüse wird entweder inertes Schutzgas (ON 131, 132, 133 [23]) (MIG Verfahren) oder Schutzgas mit aktiven Gasanteilen (ON 135, 136, 138 [23]) (MAG Verfahren), welche im Gegensatz zu den inerten Gasen chemische Reaktionen mit dem Schweißgut eingehen, in den Prozessbereich geleitet. [21] [25]

Zum Starten des Schweißprozesses ist die Zündung des Lichtbogens notwendig. Aufgrund der hohen Verdampfungsrate der Elektroden beim MSG-Schweißen ist eine kurzschlussfreie berührungslose Zündung mit hoher Frequenz nicht möglich [22]. Stattdessen erfolgt eine kurzschlussbehaftete Abreißzündung [21]. Dabei wird ein Kontakt zwischen dem Werkstück und der Elektrode hergestellt, sodass über eine kleine Berührungsfläche ein hoher Strom fließt. Hierbei verdampft eine geringe Menge Metall und das Schutzgas kann durch die Schweißspannung und die elektrische Leitfähigkeit des Metaldampfes ionisiert werden. Anschließend wird der Kontakt mechanisch (Zurückziehen der Elektrode) oder thermisch (Überlastung der Schmelzbrücke) aufgelöst. Der Lichtbogen kann danach mittels der freien Ladungsträger im ionisierten Gas aufrechterhalten werden. [21]

Durch Variation von Schweißspannung und Schweißstrom/Drahtvorschub, Schutzgas und Kontaktrohrabstand können die Eigenschaften des Lichtbogens beeinflusst werden. Je nach Wahl der Parameter stellen sich verschiedene Lichtbogenarten ein. Diese sind in Abbildung 2-4 über den zugehörigen Parameterwerten dargestellt. In der Folge werden die Eigenschaften und Einsatzbereiche der gängigsten Lichtbogenarten vorgestellt.

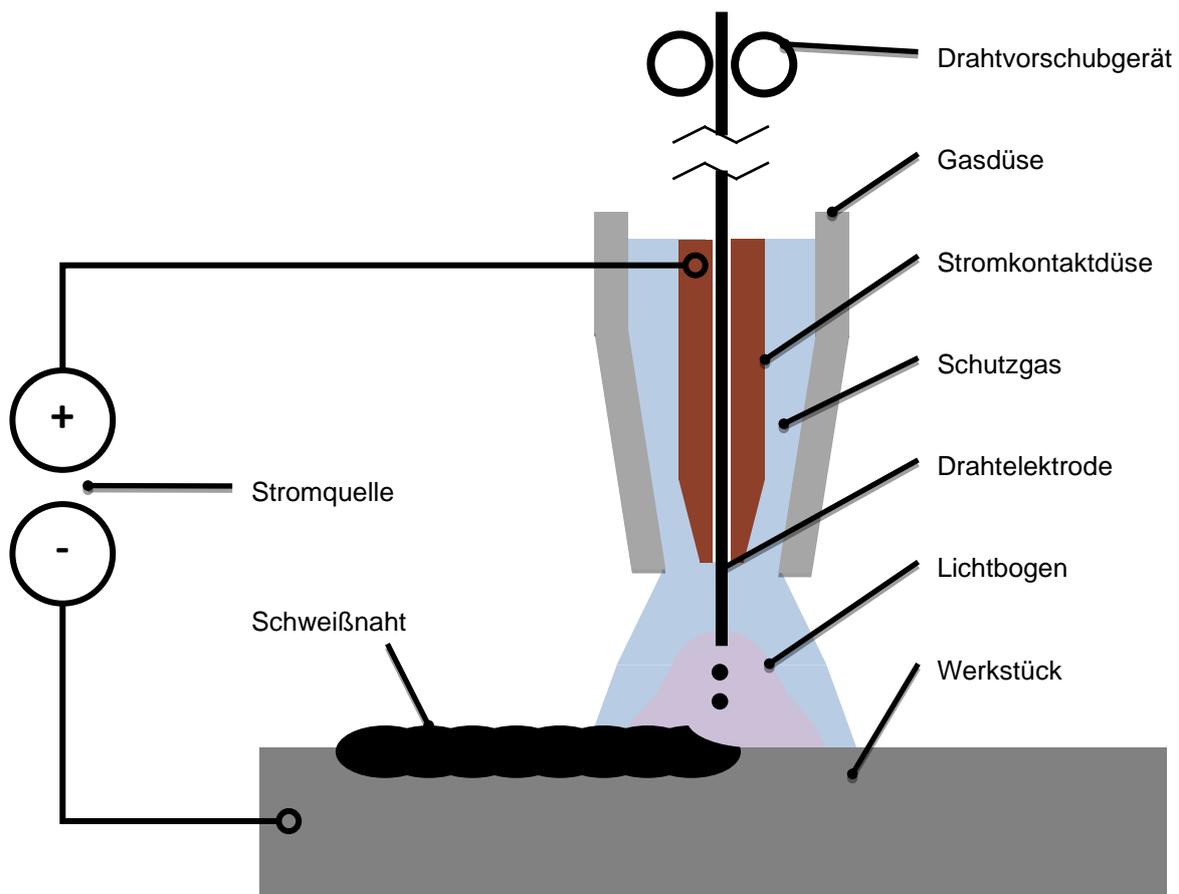


Abbildung 2-3: Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens nach [26]

Im unteren Leistungsbereich wird der **Kurzlichtbogen** ausgebildet. Der Werkstoffübergang erfolgt im Kurzschluss. Zuerst wird durch den gezündeten Lichtbogen das Drahtende aufgeschmolzen bis die Elektrode durch den Drahtvorschub das Schmelzbad berührt. Dabei erlischt der Lichtbogen. Dann führen die Oberflächenkräfte des Schmelzbad sowie die bei der Einschnürung einsetzenden Pinch-Kräfte [20] zu einer Ablösung des Zusatzwerkstoffes und der Lichtbogen zündet erneut. Die hohen Kurzschlussströme können zum Zerplatzen der übergehenden Tropfen führen und verursachen so eine starke Spritzerbildung. Um diesen Effekt zu verringern, wird in der Kurzschlussphase der Strom durch eine Drossel (Induktivität) begrenzt. Generell zeichnet sich der Kurzlichtbogenprozess durch einen geringen Wärmeeintrag aus, wodurch das Schweißen von dünnen Blechen, sowie das Arbeiten in Zwangslagen ermöglicht wird, hohe Drahtvorschübe jedoch nicht erreicht werden können. [20] [21] [25]

Weiterhin gestaltet sich der Prozess aufgrund des Kurzschlussverhaltens als sehr dynamisch. Die Kurzschlussfrequenz hat einen großen Einfluss auf den Materialübergang und damit auf die Prozessstabilität, sodass das Prozessfenster des Kurzlichtbogens begrenzt ist. [27]

Eine noch geringere Wärmeeinbringung, um sehr dünne, beschichtete oder temperaturempfindliche Bleche zu schweißen, kann mit der geregelten Kurzlichtbogentechnik erzielt werden. Weiterhin zeichnen sich diese Prozesse durch eine höhere Prozessstabilität und geringere Spritzerbildung aus. [28] [29] Das

bekannteste Verfahren der geregelten Kurzlichtbogentechnik ist der **Cold-Metal-Transfer**-Prozess (CMT) [30]. Dieser wird mechanisch geregelt. Mithilfe eines Push-Pull-Antriebs im Brenner wird die Drahtelektrode nach der Kurzschlussbildung wieder zurückgezogen. So können der Werkstoffübergang und damit der Wärmeeintrag exakt gesteuert werden. Im Gegensatz zum CMT wird beim **ColdArc** Verfahren [29] keine besondere Drahtvorschubtechnik benötigt, da die Regelung elektrisch durch die Stromquelle erfolgt. Lediglich die Phase nach dem Kurzschluss, in der der Lichtbogen erneut gezündet wird, muss gesteuert werden. Nach Abriss des Kontaktes wird der Strom stark reduziert und der Lichtbogen zündet bei niedrigerer Leistung. Um den vorderen Teil der Elektrode aufzuschmelzen, ist vor Ende des Zyklus eine definierte Leistungszugabe in Form einer Stromerhöhung notwendig. Zum einen wird so die Wärmeinbringung beim Zünden des Lichtbogens reduziert und zum anderen der Werkstoffeintrag exakt geregelt. [29]

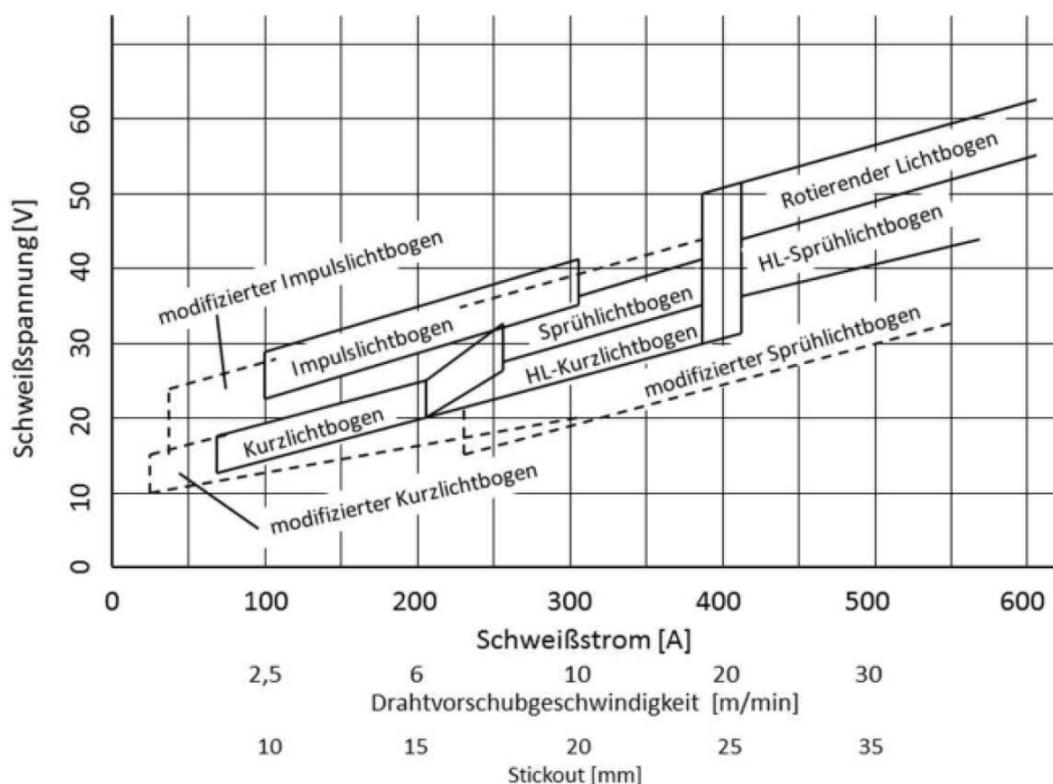


Abbildung 2-4: Lichtbogenarten [31]

Im mittleren Leistungsbereich wird der **Impulslichtbogen** eingesetzt. Ein Grundstrom hält das Elektrodenende und das Schweißbad flüssig, während durch einen überlagerten frequenzgesteuerten Stromimpuls ein kurzschlussfreier Tropfenübergang realisiert wird. Diese Weiterentwicklung der sich normalerweise einstellenden Lichtbogenarten erfordert eine spezielle Stromquelle, welche in der Regel aus einem Gleichrichter (Grundstrom) und einem transistorgeregelten Gleichrichter (Impulsstrom) besteht. So kann eine Spritzerbildung weitgehend vermieden werden. Indem der Stromimpuls in Frequenz und Amplitude gesteuert wird, kann die Größe, die Anzahl und die Viskosität der Tropfen eingestellt werden und es ergibt sich ein universell einsetzbarer Prozess. Besonders für die Verarbeitung

von hochlegierten Stählen, Aluminium oder Kupfer spielt der Impulslichtbogen eine wichtige Rolle. [20] [21] [25]

Im oberen Leistungsbereich bildet sich bei einem Mischgas aus Argon und Kohlenstoffdioxid (CO₂) der **Sprühlichtbogen** aus. Dieser zeichnet sich durch einen feintropfigen Werkstoffübergang ohne Kurzschlüsse aus. Aufgrund der hohen Leistungen ist das Schmelzbad dünnflüssig und es können große Blechdicken geschweißt werden, jedoch nur in Wannennlage. Wird nur CO₂ als Schutzgas verwendet, entsteht der **Langlichtbogen**, bei dem sich kurzschlussbehaftet gröbere Tropfen bilden und eine starke Spritzerbildung vorliegt. [20] [4] [25]

Im sehr hohen Leistungsbereich entsteht der **rotierende Lichtbogen**, dessen Werkstoffübergang aufgrund der hohen Drahtvorschubgeschwindigkeit und der großen Abschmelzleistung nicht mehr in Tropfenform, sondern schlauchförmig erfolgt. [20] [21] [25] Durch die radiale Kraftkomponente des elektrischen Feldes wird die flüssige Elektrode beim Übergang rotierend ausgelenkt [32].

Auf Basis der vorgestellten Lichtbogenarten ist der MSG-Prozess sehr variabel und für große Blechdickenbereiche und unterschiedlichste Werkstoffe geeignet [24]. Infolge der Funktionsweise des MSG-Verfahrens mit abbrennender Elektrode und daher, auch im Handbetrieb, immer mechanisiertem Drahtvorschub eignen sich MSG-Prozesse sehr gut für die Automatisierung [33]. Dadurch kann eine hohe Produktivität bei einfacher Gerätetechnik, welche sich durch geringe Investitionen und unkomplizierte Handhabung auszeichnet, erzielt werden [21]. Folgend soll der Begriff Produktivität die Eignung eines Verfahrens, geforderte Schweißnähte möglichst schnell herstellen zu können, beschreiben. In der Literatur wird oft die Abschmelzleistung, laut *Suban und Tusek* [34] wichtigster Einflussparameter, zur Charakterisierung der Produktivität genutzt, sodass diese Begriffe in der Arbeit vereinfachend synonym verwendet werden.

Nachteilig bei MSG-Prozessen ist allerdings die erhöhte Anfälligkeit gegenüber Poren und Bindefehlern. Auch kann nur eine geringere Nahtqualität erzielt werden. Aus der Funktionsweise ergibt sich eine weitere kritische Eigenschaft. Verfahrensbedingt sind die Wärme- und Zusatzstoffzufuhr gekoppelt. Aufgrund der thermischen Belastbarkeit von Elektrode und Grundwerkstoff kann die Abschmelzleistung nicht beliebig erhöht werden. [21] In den folgenden Kapiteln 2.3 und 2.4 werden Verfahren vorgestellt, die eine weitere Produktivitätssteigerung bei z.T. geringerer thermischer Belastung ermöglichen.

2.3 MSG-Mehrdrahtschweißen

Neben der limitierten thermischen Belastbarkeit der Elektrode [21] wird die Produktivität von MSG-Einzeldrahtprozessen bei hohen Schweißgeschwindigkeiten durch eine erhöhte Anfälligkeit für Porosität, Bindefehler und Einbrandkerben begrenzt [35]. Durch den Einsatz von MSG-Verfahrensvarianten mit mehreren lichtbogenführenden Drahtelektroden kann, wie in diesem Abschnitt beschrieben wird, diesen Problemen entgegengewirkt werden. Erst das Aufkommen

mikroprozessorgesteuerter Inverterstromquellen ermöglicht bestehende Leistungsbegrenzungen zu überschreiten und Mehrdrahtprozesse nutzbar zu gestalten [35] [14]. Dabei haben sich zwei Varianten herausgebildet: das Doppeldrahtschweißen und das Tandemschweißen.

2.3.1 Doppeldrahtschweißen

Das MSG-Doppeldrahtverfahren ist ein Lichtbogenschweißverfahren mit zwei abschmelzenden Drahtelektroden mit individuellen Drahtvorschubgeräten. Die Schutzgasabdeckung wird durch eine gemeinsame Gasdüse gewährleistet und schützt ein einzelnes Schmelzbad, in dem sich die Elektrodenachsen treffen. Beide Drahtelektroden werden durch eine SKD durch dieselbe Stromquelle mit Potenzial beaufschlagt. In Abbildung 2-5 ist der komplette Aufbau dargestellt. Die nicht beschrifteten Komponenten sind analog zu Abbildung 2-3 zu betrachten. [21] [36]

Aufgrund des Einsatzes einer einzelnen Stromquelle brennen beide Lichtbögen mit der gleichen Schweißleistung ab. Vorzugsweise wird im Prozess ein Sprühlichtbogen eingesetzt. Das Verfahren kann mit einer konventionellen Stromquelle betrieben werden, sodass der Investitionsaufwand gering ist. Allerdings ist damit die verfügbare Leistung auf die Kapazitäten einer Quelle begrenzt. [21]

Bedingt durch die zwei Drahtelektroden kann die Abschmelzleistung gegenüber konventionellen MSG-Prozessen gesteigert und bei großen Blechstärken eine Reduzierung der Lagenanzahl erreicht werden [37] [38]. Dementsprechend ist eine Produktivitätssteigerung nicht mehr durch den Prozess, sondern die Anlagentechnik begrenzt. Eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit wird zum einen durch einen konstanten Energieeintrag [37] [39] bei höheren Abschmelzleistungen und zum anderen durch eine Vergrößerung des Schmelzbades [14] ermöglicht.

Einbrandkerben, resultierend aus zu hohem Lichtbogendruck, werden reduziert, da der Lichtbogendruck auf eine größere Fläche des Schmelzbades verteilt wird [40]. Die größere Ausprägung des Schmelzbades ermöglicht eine längere Kontaktzeit zwischen Schmelze und Nahtflanken, sodass letztere ohne Bindefehler aufgeschmolzen werden [35].

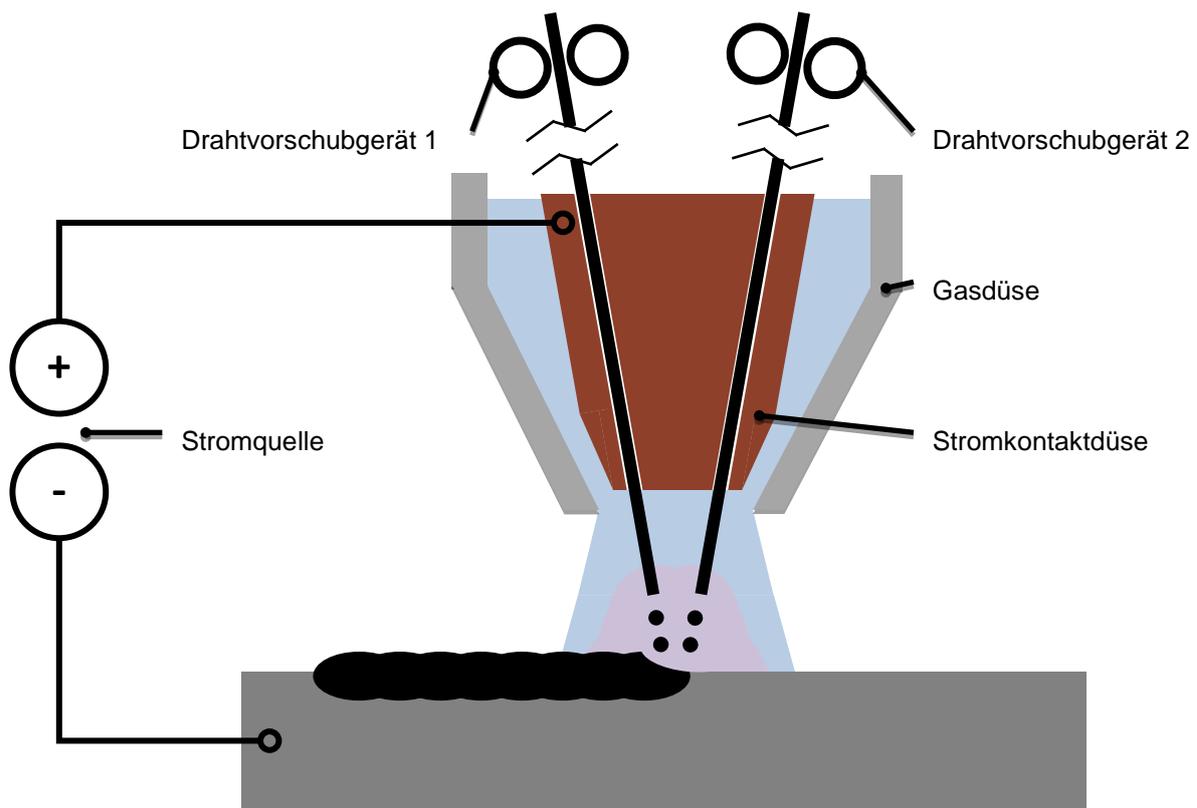


Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip des MSG-Doppeldrahtschweißens nach [21]

Aufgrund der längeren Abkühlzeit, welche durch ein größeres Schmelzbad bedingt wird, kann eine bessere Entgasung des Bads erreicht und die Sensitivität für Porenbildung reduziert werden [35]. Trotz des größeren Schmelzbades ist der Schutzgasverbrauch aufgrund der kombinierten Gasdüse geringer als bei Standard MSG-Prozessen mit vergleichbarer Produktivität [14].

Das Einbrandverhalten verschlechtert sich gegenüber dem Standard MSG-Verfahren, da die in Nahtrichtung hintere Elektrode mit dem flüssigen Schmelzbad und nicht dem festen Werkstück in Kontakt tritt. Der Energieeintrag in die Nahtwurzel und damit der Anteil am Einbrand ist daher für die zweite Elektrode gering [5]. Durch verschiedene Einstellmöglichkeiten kann diesem Effekt entgegengewirkt und das Prozessverhalten angepasst werden. So ermöglichen separate Drahtvorschübe individuelle Vorschubgeschwindigkeiten sowie unterschiedliche chemische Zusammensetzungen der Einzeldrähte.

Auf das Einbrand- und Benetzungsverhalten nimmt außerdem der Winkel zwischen den Elektroden Einfluss. Ein großer Winkel zwischen den Elektroden erhöht den Einbrand in der Nahtmitte und sorgt für einen gleichmäßigeren Einbrand [4]. Generell ist eine symmetrische Winkelanordnung zu bevorzugen, sollte jedoch anwendungsspezifisch angepasst werden [41]. Üblicherweise werden die Elektroden in Schweißrichtung hintereinander positioniert. Eine Orientierung nebeneinander, senkrecht zur Schweißrichtung, wird ebenso genutzt [39] [21]. Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens bei variierender Anordnung [42] ist das Doppeldrahtschweißen als richtungsabhängig zu bezeichnen.

Infolge der Polung der beiden Elektroden bzw. der Lichtbögen ziehen sich diese an oder stoßen sich ab [43] [39]. Bei der Anordnung der Elektroden ist dementsprechend die magnetische Blaswirkung [25] zu beachten, welche die Prozessstabilität verringert. Bei großer Lichtbogenlänge ist die Blaswirkung stärker als bei kurzer Länge, sodass die Einstellung der Lichtbogenart durch die Lichtbogenlänge stärker eingeschränkt ist als beim Standard MSG-Verfahren. Weiterhin beeinflusst die Lichtbogenlänge beim Doppeldrahtschweißen Nahteigenschaften wie Nahtbreite und Nahthöhe. [14]

Das Doppeldrahtschweißen kann zur Steigerung der Produktivität [39] und Senkung der Kosten [44] als Alternative zum Standard MSG-Prozess eingesetzt werden. Allerdings hat es sich aufgrund des begrenzten Prozessfensters nicht durchgesetzt [37] [44]. Zusammenfassend sind in Tabelle 2-1 die Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgeführt.

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile des MSG-Doppeldrahtschweißens [21] [25] [37] [4]

Vorteile	Nachteile
Geringe Investitionskosten durch Nutzung herkömmlicher Stromquelle	Beschränktes Prozessfenster durch Leistungsbegrenzung
Verbesserung Nahtgüte gegenüber Standard MSG	Magnetische Blaswirkung
Höhere Abschmelzleistung bei gleichem Energieeintrag gegenüber Standard MSG	Keine Richtungsunabhängigkeit

2.3.2 Tandemschweißen

Auch das MSG-Tandemverfahren nutzt zwei abschmelzende Drahtelektroden mit individuellen Drahtvorschubgeräten. Das gemeinsame Schmelzbad wird durch eine Gasdüse mit Schutzgas abgedeckt. Abweichend zum Doppeldrahtverfahren werden die beiden Elektroden durch separate SKD kontaktiert. Diese sind isoliert zueinander und werden durch jeweils eine Stromquelle angesteuert (s. Abbildung 2-6). [21]

Aufgrund des ähnlichen Prozessaufbaus unterscheiden sich die Prozesseigenschaften des Tandemschweißens nur geringfügig vom Doppeldrahtschweißen. Die Ausbildung des Schmelzbades und die daraus resultierenden Effekte auf die Nahtgüte [35] [14] laufen ebenso analog ab wie die magnetische Blaswirkung zwischen den beiden Lichtbögen [39] [43]. Auch die Anordnung der Elektroden zur Schweißnaht und der Zufuhrwinkel wirken sich vergleichbar auf den Prozess aus und führen zu einer Richtungsabhängigkeit des Verfahrens [4] [42].

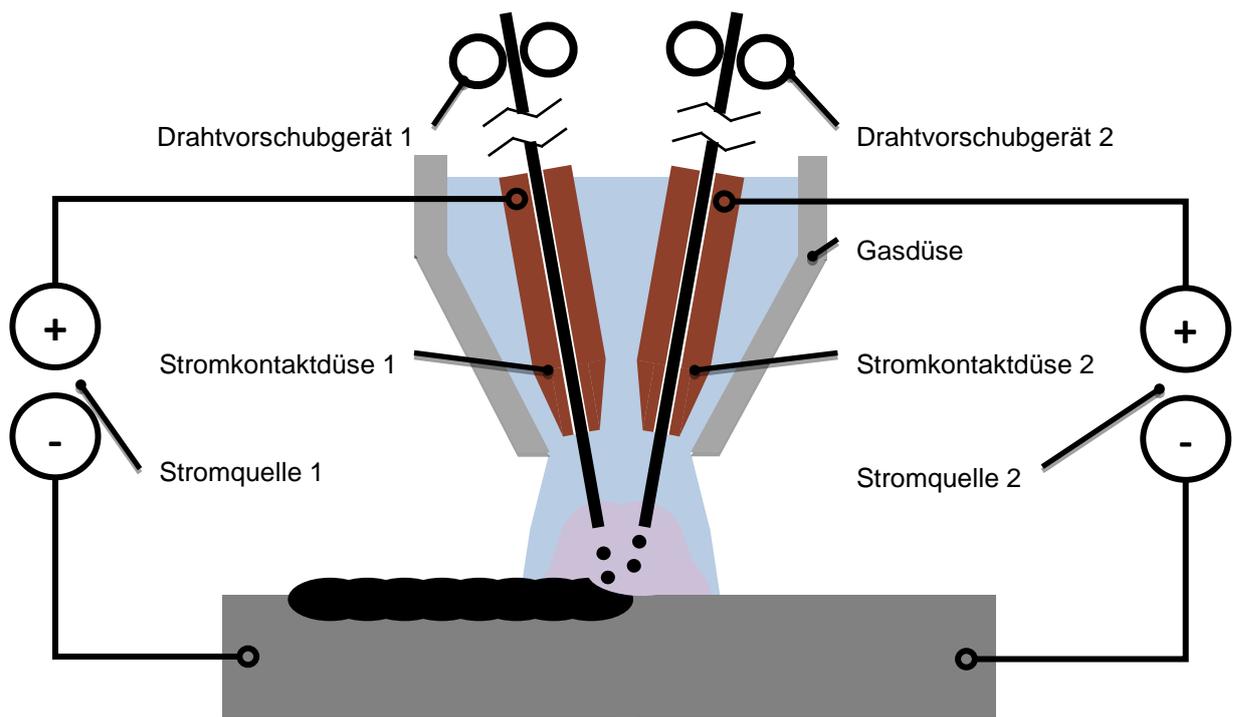


Abbildung 2-6: Verfahrensprinzip MSG-Tandemschweißens nach [21]

Abweichend ist jedoch die Wärmeinbringung zu charakterisieren. Resultierend aus dem Einsatz von separaten Stromquellen kann mehr Energie in den Prozessbereich eingebracht werden, was zu einer schlechteren mechanischen Eigenschaft der Naht durch Grobkornbildung zur Folge hat [5]. Zum anderen können die resultierende Abschmelzleistung und die Drahtvorschubgeschwindigkeit erhöht werden [45].

Des Weiteren ergibt sich eine erhöhte Komplexität, sowohl anlagenseitig als auch steuerungsseitig, durch viele einstellbare Parameter (z.B. Drahtvorschub, Positionierung oder Lichtbogenart) [5] [4]. Üblicherweise wird die vordere Elektrode mit höherer Leistung betrieben, um einen ausreichenden Einbrand zu ermöglichen und die zweite Elektrode füllt die Schweißfuge [21]. Dieser Leistungsunterschied kann auch genutzt werden, um unterschiedliche Lichtbogenarten an beiden Elektroden umzusetzen. Werden zwei Impulslichtbögen eingesetzt, kann die Interaktion der beiden Lichtbögen durch synchrones oder asynchrones Pulsen gesteuert und so der Prozess stabilisiert werden [41] [46].

Aufgrund des erweiterten Prozessfensters wird das Tandemschweißen bei Verbindungsschweißungen mit hohen Anforderungen an die Produktivität eingesetzt. Bevorzugt wird es für Stumpfschweißnähte verwendet [47]. Außerdem kann das verzugsarme Schweißen von dünnen Blechen durch die hohen möglichen Schweißgeschwindigkeiten realisiert werden [35]. Zusammenfassend sind in Tabelle 2-2 die Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgeführt.

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile des MSG-Tandemschweißens [21] [38] [41]

Vorteile	Nachteile
Großer Anwendungsbereich durch viele Einstellmöglichkeiten	Hoher Anlagen und Steuerungsaufwand
Hohe Produktivität und geringere Lagenanzahl	Schlechte Nahtgüte bei hohem Wärmeeintrag
Hohe Prozessstabilität bei Impulssteuerung	Keine Richtungsunabhängigkeit

2.4 MSG-Zusatzdrahtschweißen

Um eine Steigerung der Produktivität bei gleichzeitig geringerem Energieeintrag über die Grenzen der lichtbogenbehafteten Mehrdrahtprozesse hinaus zu ermöglichen, wurden Verfahren mit dem Einsatz eines lichtbogenlosen Zusatzdrahtes entwickelt. [36] [48] [49] Ausgangspunkt ist dafür die Steuerung des Wärmeeintrages durch den Zusatzdraht. Da der Zusatzdraht nicht mit einem Lichtbogen abbrennt, wird er durch die Energie der lichtbogenführenden Elektrode abgeschmolzen und der resultierende Energieeintrag ins Bauteil wird geringer. Der Energiebedarf zum Aufschmelzen und damit die Abkühlung des Schmelzbades kann durch die Menge an Zusatzdraht gesteuert werden. So können Wärme- und Materialeintrag entkoppelt werden [6]. Der lichtbogenlose Zusatzdraht kann entweder unter Raumtemperatur als Kaltdraht oder vorgewärmt als Heißdraht dem Schmelzbad zugeführt werden [33].

2.4.1 Kaltdrahtschweißen

Wird ein Standard MSG-Prozess um einen lichtbogenlosen Zusatzdraht ohne Vorwärmung ergänzt, spricht man vom Kaltdrahtschweißen. In der Regel steht dabei die Drahtelektrode senkrecht zum Werkstück und der Zusatzdraht wird unter einem Zufuhrwinkel stechend oder schleppend in das Schmelzbad geführt. Ein separates Vorschubgerät betreibt den Draht unabhängig von der Elektrode. Die Schutzgasabdeckung wird ausschließlich durch den MSG-Brenner gewährleistet und auch elektrisch ist nur die Elektrode an eine Stromquelle angeschlossen. Der Zusatzdraht wird im Lichtbogen des MSG-Brenners aufgeschmolzen (s. Abbildung 2-7). [50]

Da neben dem herkömmlichen MSG-Brenner nur ein weiterer Drahtförderer benötigt wird, ist der anlagenseitige Aufwand begrenzt. Die Anstellung des Zusatzdrahtes (Winkel zum MSG-Brenner) beeinflusst wie bei der Mehrdrahttechnik ebenso das Prozessverhalten [51]. Im Kontrast zu den bisher vorgestellten Prozessen kann es auftreten, dass der Lichtbogen nicht zwischen Elektrode und Werkstück, sondern zwischen Elektrode und Zusatzdraht brennt, welcher in Kontakt mit dem Grundwerkstück steht. Mit steigender Kaltdrahtzufuhr liegt dieser Zustand mit größerer Wahrscheinlichkeit vor. Besonders im Bezug zur eingestellten Lichtbogenart ist dieses Verhalten kritisch. Beim Kurzlichtbogen sorgt der variierende Abstand zwischen Elektrode und Werkstück bzw. Elektrode und Zusatzdraht zu einer erhöhten Spritzerbildung und niedrigerer Prozessstabilität. Bei höher energetischen Lichtbogen ist eine Integration des Kaltdrahtes einfacher, bis eine zu große Steigerung des Kaltdrahtvorschubes für Spritzer sorgt. [48]

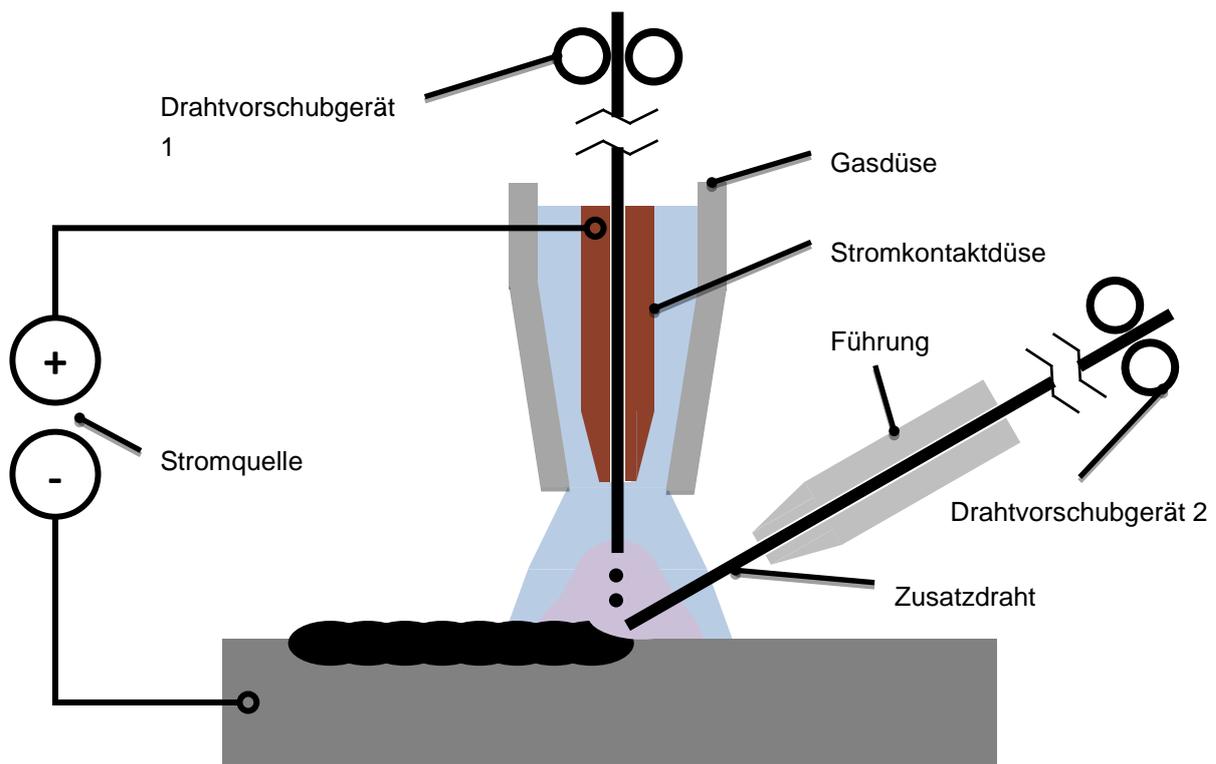


Abbildung 2-7: Verfahrensprinzip des MSG-Kaltdrahtschweißens nach [50]

Für den Zusatzdrahtprozess ergibt sich eine erhöhte Energieeffizienz, da Verluste aus Strahlung und Konvektion, welche beim Lichtbogenschweißen anfallen vom Zusatzdraht absorbiert und ins Schmelzbad zurückgeleitet werden können. [48] Da das Aufschmelzen des Zusatzdrahtes durch die Energie des Schmelzbades erfolgt, zeichnet sich der Prozess trotzdem durch ein kälteres Schmelzbad aus [50]. Die resultierende Erhöhung der Viskosität und Oberflächenspannung der Schmelze [52] ermöglicht auch das Arbeiten in Zwangslagen [50].

Außerdem sorgt die geringere Wärmeintragung für geringere Verformungen, geringere Eigenspannungen [6] [52], gesteigerte Ermüdungsfestigkeit [7] und eine bessere Nahtqualität [50] durch geringere Porosität [52] und einem kleineren Einfluss auf die metallurgischen Eigenschaften der Wärmeeinflusszone (WEZ) [6]. Eine weitere Folge ist eine, im Vergleich zum MSG-Schweißen, schmalere WEZ [48].

Allerdings ist die Produktivitätssteigerung durch die Abkühlung des Schmelzbades begrenzt. Zum einen stellt der Zusatzdraht eine Wärmesenke dar, sodass die Energie des Lichtbogens im Aufschmelzen des Zusatzmaterials umgesetzt wird. Trotz leicht erhöhtem Schweißstrom gegenüber dem MSG-Schweißen ist der Einbrand [50] und die Aufschmelzung des Grundwerkstoffes [48] sowie die Durchmischung von Grund- und Zusatzwerkstoff [53] beim Kaltdrahtschweißen gering. Zum anderen ist durch die erhöhte Viskosität das Benetzungsverhalten schlechter [52]. Negativen Einfluss auf das Schweißergebnis kann darüber hinaus die Aufhärtung der Schweißnaht haben, welche aus der höheren Abkühlungsrate des Schmelzbades resultiert [7].

Aufgrund der niedrigen Aufschmelzung des Grundwerkstoffes sowie der Möglichkeit unterschiedliche Materialien für besonders verschleißfeste Schichten mischen zu können, ist das MSG-Schweißen mit lichtbogenlosem Zusatzdraht für das

Verbindungsschweißen schlecht und für das Auftragsschweißen von Verschleißschuttschichten gut geeignet [9]. Für das Schweißen von hochlegierten Schutzschichten ist vor allem die Möglichkeit einer in-situ Legierungsbildung aus unlegierter Elektrode und hochlegiertem Zusatzdraht interessant [53]. Zusammenfassend sind in Tabelle 2-3 die Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgeführt.

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile des Kaltdrahtschweißens [50] [52] [7] [9]

Vorteile	Nachteile
Keine magnetische Blaswirkung	Aufhärtung des Schweißgutes durch hohe Abkühlungsrate
Geringe Eigenspannung durch niedrige Wärmeintragung	Produktivitätssteigerung durch Schmelzbadabkühlung begrenzt
In-situ Legierungsbildung	Schlechtes Einbrandverhalten

2.4.2 Heißdrahtschweißen mit konventioneller Drahtvorwärmung

Verfahrenskonzept und -aufbau

Eine Möglichkeit das zulässige Prozessfenster des Schweißens mit lichtbogenlosem Zusatzdraht zu erweitern und die Vorteile des Kaltdrahtschweißens beizubehalten, bietet das konventionelle Heißdrahtschweißen. Das Prinzip der eingesetzten Drahtvorwärmung geht auf *Manz* [54] zurück, der zwei Einsatzfelder identifizierte. Zum einen wurde das Prinzip zum Schweißen ohne Lichtbogen und zum anderen zum Erwärmen des Zusatzdrahtes beim WIG-Schweißen eingesetzt. Dabei wird der Draht durch eine eigene, separate Stromquelle mit einer Potentialdifferenz zwischen Werkstück und Zusatzdraht beschaltet. Die Spannung ist dabei so gering, dass kein Lichtbogen entsteht. Über den Zusatzdraht fließt ein Strom zum Werkstück und die resultierende Stromwärme erwärmt den Draht [55]. Diese Energie wird in jedem stromdurchflossenen Leiter aufgrund des Widerstandes des Leiters induziert und durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung abgeführt. Experimentell wurde gezeigt, dass die Stromwärme proportional zum Quadrat der Stromstärke I_{HD} und dem Widerstand R_{HD} des Leiters ist. Der Widerstand des Drahtes ergibt sich aus dem materialspezifischen elektrischen Widerstand ρ_R , der Vorwärmstrecke l_{HD} und dem Drahtquerschnitt A_D . [56]

$$P_{HD} = R_{HD} * I_{HD}^2 \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$R_{HD} = \frac{\rho_R * l_{HD}}{A_D} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Ursprünglich erfolgte der Einsatz bei Verfahren mit nicht abschmelzender Elektrode [54] [57] und wurde durch *Arita et al.* [58] in Prozesse mit abschmelzender Elektrode integriert. Die fortsetzende Entwicklung vom Tandemschweißprozess [58] zum Eielektrodenprozess mit Zusatzdraht geschah durch *Günther et al.* [59] und *Guest* [60].

In Abbildung 2-8 wird das Verfahren mit zwei Drähten dargestellt. Senkrecht über dem Werkstück befindet sich ein konventioneller Brenner mit Gasdüse und unter

einem Zufuhrwinkel wird der Zusatzdraht ins Schmelzbad geführt. Der Zusatzdraht kann dabei mit oder wie abgebildet ohne eigene Gasabdeckung betrieben werden. Neben der Schweißstromquelle wird eine weitere Stromquelle zum Vorwärmen zwischen Werkstück und Kontaktdüse des Heißdrahtes geschaltet. [36] [53]

Prozesseigenschaften

Im Folgenden werden die Eigenschaften des konventionellen Heißdrahtprozesses beleuchtet. Dabei wird das thermische Verhalten, die geometrischen und elektrischen Verstellmöglichkeiten, die magnetische Blaswirkung und die daraus resultierenden Effekte erörtert.

Durch den konventionellen Heißdrahtprozess kann die Abschmelzleistung und die Schweißgeschwindigkeit über die Grenzen des Kaltdrahtprozesses hinweg gesteigert werden [53]. Infolge der **geringeren Abkühlung** des Schmelzbades durch den vorgewärmten Draht treten die negativen Effekte eines zu kalten Schmelzbades (s. Kapitel 2.4.1) erst bei höheren Zusatzdrahtvorschüben auf. Daraus ergibt sich, dass beim Einsatz in Verbindungsschweißungen die Lagenanzahl reduziert werden kann [61]. Jedoch besteht besonders für das Verbindungsschweißen weiterhin ein nachteiliger Einfluss auf das Einbrand- und Benetzungsverhalten. Da, wie beim Kaltdrahtschweißen, nicht die gesamte Lichtbogenenergie für die Ausbildung des Einbrands zur Verfügung steht, reduziert sich dieser im Vergleich zum konventionellen MSG-Verfahren, jedoch weniger stark als beim Kaltdrahtschweißen. [53]

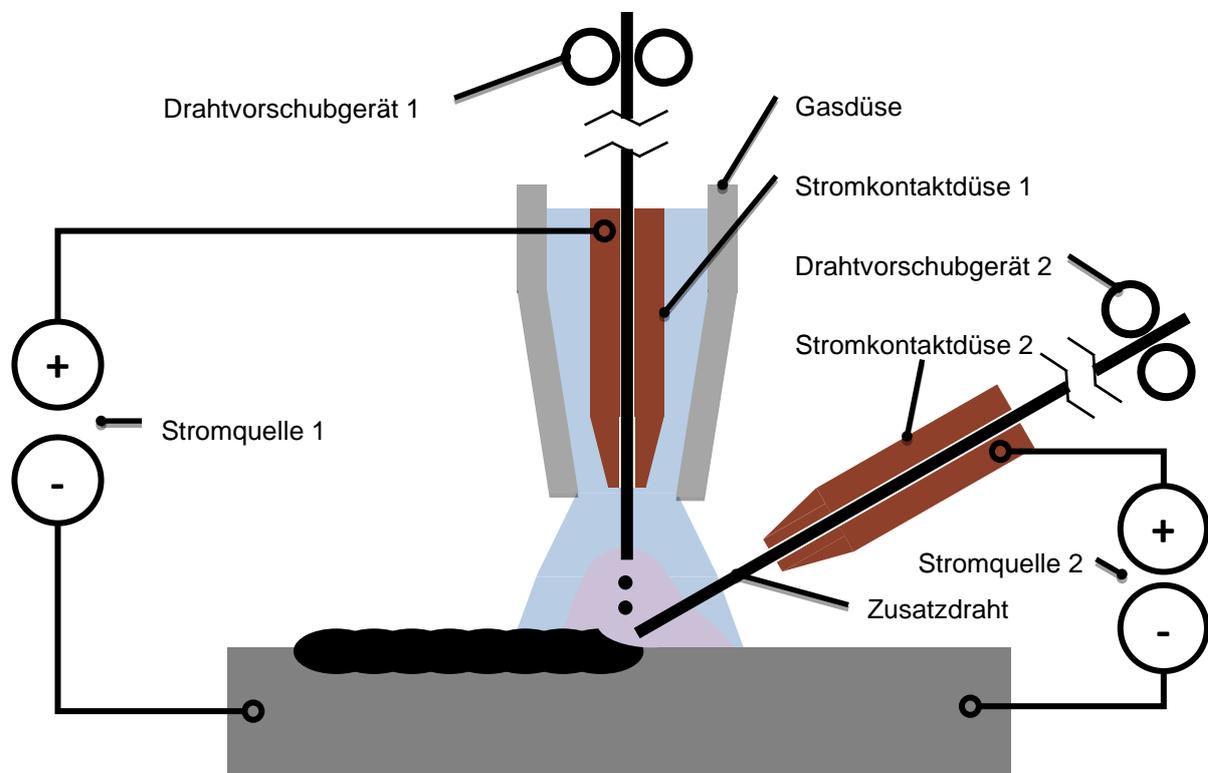


Abbildung 2-8: Verfahrensprinzip des konventionellen MSG-Heißdrahtprozesses nach [10]

Alternativ zur Steigerung der Produktivität kann bei gleichbleibender Abschmelzleistung die Lichtbogenleistung und damit die **thermische Belastung** des

Grundwerkstoffes reduziert werden. Daraus ergibt sich ein positiver Einfluss auf die Gefügeausbildung durch Kornfeinung und heterogene Keimbildung. [49] Außerdem verhindert der geringere Wärmeeintrag ein Absinken von Streck- und Zuggrenze im Schmelzbereich [61] sowie den Abbrand von Legierungselementen bei hochlegierten Stählen [10]. Durch den vorgewärmten Zusatzdraht kann auch bei niedriger Wärmebelastung eine gute Durchmischung, welche für die Korrosionsbeständigkeit, die Vermeidung von Heißrissen und die mechanische Festigkeit entscheidend ist, erzielt werden. In der Folge wird die Legierungsbildung im Schmelzbad anwendbarer als beim Kaltdrahtschweißen, da die Schmelzbadströmung eine gleichmäßige Verteilung garantiert. [53]

Die aufgezeigten Eigenschaften des konventionellen Heißdrahtschweißens lassen sich **geometrisch** und durch **Einstellungen der Stromquelle** bzw. des Drahtförderers beeinflussen. Aus Gl. 2-1 und Gl. 2-2 ergibt sich, dass eine Steigerung des Heißdrahtstromes, der Vorwärmstrecke zwischen SKD und Werkstück oder eine Reduktion des Drahtvorschubs und der Drahtquerschnittsfläche den Wärmeeintrag in den Heißdraht und damit das Schmelzbad unabhängig von den MSG-Parametern erhöht. Mittels Einstellung dieser Parameter wird der Draht knapp unter seine Schmelztemperatur erwärmt, sodass die benötigte Restwärme, die durch den Lichtbogen bereitgestellt werden muss, möglichst gering ist [49]. Für hochlegierte Stähle und Nichteisenmetalle (NE-Metalle) kann dies bereits in der Vorwärmphase zur Oxidation führen. Eine integrierte Gasspülung in der Vorwärmeinheit ist dann erforderlich. Andernfalls bildet sich eine gegenüber der SKD isolierende Oxidschicht. [36] Eine Steigerung der Vorwärmenergie des Heißdrahtes erhöht den Einbrand sowie den Grad der Aufschmelzung.

Keinen wesentlichen Einfluss hat dahingegen der **Anstellwinkel** des Heißdrahtes zum MSG-Brenner auf den Einbrand, die Durchmischung und die Nahtgeometrie. Eine steile Anstellung erhöht die Zugänglichkeit für Wartung und schmale Schweißstellen und senkt die Prozessstabilität, da der Draht länger im Lichtbogen verweilt und zu stark aufgeschmolzen wird. [53] Um die Erwärmung des Heißdrahts aufrecht zu erhalten, muss er dauerhaft im Kontakt zum Schmelzbad stehen, da sonst kein Strom fließt [54]. Schmilzt der Draht ab, bevor er das Schmelzbad erreicht, wird die Vorwärmung unterbrochen und ein inkonsistenter Wärmeeintrag stört die Stabilität. Für die Richtungsunabhängigkeit hat der Anstellwinkel des Verfahrens große Relevanz. In der Literatur liegen keine Untersuchungen zum MSG-Verfahren mit konventionellem Heißdraht vor, jedoch wurde der Effekt beim WIG-Heißdrahtschweißen betrachtet. *Wu et al.* [62] konnten nachweisen, dass bei steileren Winkeln eine Richtungsunabhängigkeit des Prozesses möglich ist. Aufgrund von Einschränkungen im Aufbau bei sehr steilen Winkeln konnte bei 70° kein stabiler Prozess mehr eingestellt werden. Um Kollision mit dem Heißdraht zu vermeiden, wurde der WIG-Brenner geneigt, was einen seitlichen Druck auf das Schmelzbad erzeugt. [62]

Weiterhin ist für das Prozessverhalten und die Richtungsunabhängigkeit die Positionierung vom Zusatzdraht zur Lichtbogenachse im Schmelzbad relevant. Der laterale **Versatz** zwischen Achse und Zusatzdraht sollte möglichst gering sein, da trotz stärkerer Schmelzbadströmungen und damit, gegenüber dem

Kaltdrahtschweißen geringerer Sensitivität, die Vermischung zwischen Elektrodendraht und Zusatzdraht bei steigendem Abstand schlechter wird. [53]

Im Gegensatz zum Kaltdrahtschweißen wird die Prozessstabilität bei konventionellen Heißdrahtprozessen durch die **magnetische Blaswirkung** gestört. Aufgrund der Lorentzkraft, die auf bewegte Ladungen wirkt, wird der Lichtbogen durch das induzierte Magnetfeld am Zusatzdraht ausgelenkt. Abhängig von der Polung von Elektrode und Zusatzdraht erfolgt die Auslenkung zum Heißdraht (gleiche Polung) oder entgegen dem Heißdraht (unterschiedliche Polung) (s. Abbildung 2-9). Eine gleichartige Polung führt zu einer gesteigerten Wärmeeinbringung in den Heißdraht und daraus resultieren vorübergehende Kontaktverluste zwischen Schmelze und Zusatzdraht. Die verringerte Prozessstabilität muss durch erhöhten Drahtvorschub kompensiert werden. Im Gegensatz dazu sorgt eine gegensätzliche Polung für eine signifikante Prozessstabilisierung bei marginal geringerer Abschmelzleistung. Um die Stärken der beiden Möglichkeiten, hohe Abschmelzleistung bei hoher Stabilität, zusammenzubringen, kann der Heißdraht mit Wechselstrom erwärmt werden. [53] Auch der Werkstoffübergang wird durch das Magnetfeld des Heißdrahts beeinträchtigt. Bei zunehmendem Heißdrahtstrom nimmt die Tropfengröße und die Kurzschlusshäufigkeit zu. Die Ursache dazu ist noch nicht geklärt. [63] Günther [49] empfiehlt zur Stabilisierung höhere Drahtvorschübe und ein Verhältnis zwischen Schweißstrom und Heißdrahtstrom größer 1,5.

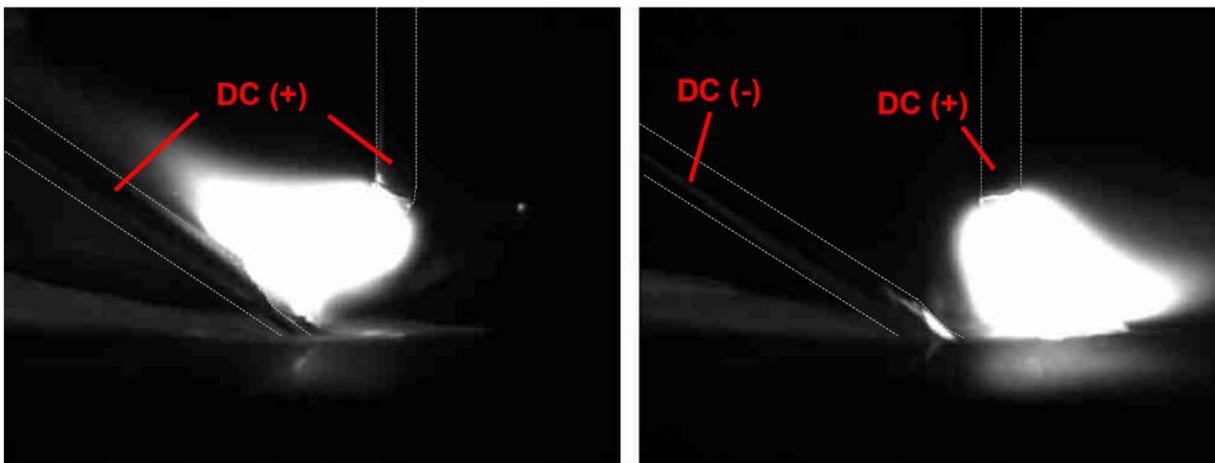


Abbildung 2-9: Einfluss der Polung auf die Auslenkung des Lichtbogens [53]

Anwendung

Der Einsatz von MSG-Heißdrahtverfahren erfolgt aufgrund der niedrigen erreichbaren Aufschmelzraten und der Möglichkeit hochlegiertes Schweißgut zu erzeugen vor allem beim Auftragsschweißen mit hohen Abschmelzleistungen [49] [63] [64]. Im Gegensatz dazu ist das Verfahren für das Verbindungsschweißen infolge des niedrigen Einbrands und somit verringerter mechanischen Festigkeit der Naht nicht geeignet [53]. In Tabelle 2-4 sind die Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgeführt.

Bei der Herstellung von hochlegiertem Schweißgut stellt der Schweißrauch i.d.R. eine Gesundheitsgefährdung dar. Der MSG-Heißdrahtprozess bietet die Möglichkeit die Gefährdung zu senken. Indem Chrom- und Nickelbestandteile der Legierung

ausschließlich über den Heißdraht ins Schmelzbad eingebracht werden, können toxische bzw. karzinogene Bestandteile des Schweißrauches minimiert und die Gesundheitsgefährdung der Rauchemissionen gesenkt werden. Der Schweißrauch entsteht durch die hohe Wärmestromdichte am Lichtbogenansatz der Elektrode, welche weder infolge der Stromwärme noch durch die konvektive Wärmeeinbringung des Lichtbogens im Zusatzdraht erreicht wird. Somit erfolgt der Materialübergang beim Zusatzdraht ohne Metallverdampfung. Kritisch ist bei dieser Anwendung des Heißdrahtprozesses die Spritzerbildung, welche im industriellen Einsatz z.T. nicht vermieden werden kann. Das Material der Elektrode ist zur Vermeidung des gefährdenden Schweißrauches niedrig legiert und hat eine schlechte Korrosionsbeständigkeit, wenn es nicht im Schmelzbad die angestrebte Legierung bildet. [53]

Eine Verbesserung des Prozessverhaltens für das Verbindungs- und Auftragsschweißen kann durch die Kombination von MSG-Heißdrahttechnik mit einer zweidimensionalen Lichtbogensauslenkung erzielt werden. Die Benetzung kann durch senkrechte Auslenkung zur Schweißrichtung und der Einbrand durch Auslenkung längs zur Schweißrichtung verbessert werden. Aufgrund der Montage von zwei Spulenpaaren senkrecht zueinander um die Gasdüse des MSG-Brenners, kann der Lichtbogen in der Ebene frei beeinflusst werden. Durch lineare, kreisförmige, elliptische oder stochastische Verläufe des Lichtbogens kann dessen Wärmeeinbringung gesteuert werden, um die Anforderungen der Anwendung optimal abzubilden. [65] Die hohe Komplexität, anlagenseitig sowie durch die Prozesssteuerung, erschweren eine industrielle Umsetzung.

Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile des konventionellen Heißdrahtschweißens [54] [53] [61]

Vorteile	Nachteile
Große Produktivitätssteigerung durch geringere Badabkühlung	Geringe Prozessstabilität durch erforderlichen Kontakt Draht-Schmelzbad
In-situ Legierungsbildung	Magnetische Blaswirkung
Gute mechanische Eigenschaften der Naht	Kleines Prozessfenster durch untersch. Arten des Werkstoffübergangs

2.4.3 Heißdrahtschweißen mit vorgelagerter Drahtvorwärmung

Verfahrenskonzept und -aufbau

Das Konzept einer vorgelagerten Drahterwärmung geht auf *Stol* [66] zurück, der eine Vorwärmung durch Stromwärme an der Drahtelektrode eines MSG-Brenners einsetzte. Oberhalb der SKD wird eine zweite SKD vorgesehen, wodurch eine Widerstandserwärmung des Drahtes über eine definierte Vorwärmstrecke ermöglicht wird [66].

Spaniol [36] nutzt diese Technik das erste Mal für den Einsatz beim Zusatzdrahtschweißen. In Abbildung 2-10 wird das Prinzip schematisch dargestellt. Der Standard MSG-Brenner wird, wie beim konventionellen Heißdrahtschweißen, durch einen lichtbogenlosen Zusatzdraht ergänzt. Für den Einsatz bei hochlegierten Stählen oder NE-Metallen kann die Vorwärmereinheit um eine Gasspülung ergänzt

werden. Außerdem kann eine Wasserkühlung der Kontaktierungsstellen eine gleichmäßige Vorwärmung ermöglichen, ohne die Vorwärmeinheit so groß zu gestalten, dass steile Anstellwinkel nicht mehr umgesetzt werden können. Zusätzlich wird durch geringen Bauraum eine gute Zugänglichkeit für den mechanisierten Einsatz des Verfahrens gewährleistet. Der Zusatzdraht wird über zwei SKD oberhalb des Schweißbereichs von einem Heizstrom durchflossen, welcher von einer separaten Stromquelle unabhängig vom Schweißstrom geregelt wird. [36]

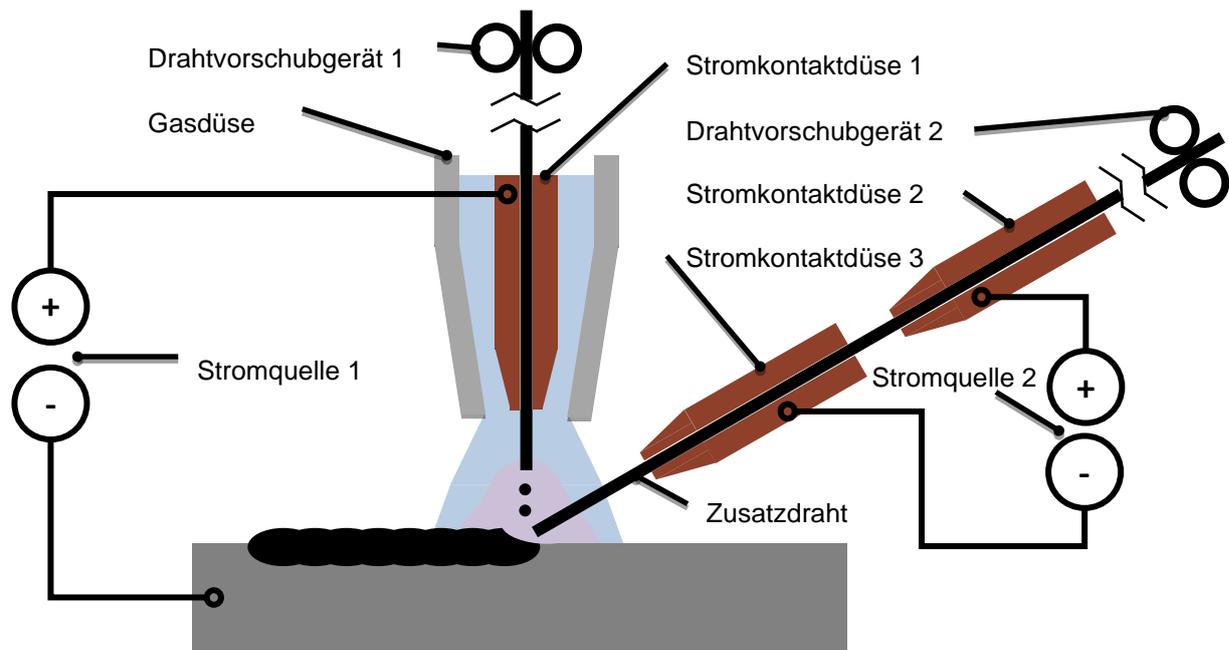


Abbildung 2-10: Verfahrensprinzip des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Drahterwärmung nach [36]

Prozesseigenschaften

Im Folgenden werden die Eigenschaften des Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Erwärmung beleuchtet. Dabei wird das thermische Verhalten, die geometrischen Verstellmöglichkeiten, die Erwärmung ohne Schmelzbadkontakt und die daraus resultierenden Effekte erörtert.

Mit der Verwendung einer zusätzlichen Stromquelle konnte eine **Unabhängigkeit** zwischen Abschmelzrate und Schweißstrom erreicht werden [67]. Der Lichtbogen liefert nur noch ausreichend Energie, um sich selbst aufrecht zu halten, die Oberfläche des Grundwerkstoffes aufzuschmelzen und den, unter die Schmelztemperatur, erwärmten Draht mit dem Schmelzbad zu verbinden [68].

In der Folge verringert sich die **thermische Belastung** durch den Lichtbogen auf das Schmelzbad und den Grundwerkstoff. Damit reduziert sich die Aufschmelzung und der Einbrand. Infolge höherer Schweißgeschwindigkeiten und Abschmelzraten kann die Produktivität gesteigert werden [67]. Weiterhin liegen durch geringeren Abbrand von Legierungselementen, geringere Kohlenstoffkonzentration und einem höheren Ferritanteil bessere mechanische und korrosive Festigkeit in der Schweißraupe vor [68].

Das Prozessverhalten wurde von *Spaniol* [36] untersucht. Neben dem Heißdrahtstrom und dem Drahtquerschnitt kann beim Heißdrahtschweißen mit

vorgelagerter Drahterwärmung die Vorwärmstrecke vergleichsweise unkompliziert variiert werden. Durch geschickte Umsetzung der Vorwärmeinheit kann die Vorwärmstrecke mit einem Teleskopmechanismus zwischen Versuchen kurzfristig verstellt werden. Dadurch lässt sich die **Stromwärme** (s. Gl. 2-1 und Gl. 2-2) besser steuern. Längere Vorwärmstrecken sorgen für den gleichen Effekt wie höhere Ströme, sind jedoch begrenzt, da die Gefahr des Ausknickens eine sinkende Prozessstabilität bedingt. Um die Standzeit zu steigern sind daher kleine Vorwärmstrecken bei hohen Strömen vorzuziehen. [36]

Geometrisch ist ein steiler **Anstellwinkel** zwischen Heißdraht und MSG-Brenner erstrebenswert. Größere Winkel führen zu einer längeren Lichtbogendurchdringungsstrecke und erhöhen so die Wärmeeinbringung in den Zusatzdraht. Das daraus resultierende frühere Abschmelzen des Zusatzdrahtes führt zu einem flacheren Schmelzbad, einem Anstieg der Lichtbogenlänge und somit einer Absenkung des Schweißstromes. Dies hat geringen Einfluss auf die Nahtausbildung, erhöht jedoch die Prozessstabilität und die Verbindungsqualität. Ein geringer MSG-Strom senkt außerdem den Lichtbogenstrom. Aus diesem Grund liegt ein gleichmäßigeres Schmelzbad vor, in das der Zusatzdraht länger eintauchen kann und stärker erwärmt wird. [36] Einen weiteren Vorteil des steilen Anstellwinkels bietet die potenzielle Richtungsunabhängigkeit des Verfahrens. Aufgrund der Neuheit des Verfahrens müssen Analysen zum WIG-Heißdrahtverfahren mit vorgelagerter Erwärmung als Referenz genutzt werden. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass, wie beim konventionellen Heißdraht, bei steilen Winkeln geringere Schwankungen von Nahtbreite und -höhe auftreten. Durch die Verwendung einer gemeinsamen Gasdüse konnte auch der Einsatz bei 70° mit orthogonalem WIG-Brenner ohne Prozessfehler umgesetzt werden. [69] Die Absenkung des Schweißstromes kann auch durch eine Vergrößerung der Lichtbogenlänge infolge einer Erhöhung des Kontaktrahabstandes erreicht werden. Allerdings verringert sich bei größerem Kontaktrahabstand der Wärmeeintrag des Heißdrahtes ins Schmelzbad und die Schmelzbadtemperatur sinkt ab. Als Resultat können Bindefehler entstehen. Auch der Abstand der Drähte auf der Werkstoffoberfläche kann zu Schweißfehlern führen. [36]

Grundsätzlich ist das Heißdrahtverfahren mit vorgelagerter Erwärmung aufgrund der Erwärmung ohne Schmelzbadkontakt toleranter gegenüber variierendem **Versatz** zwischen Heißdraht und Elektrode als Heißdrahtverfahren mit konventioneller Erwärmung. Allerdings führt ein zu hoher Abstand zum Aufsetzen des Heißdrahtes außerhalb der Schmelze und somit zu einer diskontinuierlichen Drahtförderung. Zu geringer oder sogar negativer Versatz kann ein Auftreffen des abgeschmolzenen Materials der Drahtelektrode auf den Zusatzdraht bedingen. In der Folge wird der Materialübergang gestört und das Aufschmelzen des Zusatzdrahtes erfolgt ungleichmäßig. [36]

Den Ausgangspunkt einer hohen Prozessstabilität stellt die **Entbehrlichkeit des Drahtkontaktes zum Schmelzbad** dar. Schwankungen in der Zuführung des Drahtes oder im Werkstoffübergang können ohne Unterbrechung der Vorwärmung kompensiert werden. [36] Allerdings führt die Vorwärmung innerhalb der Drahtzuführung bei zu hohen Drahttemperaturen zum Anhaften des Drahtes an der

unteren SKD [69]. Im Vergleich zur konventionellen Erwärmung steigt der Wartungsaufwand und die Standzeit der Anlage sinkt. Weiterhin zeichnet sich das Heißdrahtschweißen mit vorgelagerter Drahtvorwärmung gegenüber der konventionellen Vorwärmung durch eine geringere Blaswirkung aus, da der Draht im Schmelzbereich potenzial- und stromfrei ist [70]. In Tabelle 2-5 sind die Vor- und Nachteile des Verfahrens aufgeführt.

Tabelle 2-5: Vor- und Nachteile des Heißdrahtschweißens mit vorgelagerter Drahtvorwärmung [36] [68]

Vorteile	Nachteile
Hohe Prozessstabilität durch kontaktfreie Vorwärmung	Probleme bei der Standzeit
Gute mechanische Nahteigenschaften	Hoher Investitionsaufwand
Keine magnetische Blaswirkung	Hoher Regelungsaufwand

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz einer vorgelagerten Drahtvorwärmung in einem Zusatzdraht-MSG-Verfahren die Möglichkeit bietet, den Material- und Energieeintrag in großen Bereichen zu entkoppeln. Vor allem für das Auftragsschweißen, Verbindungsschweißen und den Einsatz in der additiven Fertigung stellen sich die Prozesseigenschaften, unter anderem durch das zum konventionellen Heißdrahtprozess erweiterte Prozessfenster, vorteilhaft dar. Für die Bewertung des Verfahrens ist festzuhalten, dass

- keine vollständigen Untersuchungen zu den Grenzen des Prozessfensters bezüglich der möglichen Zusatzdrahtvorschubgeschwindigkeit erfolgt sind
- keine Untersuchungen zum Energieeintrag und Temperaturverhalten des Verfahrens in Abhängigkeit vom Zusatzdraht angestellt wurden
- keine Untersuchungen über die Integration von Heißdraht und MSG-Brenner in einer kombinierten Gasdüse vorliegen
- keine Untersuchungen für den Einsatz beim Verbindungsschweißen, Auftragsschweißen und der additiven Fertigung vorliegen

3 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and design of experiments

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wird das für das gesamte Projekt genutzte methodische Vorgehen aufgezeigt. Auf Basis eines Flowchart werden die einzelnen Arbeitsschritte beschrieben und deren Interaktion dargestellt. Mithilfe von Tabellen zur detaillierten Beschreibung der einzelnen Arbeitsabschnitte werden diese hinsichtlich der Forschungsziele erläutert.

Abstract

Within this chapter, the methodological approach utilized throughout the entire project is delineated. Based on a flowchart, the individual steps are described, and their interaction is depicted. Tables are employed to provide detailed descriptions of each work section, elucidating their relevance to the research objectives.

3.1 Vorgehensweise

Der Prozess zum MSG-Schweißen mit vorgelagert vorgewärmten Heißdraht (beschrieben in Kapitel 2.4.3) wurde bisher in der Wirtschaft und in der Wissenschaft nur in geringem Maße untersucht. Daher ist es Ziel dieses Forschungsprojekts ein grundlegendes Prozessverständnis aufzubauen. Dazu werden zuerst, auf Basis von Erfahrungswissen und der Literaturrecherche im Stand der Technik, geeignete Untersuchungsmethoden für Schweißprozesse ausgewählt. Aufgrund der Komplexität des Zusammenwirkens von MSG-Prozess und Heißdraht in einem Schmelzbad muss ebenfalls die vorhandene Anlagen- und Steuerungstechnik ertüchtigt werden, um dezidierte Prozessabläufe zu ermöglichen. Anschließend können Schweißversuche zur Prozessfensterermittlung (Blindraupen) durchgeführt werden, damit ein ausreichend großes Prozessverständnis aufgebaut wird. In diesem Zusammenhang werden die geometrischen Parameter des Heißdrahtes, vor allem der Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr, hinsichtlich ihres Einflusses auf den Prozess untersucht. Mit dem gewonnenen Prozessverständnis werden anschließend Versuche zum Verbindungsschweißen durchgeführt. Diese werden mit der bereits vorhandenen externen Heißdrahtzufuhr durchgeführt, da dies dem Standardeinsatz von Heißdrahtprozessen beim Verbindungsschweißen entspricht. Um jedoch eine breitere Akzeptanz des Prozesses in der Wirtschaft durch geringere Störkonturen zu erreichen, wird, abgeleitet aus den vorherigen Untersuchungen, ein kompakter Demonstrator mit in die Gasdüse integrierter Drahtzufuhr entwickelt. Mit diesem Demonstrator werden Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Auftragschweißen (Cladding) und die additive Fertigung durchgeführt. Anhand aller Untersuchungen zum Prozessverständnis und der Eignung für verschiedene Einsatzzwecke werden anschließend Hinweise abgeleitet, um einen einfachen Transfer in die Wirtschaft zu gestalten. Die methodische Vorgehensweise, die im

Rahmen dieses Berichtes und des Projektes umgesetzt wird, ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

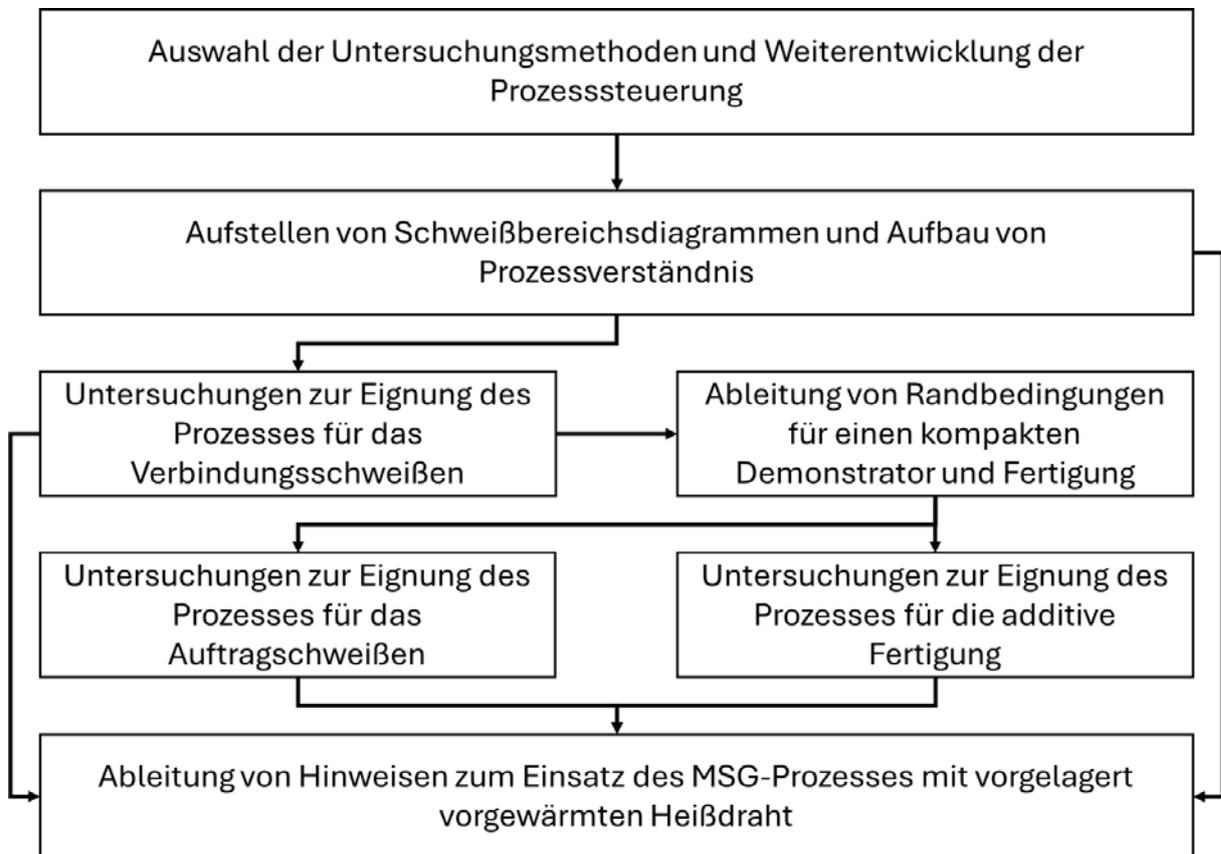


Abbildung 3-1: Methodisches Vorgehen zur Untersuchung des MSG Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung des Heißdrahtes

3.2 Versuchsplanung

Im Folgenden werden die Randbedingungen für die im Projekt vorgesehenen Untersuchungen dargestellt. Dabei werden in der Versuchsplanung die notwendige Methodik und die zu erzielenden Ergebnisse beschrieben.

3.2.1 Versuchsplanung - Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen und Aufbau von Prozessverständnis

Tabelle 3-1: Versuchsplanung für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen und Aufbau von Prozessverständnis

Versuche:

- Untersuchung der geometrischen Randbedingungen der Heißdrahtzufuhr (Anstellwinkel, Position im Schmelzbad) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung
- Untersuchung der Prozessparameter (MSG Drahtvorschub, HD Strom, HD Drahtvorschub) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung
- Untersuchung des Energieeintrags des Prozesses

Untersuchung von niedriglegiertem Baustahl (S355JR) und hochlegiertem Stahl (1.4301)

Methodik:

- Aufnahme und Auswertung der elektrischen Prozessparameter
- Aufnahme der äußeren Nahtausbildung (Nahthöhe und Nahtbreite)
- Aufnahme der inneren Nahtausbildung (Einbrandtiefe)
- Aufnahme des Energieeintrags in das Bauteil und die Heißdrahtzufuhr

Versuchsziele:

- Aufbau von Prozessverständnis durch Ursache- Wirkzusammenhängen zwischen den Prozessparametern und der Nahtausbildung
- Ableitung von Randbedingungen für die Weiterentwicklung der Heißdrahtzufuhr

3.2.2 Versuchsplanung - Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Verbindungsschweißen

Tabelle 3-2: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Verbindungsschweißen

Versuche:

- Untersuchung der geometrischen Randbedingungen der Heißdrahtzufuhr (Anstellwinkel, Position im Schmelzbad) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung
- Untersuchung der Prozessparameter (MSG-Drahtvorschub, HD-Strom, HD-Drahtvorschub) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung

Untersuchung von niedriglegiertem Baustahl (S355JR)

Methodik:

- Aufnahme und Auswertung der elektrischen Prozessparameter
- Aufnahme der äußeren Nahtausbildung (Nahtuniformität)
- Aufnahme der inneren Nahtausbildung (Durchschweißbarkeit, Härteprofile, mech.-technologische Gütewerte)

Versuchsziele:

- Aufbau von Prozessverständnis durch Ursache- Wirkzusammenhängen zwischen den Prozessparametern und der Nahtausbildung
- Ableitung von Randbedingungen für die Weiterentwicklung der Heißdrahtzufuhr

3.2.3 Versuchsplanung - Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Auftragschweißen

Tabelle 3-3: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für das Auftragschweißen

Versuche:

- Untersuchung der Prozessparameter (MSG Drahtvorschub, HD Strom, HD Drahtvorschub) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung

Untersuchung von niedriglegiertem Baustahl (S355JR) und hochlegiertem Stahl (1.4301)

Methodik:

- Aufnahme und Auswertung der elektrischen Prozessparameter
- Aufnahme der äußeren Nahtausbildung (Nahthöhe und Nahtbreite)
- Aufnahme der inneren Nahtausbildung (Einbrandtiefe und Elementverteilung)
- Aufnahme des Energieeintrags in das Bauteil und die Heißdrahtzufuhr

Versuchsziele:

- Aufbau von Prozessverständnis durch Ursache- Wirkzusammenhängen zwischen den Prozessparametern und der Nahtausbildung
- Ableitung von Randbedingungen für die Weiterentwicklung der Heißdrahtzufuhr

3.2.4 Versuchsplanung - Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für die additive Fertigung

Tabelle 3-4: Versuchsplanung für die Untersuchungen zur Eignung des Prozesses für die additive Fertigung

Versuche: <ul style="list-style-type: none">• Untersuchung der Prozessparameter (MSG Drahtvorschub, HD Strom, HD Drahtvorschub) auf das Prozessverhalten und die Nahtausbildung Untersuchung von niedriglegiertem Baustahl (S355JR)
Methodik: <ul style="list-style-type: none">• Aufnahme und Auswertung der elektrischen Prozessparameter• Aufnahme der äußeren Nahtausbildung (Demonstratoraufbau)• Aufnahme der inneren Nahtausbildung (Poren)
Versuchsziele: <ul style="list-style-type: none">• Aufbau von Prozessverständnis durch Ursache- Wirkzusammenhängen zwischen den Prozessparametern und der Nahtausbildung

4 Untersuchungsmethoden und Weiterentwicklung der Versuchsanlagen / Research methods and further development of the experimental equipment

Kurzfassung

In diesem Abschnitt werden diagnostische Verfahren vorgestellt, die dazu dienen, das Verständnis des Heißdrahtprozesses zu vertiefen und potenzielle Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren. Das Ziel besteht darin, kausale Zusammenhänge zu ermitteln, um bedeutende Einsichten in die dynamischen Abläufe während des Schweißens mit vorgelagerter Vorwärmung des Heißdrahts zu erlangen. Diese diagnostischen Verfahren ermöglichen eine detaillierte Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessparametern. Die Auswahl der diagnostischen Methoden erfolgt auf Basis der in Kapitel 3 festgelegten Versuchsplanung.

Abstract

In this section, diagnostic methods are explained to deepen the understanding of the hot wire process and to identify potential optimization approaches. The aim is to derive cause-effect relationships and thus gain important insights into the dynamic processes during welding with preheated hot wire. These diagnostic methods enable the examination of interactions between various parameters of the process. The selection of diagnostic methods is based on the experimental design outlined in Chapter 3.

4.1 Untersuchungsmethoden von Heißdrahtprozessen

In diesem Abschnitt werden diagnostische Methoden erläutert, um das Verständnis des Heißdrahtprozesses zu vertiefen und potenzielle Optimierungsansätze zu identifizieren. So sollen Ursache-Wirkungszusammenhänge abgeleitet werden und somit wichtige Einblicke in die dynamischen Vorgänge während des Schweißens mit vorgelagert vorgewärmten Heißdraht zu gewinnen. Diese diagnostischen Verfahren ermöglichen es, die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Parametern des Prozesses zu untersuchen. Die Auswahl der diagnostischen Methoden basiert auf der in Kapitel 3 aufgestellten Versuchsplanung.

4.1.1 Hochgeschwindigkeitskinematographie

Hochgeschwindigkeitskinematographie und synchronisierte Strom-Spannungsmessung sind in der Schweißtechnik üblich, um Ursache-Wirkungszusammenhänge zu verstehen. Spezifische Beleuchtungsquellen und Filter vermeiden Überbelichtung durch Lichtbogenstrahlung und zeigen die Elementverteilung im Plasma und an den Elektroden an. Die Visualisierung variiert je nach Beleuchtungsanordnung. [71] Bei WIG- und Plasmaprozessen wird oft die spektralselektive Lichtbogenfotografie ohne zusätzliche Beleuchtung bevorzugt. SCHNICK analysiert Plasmalichtbögen auf diese Weise. [72] Beim MSG-Schweißen

sind zusätzliche Beleuchtungsquellen nicht immer erforderlich; oft wird die Schattentechnik zur Untersuchung des Werkstoffübergangs eingesetzt. Neben der direkten Durchstrahlung kann das Schmelzbad mit einem Laser beleuchtet und die Reflexionen analysiert werden, um das Schmelzbadverhalten zu verstehen. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit spektralselektiven Filtern und seitlicher Laserbeleuchtung machen Werkstoffübergang, Schmelzlinie und Schmelzbad sichtbar. [73, 74]

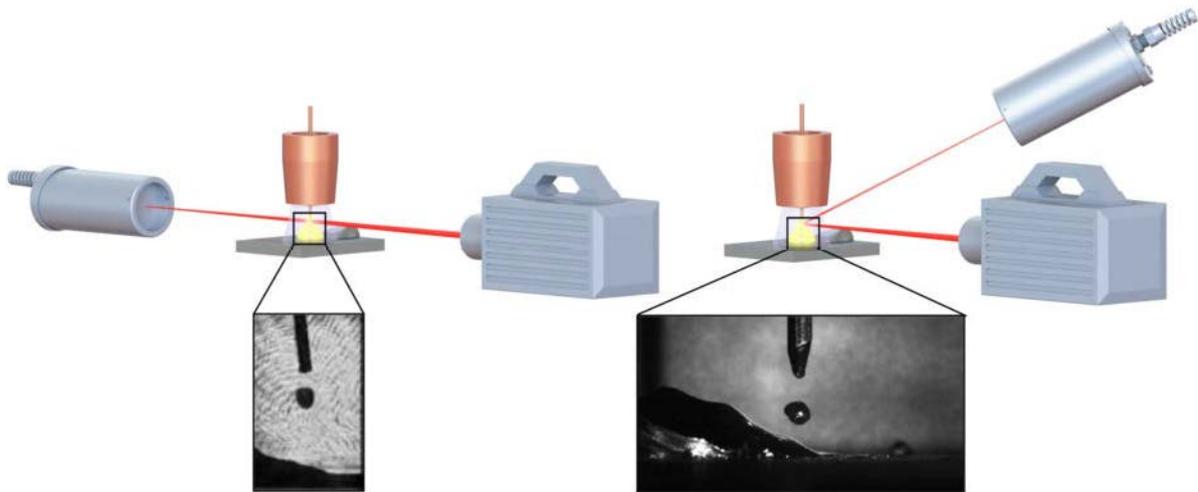


Abbildung 4-1: Hochgeschwindigkeitskinematographie von Schweißprozessen: mit Schattentechnik in (links), mit seitlicher Beleuchtung (rechts) [75]

4.1.2 Schlierenvisualisierung

Die Schlierentechnik, von August Toepler zwischen 1859 und 1864 entwickelt, visualisiert Wärme- und Gasströmungen sowie Schockwellen bei elektrischen Funkenschlägen. Sie nutzt eine Beleuchtungsquelle und den dichteabhängigen Brechungsindex der Strömung. Die häufig verwendete Toepler'sche Z-Anordnung mit zwei Parabolspiegeln minimiert Darstellungsfehler und ermöglicht größere Bildabdeckung. [76] Heutzutage findet die Schlierentechnik Anwendung in Kriminaltechnik, Ballistik, Wärmetechnik, Fluidtechnik, Luftfahrttechnik, Fahrzeugbau und Lüftungstechnik sowie in der Schweiß- und Schneidtechnik. [77, 78] Für Schlierenaufnahmen bei MSG-Prozessen sind leistungsstarke Beleuchtungsquellen und spektralselektive Filter erforderlich. Gasdampflampen, Laser und Hochleistungsbeleuchtungsdiode werden verwendet. [79]

DREHER und SCHNICK ET AL. untersuchten die Schutzgasströmung beim MSG-Schweißen und empfahlen kleine Gasdurchflüsse, große Strömungsquerschnitte und lange Laminarisierungsstrecken. Schlierenaufnahmen zeigten auch die Vorteile einer gemeinsamen Gasdüse beim Heißdrahtunterstützten MSG-Tandemschweißen. [79, 80]

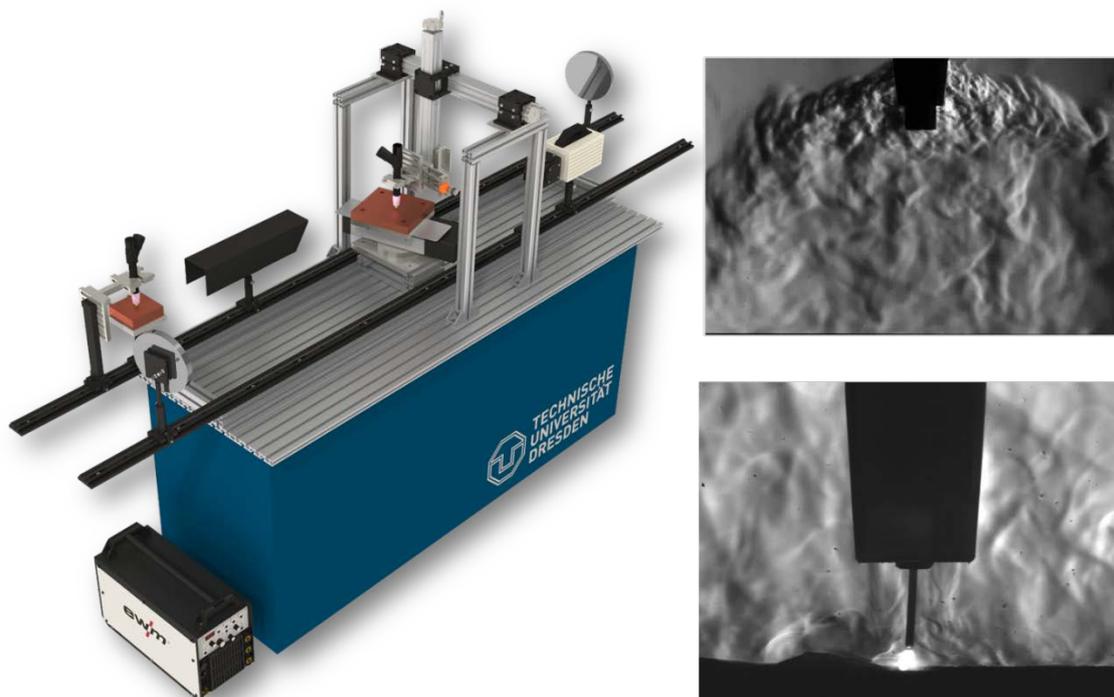


Abbildung 4-2: Schlierenversuchsstand in Toepler'scher Z-Anordnung zur qualitativen Bewertung der Schutzgasabdeckung mit Beispielen

4.1.3 Sauerstoffkonzentrationsmessung

Zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration wird ein Lichtbogen auf einer wassergekühlten Kupferplatte gezündet und über eine Messbohrung verfahren. Ein kontinuierlicher Messvolumenstrom wird in eine Lambdasonde geleitet, wo eine Ionisierung von Sauerstoffatomen stattfindet. Die Sauerstoffionen bewegen sich in einem Feststoffelektrolyten aus Zirkoniumoxid entsprechend des elektrischen Potentials. Der elektrische Widerstand und Spannungsabfall des Elektrolyten werden durch die Menge an Sauerstoffionen beeinflusst, sodass die Sauerstoffkonzentration bestimmt werden kann. [81]

Ein Versuchsaufbau besteht beispielsweise aus einer Kupferplatte, einer Sauerstoffsonde und einem 3-Achs-Verfahrensystem für Linien- und Flächenmessungen. Eine Einschwingzeit von mindestens 10 Sekunden ist vor Beginn der Messung erforderlich. In der Regel wird reines Argon als Schutzgas verwendet. [80]

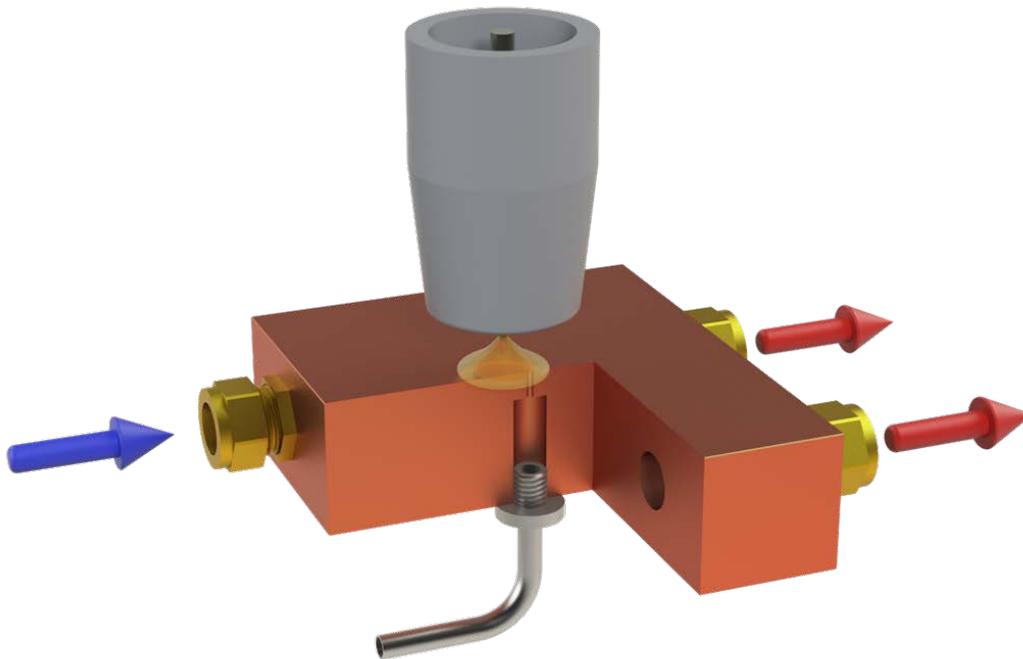


Abbildung 4-3: Messprinzip der Restsauerstoffmessung

4.1.4 Energieeintragsmessung

Zur Ermittlung des Energieeintrags und des Prozesswirkungsgrades in der Schweißtechnik werden oft kalorimetrische Messungen durchgeführt. Laut DIN EN 1011-1 variieren die thermischen Wirkungsgrade von Lichtbogenschweißprozessen. [82] STENBACKA ET AL. zeigen, dass der Wirkungsgrad beim WIG-Schweißen stark vom Material abhängt. [83] GIEDT ET AL. ermittelten den Wirkungsgrad beim WIG-Schweißen von hochlegierten Stählen und fanden eine Effizienz von ca. 80 % bei Stromstärken bis 200 A, und 60 % bis 70 % bei 250 A bis 350 A. [84] DUTTA ET AL. fanden beim WIG-Schweißen von unlegiertem Stahl Wirkungsgrade zwischen 62 % und 85 %. [85]

EGERLAND, ANWAR und PEPE ET AL. messen den Wärmeeintrag am Werkstück kalorimetrisch. [86] HÄLSIG ET AL. bestätigten die bekannten Wirkungsgrade beim MSG-Schweißen durch Experimente auf leicht angestellten Blechen und stellten eine Methode zur Ermittlung der Strahlungsverluste vor. Untersuchungen nutzen eine Hohlkathode und ein Tropfenkalorimeter zur Bestimmung des Energieeintrags durch den Lichtbogen und Werkstoffübergang. [87] QUINTINO ET AL. schlugen eine Methode zur Ermittlung des Energieeintrags bei vollständiger Wurzelanbindung vor, indem das geschweißte Blech in flüssigen Stickstoff getaucht und der Wärmeeintrag kalorimetrisch erfasst wird. [88]

4.1.5 Messung der Geometrie durch Laserscanner

Ein geeignetes Messmittel zur Erfassung des Ist-Zustandes des additiv gefertigten Bauteils und somit zur Überwachung des Fertigungsprozesses sind Laserliniensensoren [89]. Laserliniensensoren sind in der Industrie weit verbreitet und nutzen zur Abstandsmessung das Triangulationsprinzip. Ein statischer

Laserlichtstrahl wird über eine Spezialoptik zu einer Linie aufgeweitet und auf die Oberfläche projiziert. Mit Hilfe einer Empfangsoptik wird das diffus reflektierte Licht auf eine Sensormatrix abgebildet. Aus der Abbildung der Laserlinie auf der Sensormatrix kann der Abstand zur Oberfläche sowie die Position entlang der Laserlinie berechnet werden. Auf diese Weise wird ein Höhenprofil entlang der Laserlinie bestimmt [90]. Im Kontext der additiven Fertigung werden Laserliniensensoren eingesetzt, um die Geometrie von Schweißraupen zu bestimmen [91 bis 94]. Darüber hinaus gibt es Untersuchungen, die Laserliniensensoren zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit flächiger Strukturen anwenden [94 bis 97]. In beiden Fällen wird der Laserliniensensor in einer linearen Bewegung (Länge) über das Messobjekt verfahren und im Anschluss daran aus den Einzelmessungen das Oberflächenrelief generiert. Dabei muss der Laserliniensensor die gesamte Breite des zu vermessenden Objekts erfassen können, wodurch die Auflösungsanforderungen die maximale Breite des Objekts und somit des fertigen Teils begrenzen. Außerdem kann es an den Rändern des Messbereichs auf Grund der schräg eintreffenden Laserlichtstrahlen zu Abschattungseffekten kommen, wodurch die Qualität der Messungen sinkt. Gleiches gilt für den Fall, dass die lineare Bewegung entlang der Längsachse nicht mit der Orientierung der Schweißraupen übereinstimmt.

4.2 Weiterentwicklung eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Heißdrahtprozessen

Bisher auf dem Markt verfügbare Heißdrahtsysteme (Beispiel EWM TIGSpeedDrive 45 HW) sind in Ihrer maximal möglichen Stromstärke (180 A) und maximal möglichen Drahtvorschubgeschwindigkeit (15 m/min) begrenzt. Diese Systeme sind in der Regel für die Kombination mit einem WIG-Prozess konzipiert. Durch Voruntersuchungen zu diesem Projekt ist zu sehen, dass die verfügbaren Anlagen daher für die Kombination mit einem MSG-Prozess eine größere Leistungsfähigkeit aufweisen müssen. Daher wurde der Professur für Fügetechnik und Montage im Rahmen dieses Projektes eine speziell entwickelte Heißdrahtstromquelle (TETRIX 552HW SCO) der Firma EWM GmbH zur Verfügung gestellt. Diese Stromquelle wird nicht in Kombination mit einer weiteren Stromquelle (Master-Slave-Prinzip), sondern als einzelne Stromquelle betrieben. Die Basis der Anlage stellt eine spannungsbegrenzte WIG-Stromquelle dar, welche bis zu 550 A Schweißstrom liefern kann. Durch eine angepasste Firmware kann diese Stromquelle mit einem MSG-Drahtvorschubkoffer kombiniert werden, um Drahtvorschubgeschwindigkeiten von bis zu 25 m/min bereitzustellen. Durch die Ausführung als dezidierte Stromquelle ist jedoch zu beachten, dass zur Umsetzung des Heißdrahtprozesses eine CNC-Anlage notwendig ist, welche zwei Stromquellen (MSG und Heißdraht) steuern kann.

Für die Durchführung der Versuche mit MSG-Heißdraht wurde daher eine vorhandene 4-Achs-CNC-Anlage in Portalbauweise erweitert. Diese besitzt einen Arbeitsraum von 3000 mm x 2000 mm welcher von einer Traverse mit zwei Höhenachsen überspannt wird. Der Antrieb der Traverse (X-Achse) wird durch leistungsstarke Schrittmotoren realisiert, deren Drehmoment durch Planetengetriebe

erhöht und durch eine Zahnstange in eine Linearbewegung umgesetzt wird. Sowohl das Verfahren der Traverse als auch der Höhenachsen erfolgt durch eine Kombination aus Schrittmotoren sowie Linearachsen. Zum Schutz des Bedienpersonals vor Strahlungs- und Partikelemission wurde die gesamte Anlage mit einer Einhausung und großflächigen Schutzscheiben versehen, um die Prozessbeobachtung zu gewährleisten. Die Türen der Einhausung wurden mit Schutzschaltern abgesichert, sodass ein automatisches Abschalten von Schweißprozess und Verfahrbewegung beim Öffnen der Türen erfolgt. Innerhalb des Arbeitsraumes sind 3 Prüfstationen angeordnet, welche separate Kühlkreisläufe besitzen, die über Magnetventile zu- oder abgeschaltet werden können. Jeder Kühlkreislauf besitzt eine Überwachung der Vor- und Rücklauftemperatur sowie des Durchflusses, sodass die eingebrachte Wärme jederzeit kalorimetrisch erfasst werden kann.

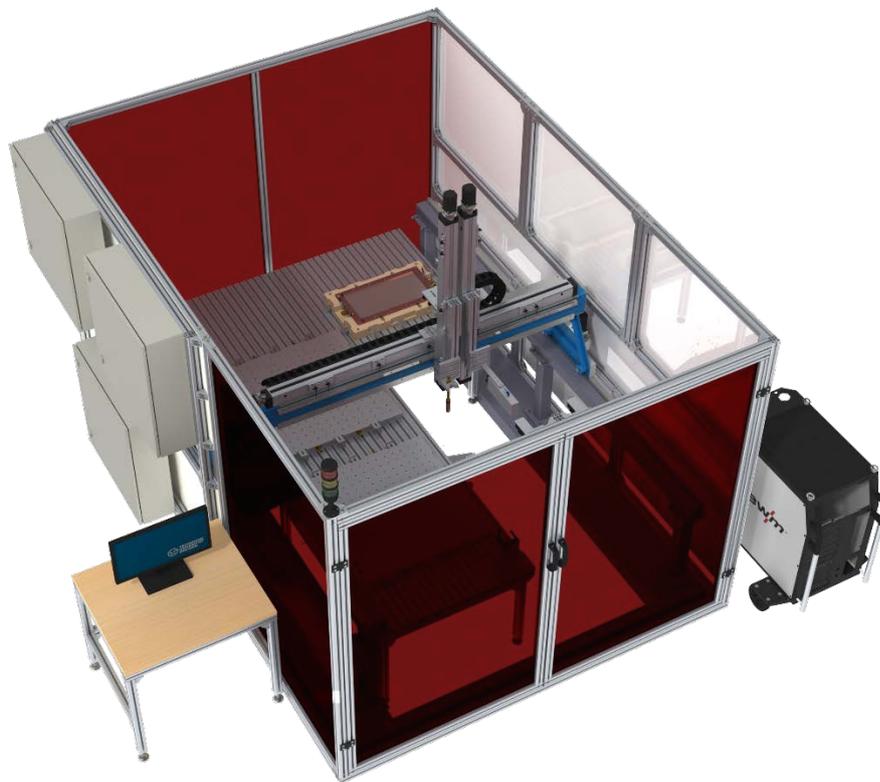


Abbildung 4-4: 4-Achs-CNC-Anlage zur Bestimmung des Energieeintrages sowie der thermischen Dauerbelastbarkeit

Station A und B dienen dem Einschweißen von Prozessparametern sowie dem additiven Aufbau von großvolumigen Versuchsstrukturen auf einer wassergekühlten Aluminiumspannplatte. Dadurch sollen Vorzugsparemeter ermittelt werden, welche für die anschließende Messung des Energieeintrages bei gleichem Versuchsaufbau verwendet werden. Die Bestimmung des Energieeintrages von Verfahren mit abschmelzender Elektrode oder Zusatzdraht erfolgt mit dem in Abbildung 4-5 dargestellten Versuchsstand. Dieser ist ebenfalls zweiteilig aufgebaut. Sowohl in der Grundplatte aus Aluminium als auch in der Tragplatte aus Kupfer wurden entsprechende Aussparungen eingebracht, welche durch Verschrauben der beiden Platten miteinander einen komplexen Strömungsquerschnitt innerhalb des

Versuchsstandes ausbilden. Im Ein- und Auslassbereich wurden Prallstrukturen vorgesehen, um das Kühlwasser über die gesamte Plattenbreite zu verteilen und eine gleichmäßige Kühlung der Plattenoberfläche sicherzustellen. Durch einen meanderförmigen Strömungsquerschnitt wird die Kupferplatte immer wieder von unten angeströmt und somit eine hohe Kühleffizienz erreicht. Darüber hinaus sorgen Rippen für eine Versteifung der ansonsten dünnwandig ausgeführten Tragplatte aus Kupfer. Damit soll sichergestellt werden, dass die Wärme schnell von der Plattenoberseite zur Plattenunterseite geleitet werden kann und dort vom Kühlwasser aufgenommen wird. Gleichzeitig werden Wärmeverluste infolge von Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung durch eine Isolierung des gesamten Messaufbaus minimiert. Darüber hinaus besitzt die Kühlplatte in den Randbereichen taschenförmige Ausfräsungen, in welchen Luft enthalten ist. Dadurch kann zum einen Gewicht eingespart werden, zum anderen weist Luft sehr gute Isoliereigenschaften auf. Das gleiche Prinzip wird bei der Aluminiumgrundplatte angewendet, welche so ausgelegt ist, dass diese nur in den Ecken Kontakt zur umgebenden Isolierung besitzt, sodass ein Luftspalt zwischen Grundplatte und Isolierung entsteht. Durch diese konstruktiven Maßnahmen kann der Messfehler bei Bestimmung des Energieeintrages in Grenzen gehalten werden. Die Dicke des eingesetzten Bleches richtet sich nach dem zu prüfenden Werkstoff, der eingesetzten Stromstärke sowie der Schweißgeschwindigkeit. Bei unlegierten Stählen können beispielsweise 5 mm dicke Bleche bis zu einer Stromstärke von 400 A und eine Schweißgeschwindigkeit von 10 mm/s verwendet werden. Zur Gewährleistung eines ständigen Kontaktes zwischen Blechunterseite und Kupferplatte, werden die Bleche mit umlaufenden Kupferspannbacken fixiert.

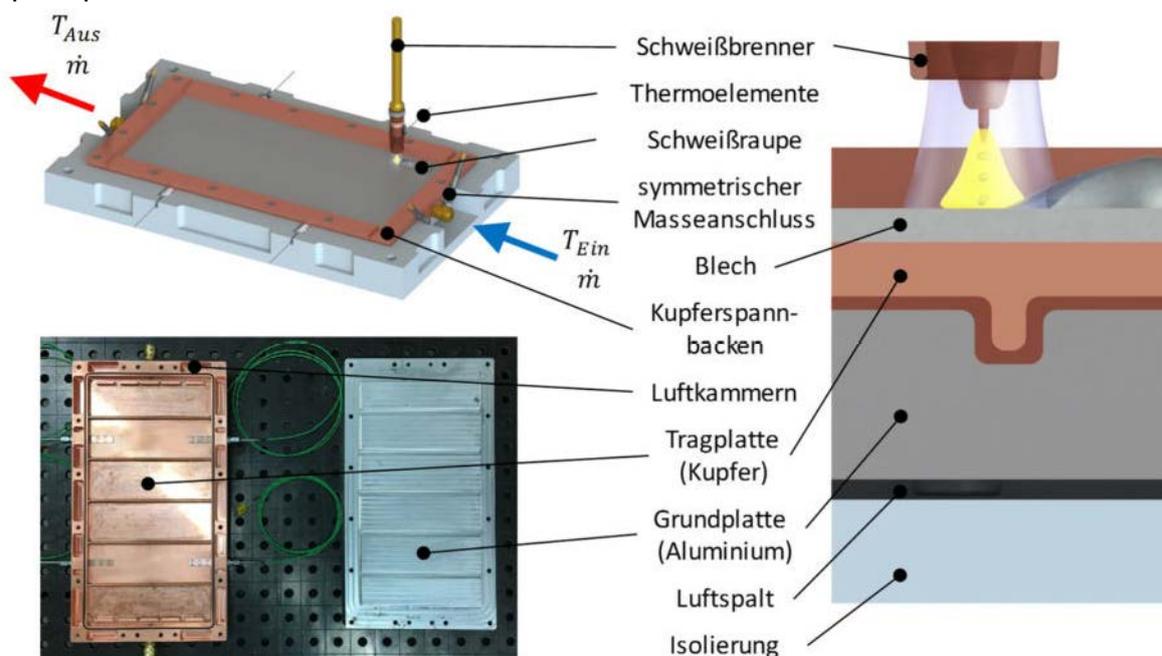


Abbildung 4-5: Energieeintragsmessung für Verfahren mit abschmelzender Elektrode [75]

Die Steuerung der Bewegung und der Stromquellen sowie aller anderen Sensoren und Aktuatoren erfolgt mittels einer SPS (Beckhoff Twincat). Die Stromquellen werden mit der SPS über ein BUS-Interface (EWM BusINT X11) auf EtherCAT Basis

angesteuert. Dadurch ist eine Einstellung aller Prozessparameter über die SPS möglich. Durch die externe Ansteuerung der Stromquellen ist eine dezidierte Einstellbarkeit des Prozessablaufs (Beginn der Teilprozesse MSG und Heißdraht) möglich. Durch eine Integration von Messtechnik in der Anlage können für jeden Schweißversuch die realen Prozessparameter gemessen und gespeichert werden. In der folgenden Abbildung ist ein Schema für die Ansteuerung der Sensoren und Aktuatoren dargestellt.

Wie dem Stand der Technik entnommen werden kann, hat für konventionellen Heißdrahtprozesse die Polung des Heißdrahtes einen Einfluss auf die Lichtbogenauslenkung des MSG-Prozesses. Laut der Arbeitshypothese des Forschungsprojektes soll die Blaswirkung durch Einsatz des vorgelagert vorgewärmten Heißdrahtes auf ein Minimum reduziert werden. Daher wird für die Versuche, die in der folgenden Abbildung 4-7 dargestellte, Polung des Heißdrahtes und die konventionelle Polung des MSG-Prozesses verwendet. Um gleichbleibende Versuchsbedingungen und eine höhere Standzeit der Anlagentechnik zu gewährleisten, sind sowohl der Brenner, die Heißdrahtzufuhr, als auch die Spannplatte der Substrate gekühlt. Die Kühlkreisläufe sind in der gleichen Abbildung dargestellt. Durch eine Messung der Zu- und Ablauftemperatur sowie des Volumenstromes der Kühlflüssigkeit können diese Prozessteile ebenso kalorimetrisch erfasst werden.

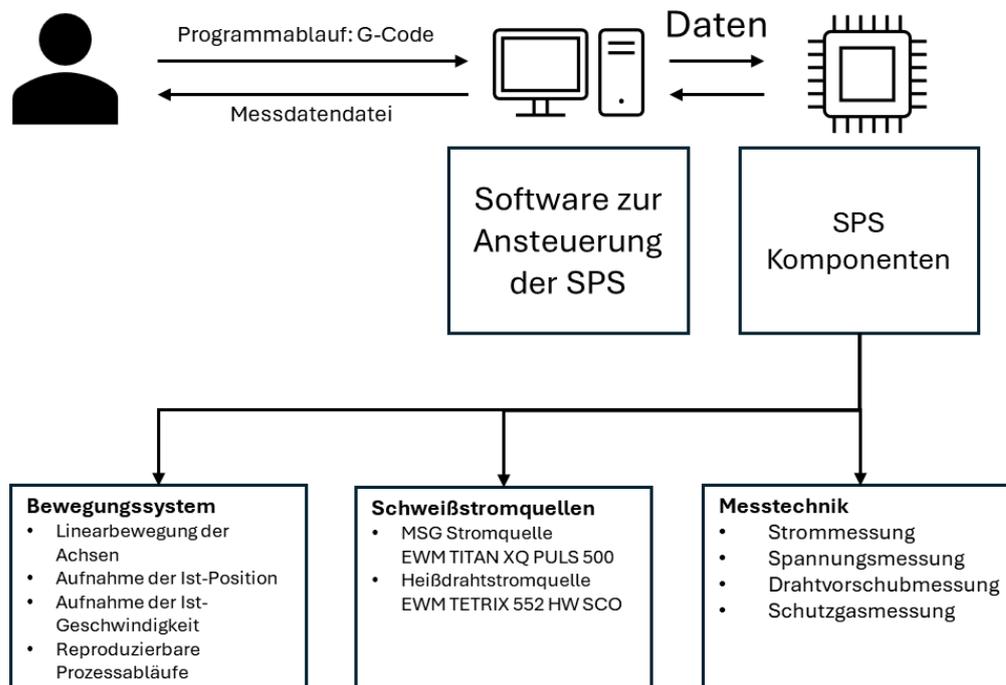


Abbildung 4-6: Ablaufsteuerung der CNC-Anlage für den MSG Heißdrahtprozess

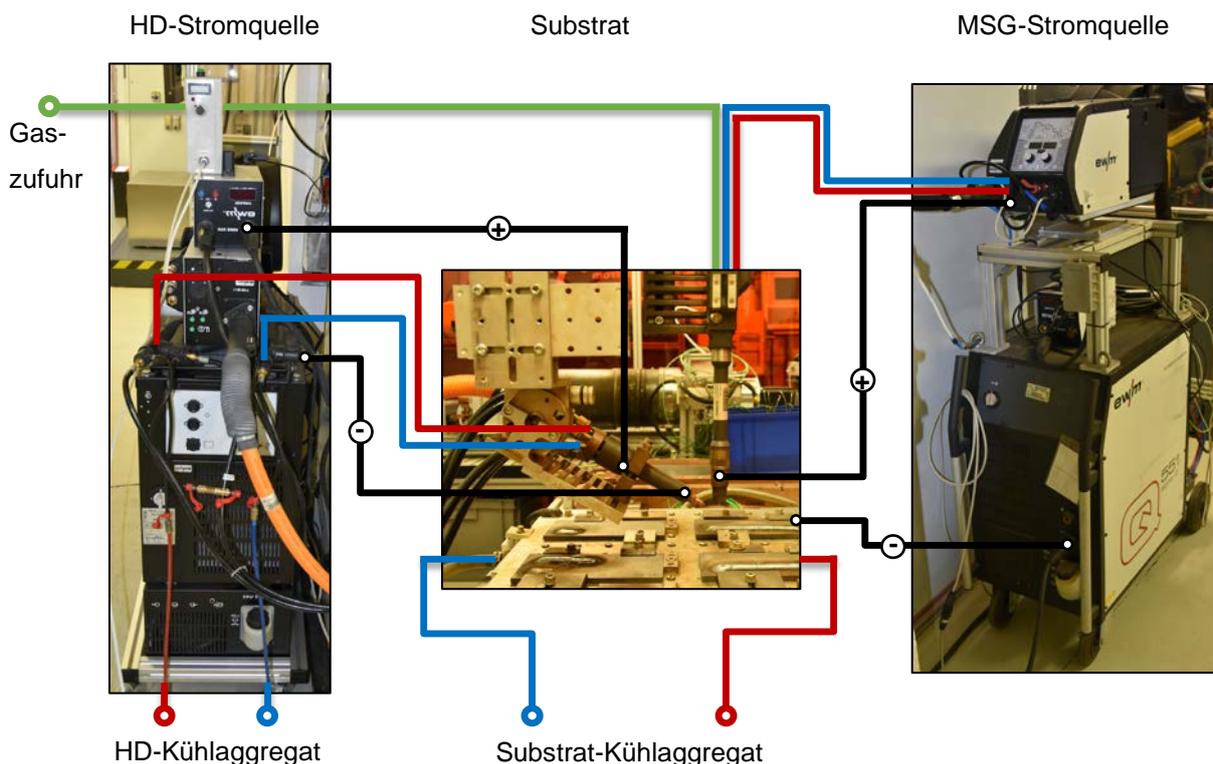


Abbildung 4-7: Anschluss der Stromquellen und Kühlungen für den MSG-Heißdrahtprozess

Für die Versuche wird, die von SPANIOL entwickelte, Heißdrahtzufuhr in Kombination mit einem konventionellen MSG-Brenner (Abicor Binzel 500 WHPP) eingesetzt. Eine Prinzipskizze für die Heißdrahtzufuhr ist in der folgenden Abbildung 4-8 dargestellt. Für die Versuche wird, aufgrund der besseren Umsetzbarkeit, die Version ohne zusätzliches Schutzgas eingesetzt. Durch den ebenfalls geringeren Bauraum kann eine bessere Zugänglichkeit gewährleistet werden.

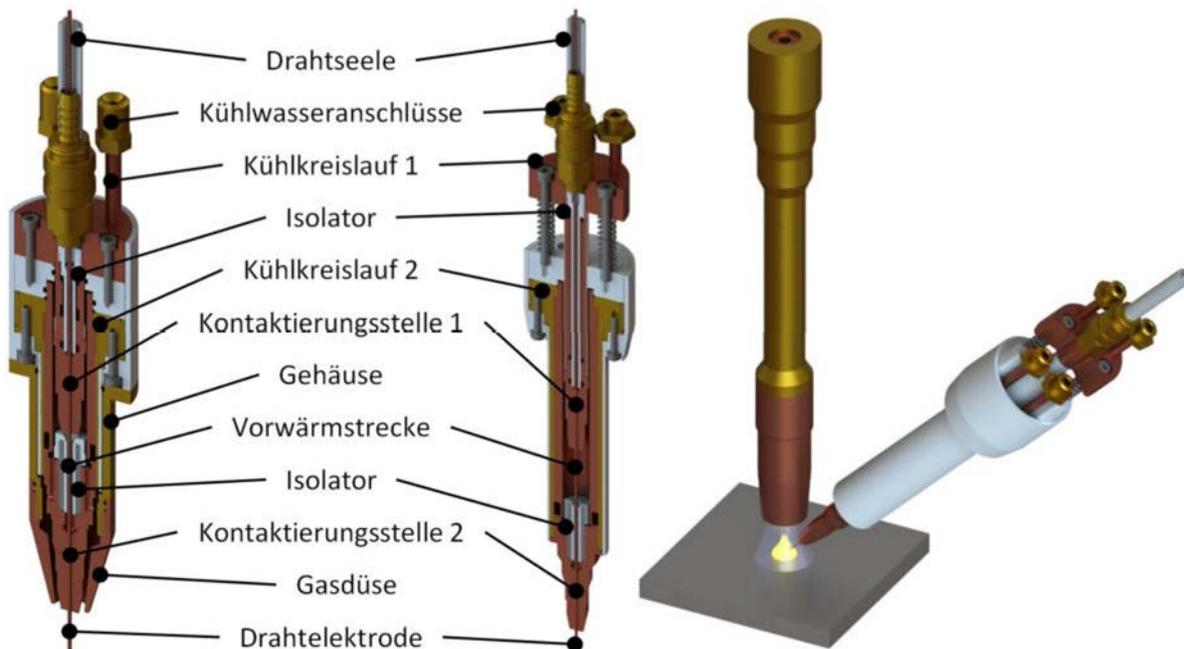


Abbildung 4-8: Schnittansicht der von Spaniol entwickelten Heißdrahtzufuhr für den MSG-Heißdrahtprozess mit vorgelagerter Drahtvorwärmung [75]

5 Durchführung und Auswertung der Schweißversuche zur Charakterisierung des Prozessverhaltens / Welding Experiments for Process Characterization

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Abschnitts werden die Untersuchungen zur Prozesscharakteristik dargestellt. Dazu werden zuerst die geometrischen und technologiespezifischen Randbedingungen des Prozesses untersucht und hinsichtlich ihrer Sensitivität eingeordnet. Anschließend werden für zwei Werkstoffe (1.0045 und 1.4301) Schweißbereichsdiagramme aufgestellt, mit denen das Potential des Prozesses verdeutlicht werden kann. Anhand metallografischer Untersuchungen der erzeugten Schweißnähte können Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und der Nahtgeometrie dargestellt werden. Abschließend wird mithilfe einer Untersuchung des Energieeintrags des Prozesses der Einfluss auf das Bauteil abgeleitet.

Abstract

In this section, investigations into process characteristics are presented. Initially, the geometric and technology-specific boundary conditions of the process are examined and classified according to their sensitivity. Subsequently, welding area diagrams are established for two materials (1.0045 and 1.4301), illustrating the process potential. Through metallographic examinations of the produced welds, relationships between process parameters and seam geometry can be depicted. Finally, by examining the energy input of the process, the influence on the component is derived.

5.1 Charakterisierung des Prozessverhaltens

Zur Untersuchung des Prozessverhaltens und der Verbindungsausbildung beim MSG-Heißdrahtschweißen mit vorgelagertem Heißdraht wurde zunächst der Einfluss verschiedener Prozessparameter analysiert. Dies wurde durch Hochgeschwindigkeitskinematographie, kombiniert mit einer zeitsynchronen Strom-Spannungs-Messung sowie metallographischen Untersuchungen realisiert. Um die Prozessstabilität zu bewerten, wurden die Strom-Spannungssignale mit einem 10 kHz Filter aufgezeichnet und ein gleitender Mittelwert über 10 Einzelwerte gebildet. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-6) sind die Strom-Spannungsverläufe sowie der Materialübergang und die geometrischen Kennwerte der erzeugten Blindnähte dargestellt. Durch die Untersuchung der geometrischen Einstellparameter (Heißdrahtwinkel, Vorwärm länge) werden diese für die weiteren Untersuchungen hinsichtlich ihres Prozesseinflusses bewertet und die optimalen Parameter werden für weitere Versuche eingesetzt. Um jedoch zuerst ein generelles Prozessverständnis aufzubauen, wurde der Heißdrahtstrom, bei gleichbleibendem Drahtvorschub (10 m/min) für MSG und Heißdraht, variiert.

5.1.1 Einfluss der Vorwärmstrecke

Das Prozessverhalten des Heißdrahtprozesses kann über die Länge der Vorwärmstrecke und damit über eine Variation des Heißdraht- und Schmelzbadtemperatur angepasst werden. Große Vorwärmstrecken gehen mit einer höheren Widerstandserwärmung des Prozesses, jedoch auch mit erhöhter Gefahr eines Drahtausknickens sowie einer veränderlichen Kontaktierung einher. Dadurch können die Heißdrahtparameter stark schwanken und die Prozessstabilität sinkt. Dieses Phänomen führt zur Bildung von Nahtunregelmäßigkeiten, weshalb eine Strategie mit hohen Heißdrahtstromstärken und geringen Vorwärmstrecken bevorzugt werden sollte. Insbesondere bei hochlegierten Stählen, die eine erhöhte Festigkeit aufweisen und weniger anfällig für Verformungen sind, besteht die Möglichkeit, Nahtkenngrößen zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu ist bei unlegierten Zusatzwerkstoffen aufgrund ihrer instabilen Vorwärmeigenschaften kaum eine Veränderung im Einbrand- und Benetzungsverhalten festzustellen. Da die Vorwärmstrecke einen weiteren Parameter zur Einstellung des Prozessverhaltens darstellt, wird diese im weiteren Projektverlauf, um den Prozess ausreichend stabil einzustellen, auf 30 mm fest eingestellt.

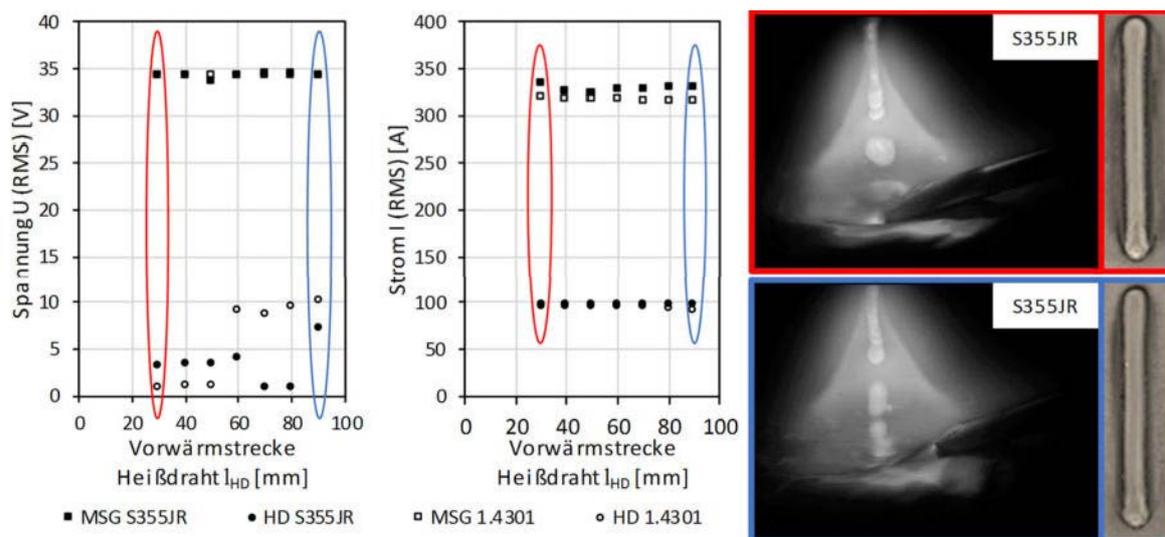


Abbildung 5-1: Einfluss der Vorwärmstrecke auf das Prozessverhalten [75]

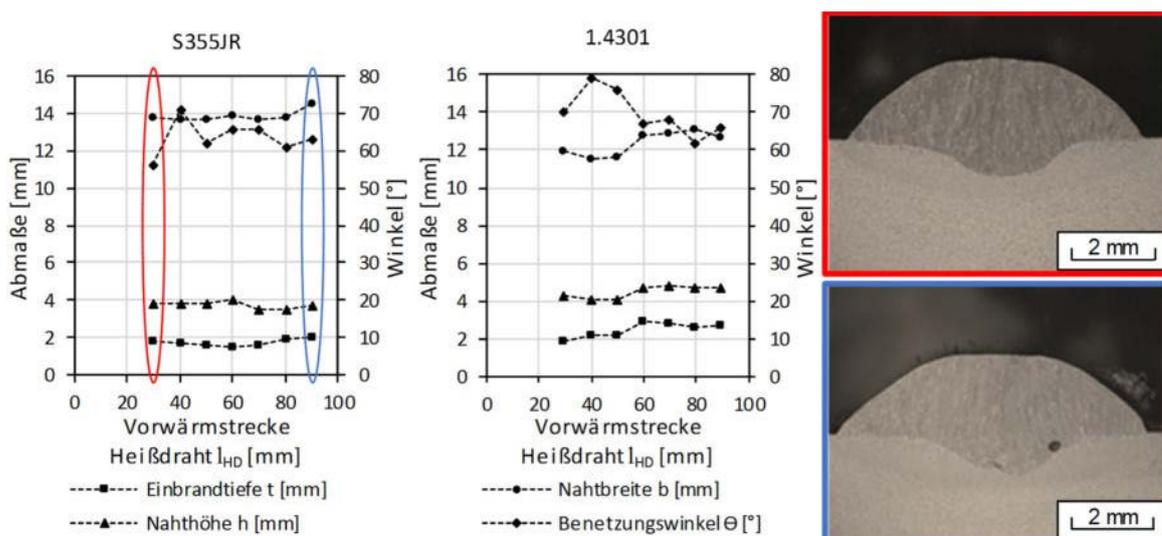


Abbildung 5-2: Einfluss der Vorwärmstrecke auf die Nahtausbildung [75]

5.1.2 Einfluss des Heißdrahtwinkels

Um die Stabilität des Prozesses zu erhöhen und die Qualität der Verbindungen zu verbessern, sollte wie beim WIG-Heißdrahtschweißen eine Erhöhung des Heißdrahtzuführwinkels angestrebt werden. Dies führt zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Zusatzheißdraht, da die Lichtbogendurchdringungsstrecke länger wird. Dadurch neigen besonders hochlegierte Zusatzdrähte dazu, früher abzuschmelzen und ein flacheres Schmelzbad im Bereich des Lichtbogens zu bilden, selbst bei gleichbleibender Heißdrahtstromstärke. Dies führt zu einem leichten Anstieg der Lichtbogenlänge und folglich zu einer Verringerung des MSG-Stroms. Die Form der Naht kann jedoch nur geringfügig beeinflusst werden. Aufgrund der Bauart der Heißdrahtzufuhr sind in diesem Versuchsstadium keine steileren Heißdrahtwinkel möglich. Für den weiteren Projektverlauf werden Untersuchungen bei 30° und 50° Anstellwinkel durchgeführt und im Rahmen der Demonstratorentwicklung steilere Anstellwinkel angestrebt.

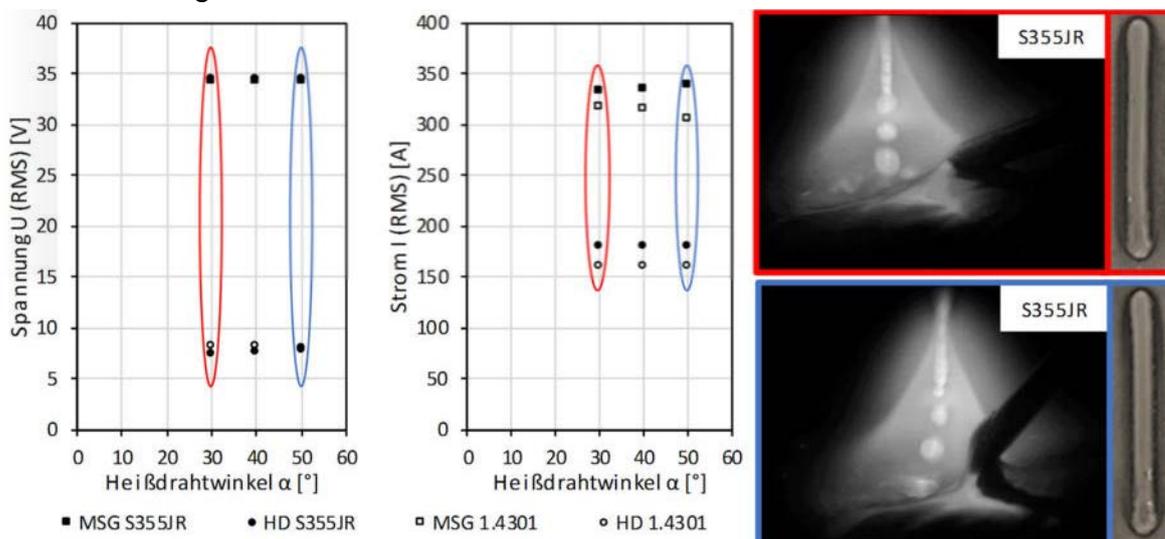


Abbildung 5-3: Einfluss des Heißdrahtzuführwinkels auf das Prozessverhalten [75]

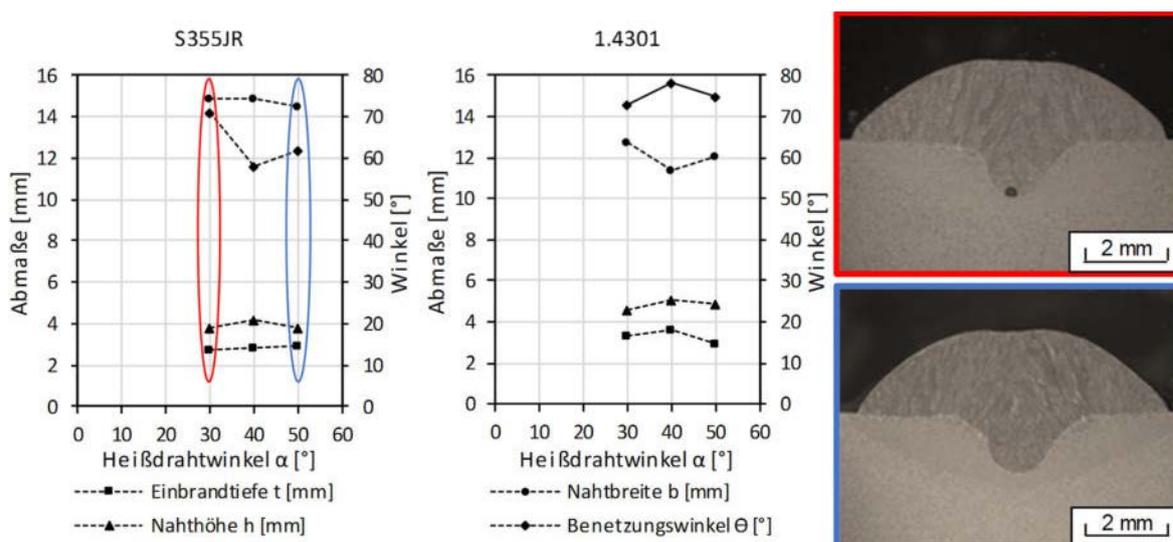


Abbildung 5-4: Einfluss des Heißdrahtzuführwinkels auf die Nahtausbildung [75]

5.1.3 Einfluss des MSG-Kontaktrahabstandes

Letztlich wird die Vorwärmung des Zusatzdrahtes nicht nur durch die Heißdrahtparameter selbst beeinflusst, sondern auch durch die eingesetzten MSG-Parameter. Eine geringere MSG-Stromstärke führt zu einem geringeren Druck des Lichtbogens und damit zu weniger Verdrängung der Schmelze aus dem Prozessbereich. Dies führt dazu, dass der Zusatzdraht tiefer in das Schmelzbad eintaucht und somit mehr Wärme aufnimmt. Gleichzeitig sinkt jedoch der Wärmeeintrag aufgrund des Lichtbogenstroms, was zu einer niedrigeren Schmelzbadtemperatur und möglichen Bindungsfehlern führen kann. Ein ähnliches Verhalten kann durch die Erhöhung des Kontaktrahabstands erreicht werden, was zu einer längeren Lichtbogenlänge und einer erhöhten MSG-Spannung sowie einem verringerten MSG-Strom führt. Eine Erhöhung des Kontaktrahabstands und damit eine Verringerung der MSG-Stromstärke führt zu einer geringeren Eindringtiefe. Gleichzeitig nimmt die Nahtüberwölbung zu, was zu einem größeren Benetzungswinkel und einer schmaleren Naht führt. Zudem nimmt die Silikatbildung ab. Für den weiteren Projektverlauf wird ein Prozess mit hoher Produktivität angestrebt, welcher durch höhere Abschmelzraten des MSG-Prozesses erreicht werden können. Um dabei jedoch den Einfluss des MSG-Prozesses zu minimieren, wird ein fester Kontaktrahabstand von 20 mm gewählt.

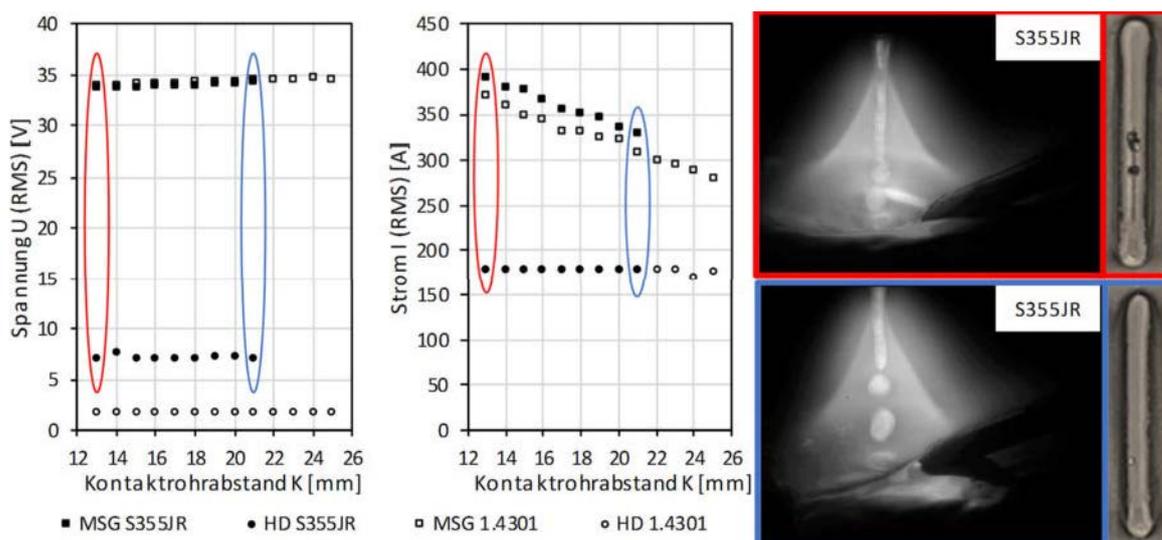


Abbildung 5-5: Einfluss des MSG-Kontaktrahabstandes auf das Prozessverhalten [75]

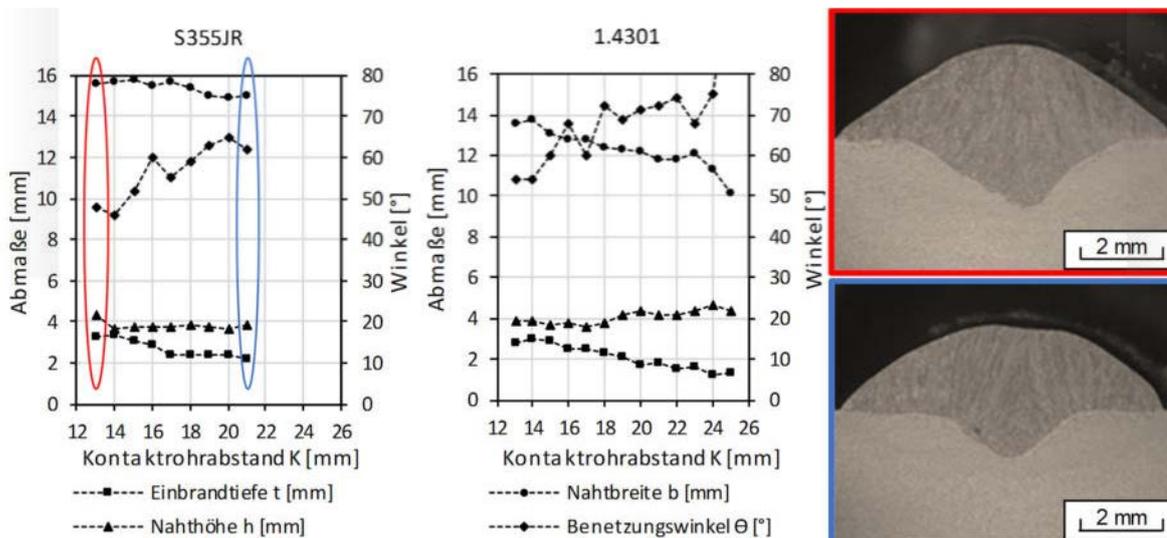


Abbildung 5-6: Einfluss des MSG-Kontaktrahabstandes auf die Nahtausbildung [75]

5.2 Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.4301

Für das Aufstellen der Schweißbereichsdiagramme wurden Blindraupen auf Substrate geschweißt. Die Parameter für die Versuche können der folgenden Tabelle 5-1 entnommen werden. Dabei wurden die Versuche mit der bisher vorhandenen Heißdrahtzufuhr (EWM tigSpeed Drive HW) mit einer maximalen Drahtvorschubgeschwindigkeit von 15 m/min und maximalen Stromstärke von 180 A durchgeführt. Dabei wurden MSG-Drahtvorschub, HD-Drahtvorschub, HD-Stromstärke und der Anstellwinkel der Drahtzufuhr variiert.

Tabelle 5-1: Versuchsparameter für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.4301

Brenner	Abicor Binzel Abirob PP W 500
Drahtzufuhr	Eigene Entwicklung mit vorgelagerter Drahtvorwärmung
Anordnung	Drahtzufuhr ↔ Substrat 30° und 50°
Positionierung HD	in der Lichtbogenachse
Substratgröße	100 mm x 200 mm x 8 mm
Substratwerkstoff	1.4301
Drahtdurchmesser	Ø 1,2 mm (MSG und HD)
Zusatzwerkstoffe	G 19 9 (1.4316)
Lichtbogenart	Sprühlichtbogen
Stromquellen	EWM Titan XQ 500 puls, EWM tigSpeed Drive HW
Schutzgasart	M12 (2,5 % CO ₂ und 97,5 % Ar)
Schutzgasdurchfluss	15 l/min
Spannungskorrektur	0 V
Vorwärm länge	30 mm
Kontaktrohrabstand	20 mm
Schweißgeschwindigkeit	10 mm/s

5.2.1 Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr 30°

Für einen Zuführwinkel des Heißdrahtes von 30° ist anhand der Versuche in Abbildung 5-7 zu sehen, dass für 10 m/min MSG-Drahtvorschub ein großes Prozessfenster aufgespannt werden kann. Der Heißdrahtvorschub kann zwischen 6 m/min und 12 m/min variabel eingestellt werden. Ebenso kann die Heißdrahtstromstärke über einen großen Bereich eingestellt werden. Anhand der Prozessbeobachtungen ist zu sehen, dass sich für geringe und hohe Heißdrahtvorschübe unterschiedliche Werkstoffübergänge einstellen. Während bei 6 m/min ein tropenweiser Übergang des Zusatzmaterials in die Schmelze erfolgt, so ergibt sich bei 12 m/min ein kontinuierliche Schmelzbrücke. Die Art des Werkstoffübergangs kann jedoch noch durch die Wahl der Heißdrahtstromstärke und damit der Vorwärmung des Zusatzdrahtes eingestellt werden. Je höher die Stromstärke und damit die Temperatur des Drahtes bei Verlassen der Vorwärmeinheit, desto eher stellt sich ein tropfenförmiger Übergang ein.

Zuführwinkel = 30°											
$v_{MSG} = 10 \text{ m/min}$	Heißdrahtstrom [A]										
Heißdrahtvorschub [m/min]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
6	Green	Green	Green	Green	Red						
8	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Red				
10		Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green		
12				Red	Green	Green	Green	Green	Green		
15								Red	Red		
$v_{MSG} = 12 \text{ m/min}$	Heißdrahtstrom [A]										
Heißdrahtvorschub [m/min]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
6	Yellow	Green	Green	Red							
8	Red	Green	Green	Green	Red						
10		Red	Green	Green	Green	Red					
12			Red	Green	Green	Green	Red				
15						Red	Yellow	Green	Red		

Abbildung 5-7: Schweißbereichsdiagramme für 30° Zuführwinkel bei 1.4301

Anhand der Untersuchungen für den Zuführwinkel von 30° ist ebenfalls zu sehen, dass das Prozessfenster für 1.4301 mit einem höheren MSG-Drahtvorschub kleiner ist. Dies ist wahrscheinlich auf den höheren Energieeintrag des MSG-Prozesses und damit ein Versagen der Drahtzufuhr zurückzuführen. Diese Ergebnisse sind vor allem eine Indikation dafür, dass die Drahtzuführung zum Prozess verbessert werden muss.

Die Versagensmechanismen sind für alle Untersuchungen gleich. Dabei besteht keine Sensitivität hinsichtlich des Materials oder der geometrischen Einstellbarkeit. Wird der Heißdrahtstrom zu gering, so ist die Temperatur der Schmelze, bestehend aus MSG-Draht und Zusatzdraht zu gering und es treten Nahtunregelmäßigkeiten bis hin zu Humping auf. Ein zu hoher Heißdrahtstrom hat keinen Einfluss auf das Schmelzbad, sondern in diesem Fall ist nur der Zusatzdraht betroffen. Dieser wird durch den zu hohen Strom und die damit verbundene Widerstandserwärmung bis an den Schmelzpunkt des Werkstoffs hinweg erhitzt. Dadurch wird der Draht plastisch verformbar und wird durch den Vorschub innerhalb der Vorwärmeinheit aufgeschoben. Es kommt zum Anhaften des Drahtes in der Vorwärmeinheit und zum Prozessversagen. Die Fehlerbilder können der folgenden Abbildung entnommen werden.

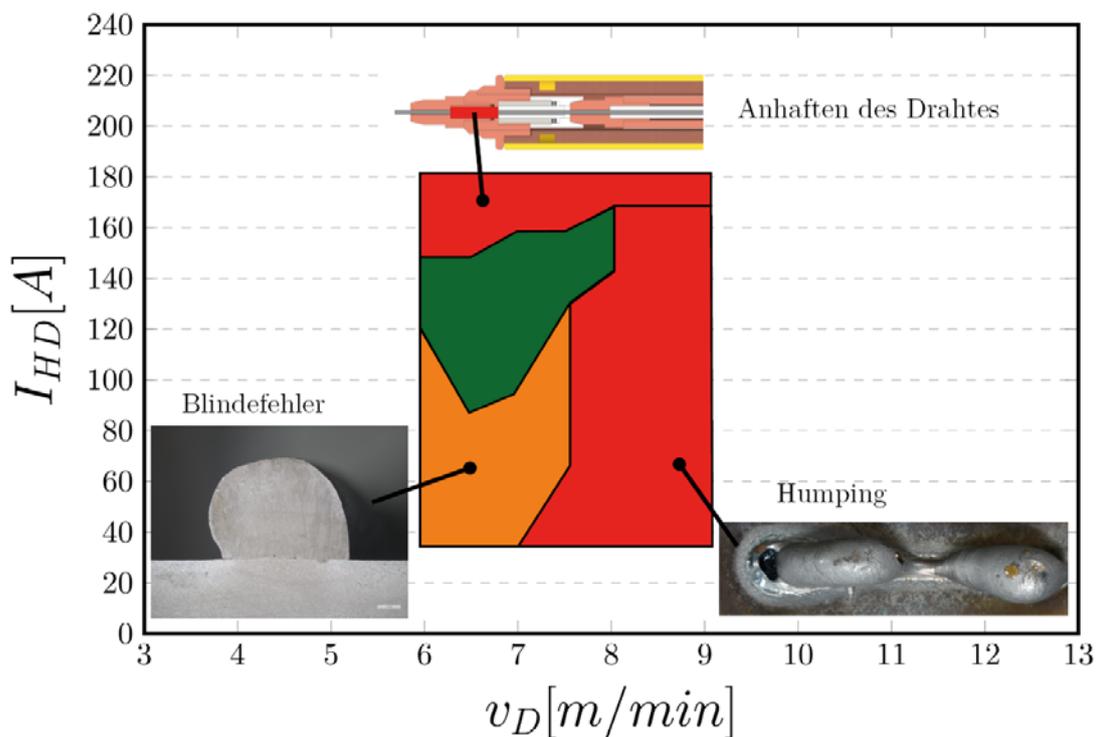
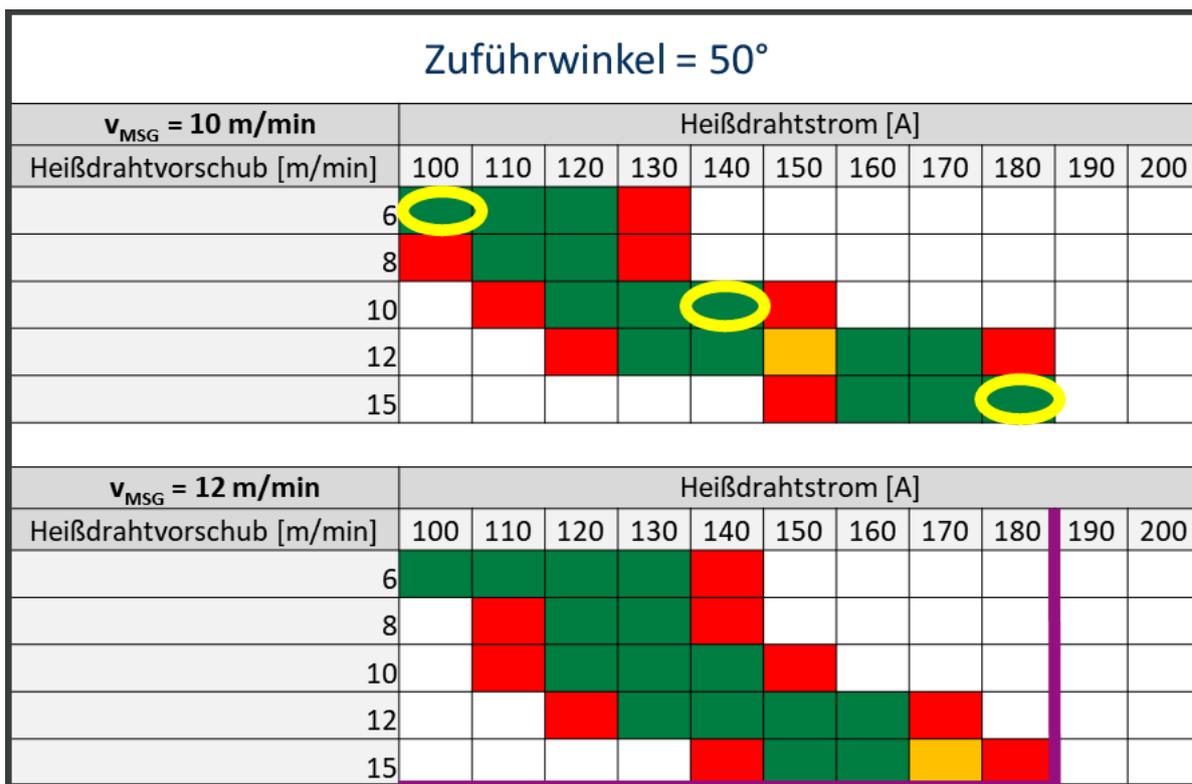


Abbildung 5-8: Darstellung der Versagensarten beim MSG-Heißdrahtprozess

5.2.2 Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr 50°

Für einen Anstellwinkel von 50° der Heißdrahtzufuhr bei 1.4301 kann gesehen werden, dass das Prozessfenster, im Vergleich zu 30° Anstellwinkel kleiner ist. Dies ist wahrscheinlich auf die größere Durchdringung des Heißdrahtes durch den Lichtbogen zurückzuführen. In diesem Fall traten wiederum vermehrt Prozessabbrüche auf, da der Zusatzdraht in der Zufuhr gestockt hat. Durch die Kombination von größerem Energieeintrag in den Draht durch den Lichtbogen und durch höhere Heißdrahtströme, trat ein Prozessversagen auf. Dieses Phänomen geht mit einer höheren Prozessdynamik einher. Daher ist ebenfalls das Prozessfenster für höhere MSG-Drahtvorschübe, im Vergleich zu 30° Anstellwinkel, weniger konsistent. Jedoch ist trotzdem zu sehen, dass im Vergleich zur Literatur für konventionelle Heißdrahtprozesse ein großes Prozessfenster erreicht werden kann.



bisherige Maschinengrenzen

Abbildung 5-9: Schweißbereichsdiagramme für 50° Zuführwinkel bei 1.4301

In den folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 5 10 und Abbildung 5 9) sind das äußere und innere Nahterscheinungsbild, sowie eine Falschfarbendarstellung für die Nahthöhe dargestellt. Dafür wurden repräsentative Ergebnisse mit unterschiedlichen Verhältnissen von MSG- und Heißdrahtvorschub sowie Heißdrahtstrom ausgewählt. Anhand der Darstellungen ist zu sehen, dass für höhere Drahtvorschübe des Heißdrahtes der Einfluss des Zusatzdrahtes zunimmt und der gleichbleibende MSG-Prozess weniger Einfluss auf das endgültige Schweißergebnis hat. Es ist zu sehen, dass durch eine Anpassung der Heißdrahtparameter eine Anpassung der Nahtgeometrie sowohl hinsichtlich Nahthöhe und Nahtbreite, als auch bezüglich des Benetzungswinkels erfolgen kann. Eine dezidierte Beschreibung der Einflüsse der Prozessparameter auf die Nahteigenschaften folgt in Abschnitt 5.4. Aufgrund der gleichen Einflüsse der Prozessparameter auf das Nahterscheinungsbild wurden die tiefgreifenderen Untersuchungen diesbezüglich, in Abstimmung mit dem PA, an Baustahl durchgeführt.



Abbildung 5-10: Äußere Nahtgeometrie für ausgewählte Schweißversuche mit 1.4301

Durchführung und Auswertung der Schweißversuche zur Charakterisierung des Prozessverhaltens / Welding Experiments for Process Characterization

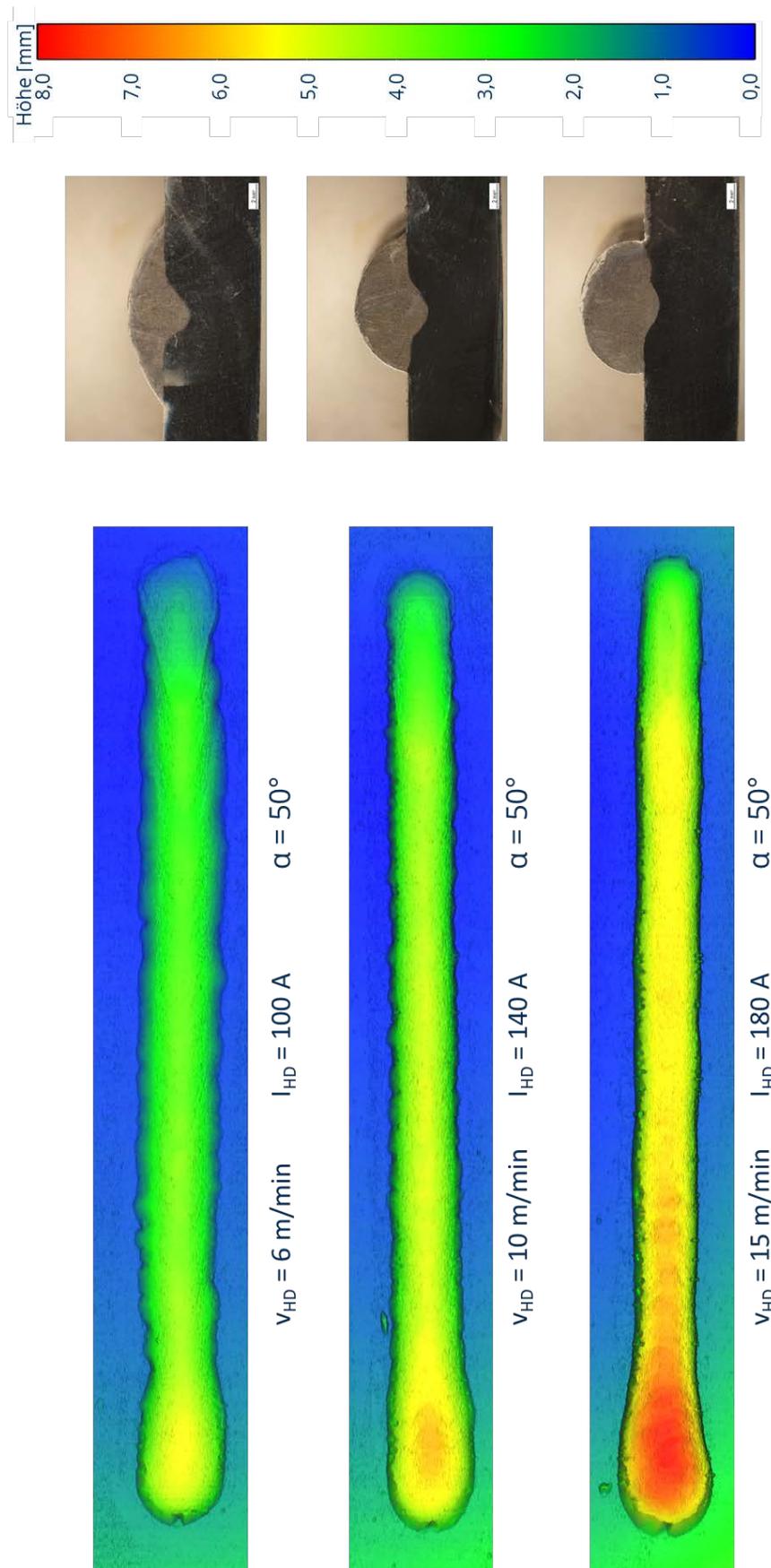


Abbildung 5-11: Höhenprofile und innere Nahtgeometrie für ausgewählte Schweißversuche mit 1.4301

5.3 Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.0045

Für das Aufstellen der Schweißbereichsdiagramme wurden Blindraupen auf Substrate geschweißt. Die Parameter für die Versuche können der folgenden Tabelle 5-2 entnommen werden. Dabei wurden die Versuche mit der neuen Heißdrahtzufuhr (EWM Tetrix 552 HW SCO) mit einer maximalen Drahtvorschubgeschwindigkeit von 24 m/min und maximalen Stromstärke von 500 A durchgeführt

Tabelle 5-2: Versuchsparameter für das Aufstellen von Schweißbereichsdiagrammen bei 1.0045

Brenner	Abicor Binzel Abirob PP W 500
Drahtzufuhr	Eigene Entwicklung mit vorgelagerter Drahtvorwärmung
Anordnung	Drahtzufuhr ↔ Substrat 30° und 50°
Positionierung HD	in der Lichtbogenachse
Substratgröße	100 mm x 200 mm x 8 mm
Substratwerkstoff	1.0045
Drahtdurchmesser	Ø 1,2 mm (MSG und HD)
Zusatzwerkstoffe	G 3 Si 1 (1.5125)
Lichtbogenart	Sprühlichtbogen
Stromquellen	EWM Titan XQ 500 puls, EWM Tetrix 552 HW
Schutzgasart	M12 (2,5 % CO ₂ und 97,5 % Ar)
Schutzgasdurchfluss	15 l/min
Spannungskorrektur	0 V
Vorwärm länge	30 mm
Kontaktrohrabstand	20 mm
Schweißgeschwindigkeit	10 mm/s

5.3.1 Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr 30°

Durch den Einsatz der neuen Heißdrahtstromquelle können im Baustahlbereich sehr große Parameterfenster aufgespannt werden. Anhand der Untersuchungen ist zu sehen, dass i.O. Prozesse über einen breiten Bereich an Heißdrahtvorschub und Heißdrahtstromstärke erzielt werden können. Vor allem im Bereich des äquivalenten MSG-Drahtvorschubs sind sehr viele Parameterkombinationen möglich. Für 30° Anstellwinkel ist zu sehen, dass für einen höheren MSG-Drahtvorschub ein größeres Prozessfenster (bis zu 24 m/min Heißdrahtvorschub) möglich ist. Dies ist auf das größere Schmelzbad und den besseren Prozessablauf durch die neue Stromquelle zurückzuführen. Es können somit Parameter gefunden werden, um den Heißdrahtvorschub vom 0,5-fachen des MSG-Drahtvorschubs bis zum 2,0-fachen einzustellen. Dadurch ist, im Vergleich zum konventionellen Heißdraht ein sehr großes Prozessfenster möglich. Die variable Einstellbarkeit des Heißdrahtstromes stellt wiederum die Unabhängigkeit des Prozesses von der Art des Werkstoffübergangs dar.

ein größeres Parameterfenster möglich ist. Dies ist wahrscheinlich auf den geringeren Einfluss des MSG-Lichtbogens und das einfachere Abschmelzen des Zusatzdrahtes zurückzuführen.

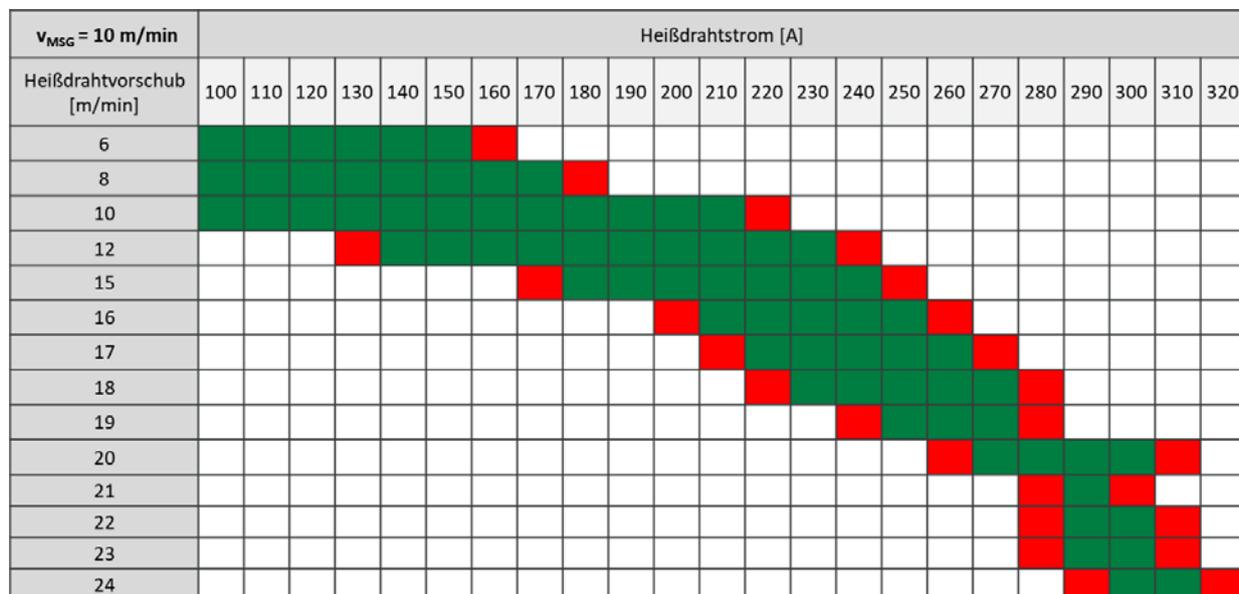


Abbildung 5-14: Schweißbereichsdiagramm für 50° Zuführwinkel und 10 m/min MSG bei 1.0045

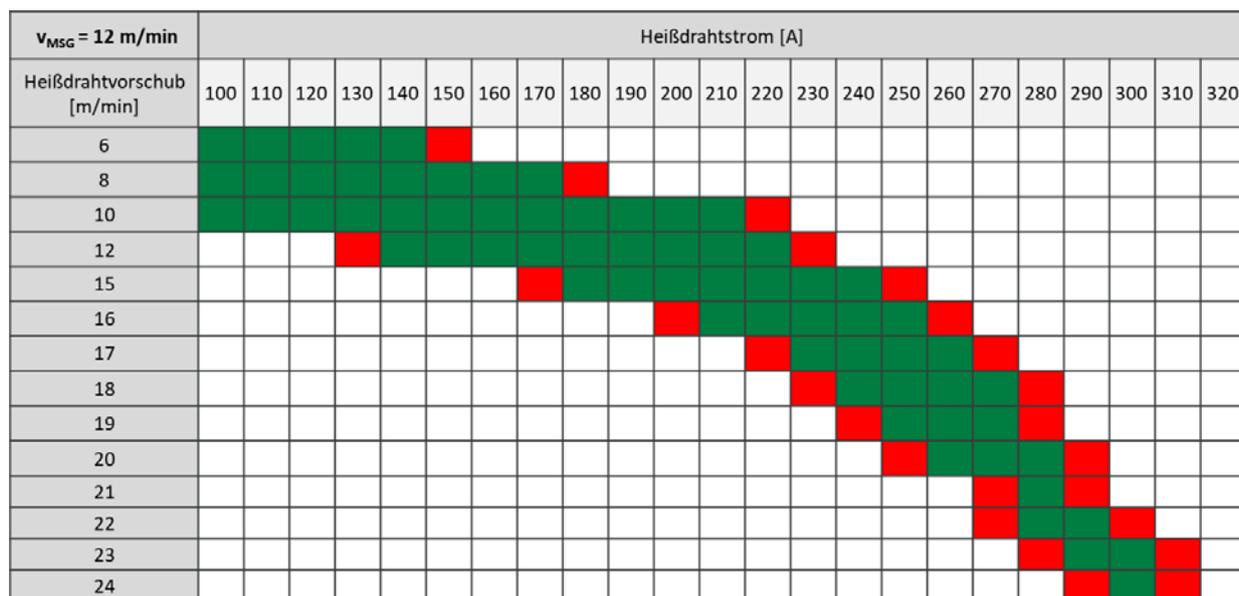


Abbildung 5-15: Schweißbereichsdiagramm für 50° Zuführwinkel und 12 m/min MSG bei 1.0045

5.4 Einfluss der Prozessparameter auf die Schweißnahtausbildung

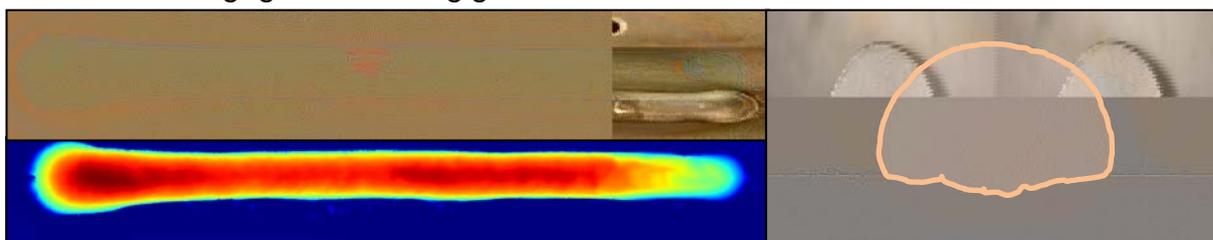
Folgend wird der Einfluss von Heißdrahtstrom, Heißdrahtvorschub, Anstellwinkel und MSG-Vorschub auf Einbrand, Benetzungswinkel, Nahtbreite und Nahthöhe analysiert und erläutert. Auf Foto, Laserscan und Schliffbild werden zwei Schweißproben mit möglichst großer Differenz eines Parameters dargestellt. Die anderen Parameter sind bei beiden Nähten identisch.

Einbrand

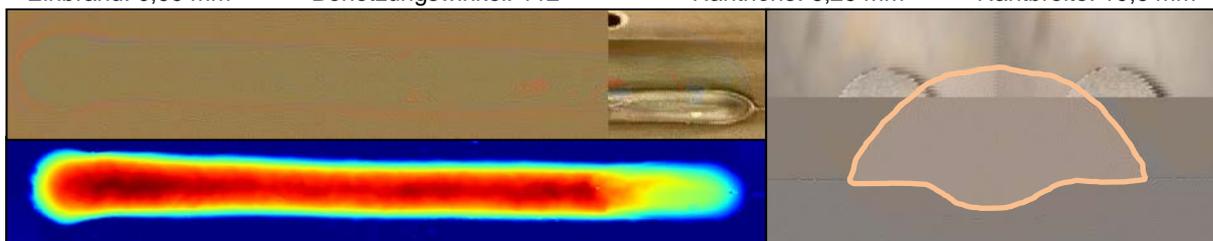
Durch die innere Nahtanalyse konnte ermittelt werden, dass die Einbrandtiefe mit einer Steigerung des Heißdrahtstromes bei konstantem Vorschub zunimmt. Wenn der Zusatzdraht eine höhere Temperatur infolge einer stärkeren Stromerwärmung hat, wird mehr Energie ins Bauteil eingebracht und der Einbrand erhöht. Bei großen Vorschüben ist das nur noch begrenzt umsetzbar, da der Draht aufgrund der erhöhten Dynamik schneller in der Vorwärmeinheit stecken bleibt und die Temperatur des Drahtes stärker begrenzt ist.

Mit einer Steigerung des Heißdrahtvorschubes kann ein gegenläufiger Effekt erzielt werden. Wird mehr Material, bei gleichem Vorwärmstrom, durch den Zusatzdraht ins Schmelzbad eingebracht, sinkt die Temperatur des Schmelzbades und damit der Einbrand.

Eine Steigerung des MSG-Vorschubs bedingt zum einen einen größeren Materialeintrag durch die Elektrode und zum anderen eine Steigerung des Schweißstromes. Letzteres überwiegt bei der Beeinflussung des Heißdrahtes. Der Einbrand steigt mit einer Erhöhung des MSG-Vorschubs. Vom Anstellwinkel ist der Einbrand dahingegen unabhängig.



α : 30°	MSG-Vorschub: 12 m/min	HD-Vorschub: 20 m/min	HD-Strom: 250 A
Einbrand: 0,99 mm	Benetzungswinkel: 112°	Nahthöhe: 6,29 mm	Nahtbreite: 10,6 mm



α : 30°	MSG-Vorschub: 12 m/min	HD-Vorschub: 20 m/min	HD-Strom: 290 A
Einbrand: 1,44 mm	Benetzungswinkel: 68°	Nahthöhe: 5,38 mm	Nahtbreite: 14,1 mm

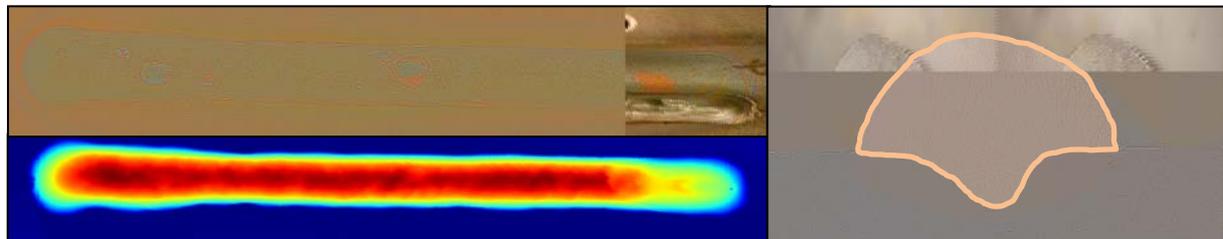
Abbildung 5-16: Einfluss des Heißdrahtstromes auf die Nahterscheinung

Benetzungswinkel

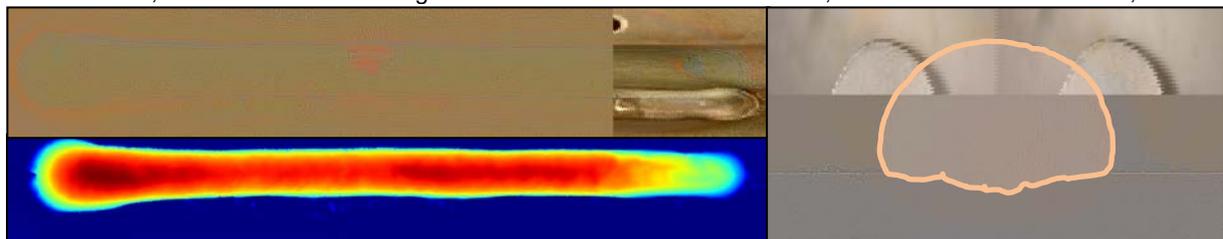
Der Benetzungswinkel verhält sich gegenläufig zum Einbrand. Bei steigendem Heißdrahtstrom wird eine flachere Naht erzeugt und der Benetzungswinkel wird kleiner. Dies ist durch den größeren Energieeintrag zu erklären.

Mit steigendem Heißdrahtvorschub nimmt die Schmelzbadtemperatur ab und die Schweißnaht liegt stärker auf. Große Benetzungswinkel bis zu weiten Überhängen sind die Folge.

Beim MSG-Vorschub ist auch im Zusammenhang zum Benetzungswinkel die Steigerung des Schweißstromes prävalent und der Benetzungswinkel ist bei 12 m/min geringer als bei Versuchen mit 10 m/min. Der Anstellwinkel hat auch auf den Benetzungswinkel keinen Einfluss.

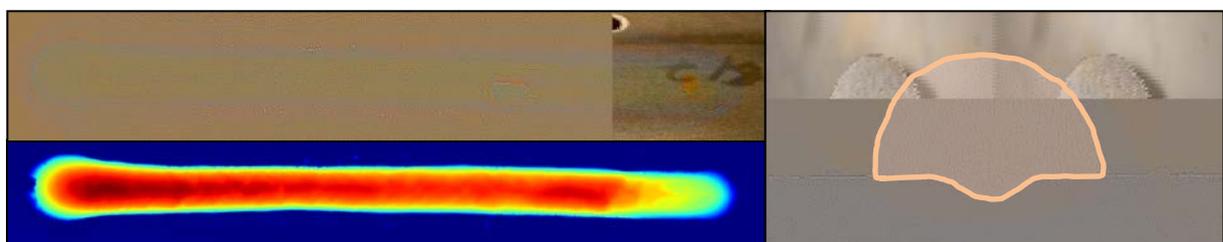


α : 30° MSG-Vorschub: 12 m/min **HD-Vorschub: 16 m/min** HD-Strom: 250 A
Einbrand: 2,75 mm Benetzungswinkel: 85° Nahthöhe: 5,51 mm Nahtbreite: 12,3 mm

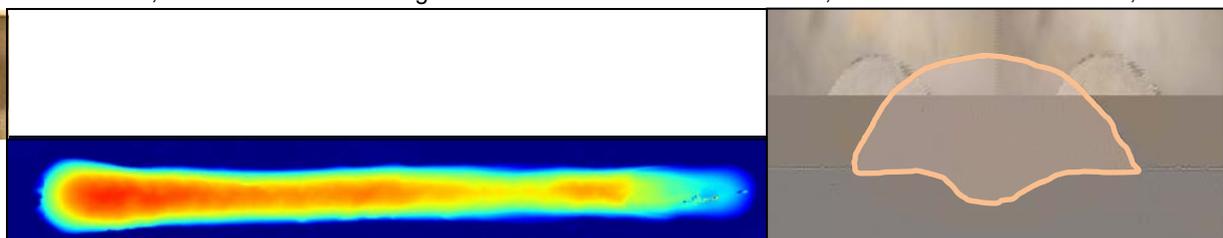


α : 30° MSG-Vorschub: 12 m/min **HD-Vorschub: 20 m/min** HD-Strom: 250 A
Einbrand: 0,99 mm Benetzungswinkel: 112° Nahthöhe: 6,29 mm Nahtbreite: 10,6 mm

Abbildung 5-17: Einfluss des Heißdrahtvorschubs auf die Nahterscheinung



α : 50° **MSG-Vorschub: 10 m/min** HD-Vorschub: 19 m/min HD-Strom: 250 A
Einbrand: 1,1 mm Benetzungswinkel: 95° Nahthöhe: 5,87 mm Nahtbreite: 10,8 mm



α : 50° **MSG-Vorschub: 12 m/min** HD-Vorschub: 19 m/min HD-Strom: 250 A
Einbrand: 1,65 mm Benetzungswinkel: 74° Nahthöhe: 5,46 mm Nahtbreite: 13,8 mm

Abbildung 5-18: Einfluss des MSG-Vorschubs auf die Nahterscheinung

Nahtbreite

Analog zum Einbrand verhält sich die Nahtbreite. Eine Steigerung der Schmelzbadtemperatur durch stärkere Heißdrahtvorwärmung verbreitert die Naht.

Mit geringerer Temperatur infolge von höherem Heißdrahtvorschub oder niedrigerem MSG-Vorschub können schmalere Nähte realisiert werden. Der Anstellwinkel hat auch auf die Nahtbreite keinen Einfluss.

Nahthöhe

Aufgrund der Materialerhaltung müsste die Nahthöhe infolge des Anstiegs von Einbrand und Nahtbreite mit dem Heißdrahtstrom, wie in Abbildung 5-16, sinken. Auf Basis der Messwerte, nur an einer Stelle der Nahtlänge, kann diese Aussage aber nicht sicher getroffen werden. Eine automatische Auswertung der Laserscans konnte im zeitlichen Rahmen der Arbeit nicht erfolgen. Mit der Erhöhung des Heißdrahtvorschubs kann die Nahthöhe vergrößert werden.

Vom MSG-Vorschub und dem Anstellwinkel ist die Nahthöhe unabhängig. Bei den untersuchten Parameterkombinationen hält sich die Erhöhung des Schweißstroms mit der Zunahme an Material durch den größeren Vorschub in Bezug auf die Nahthöhe die Waage.

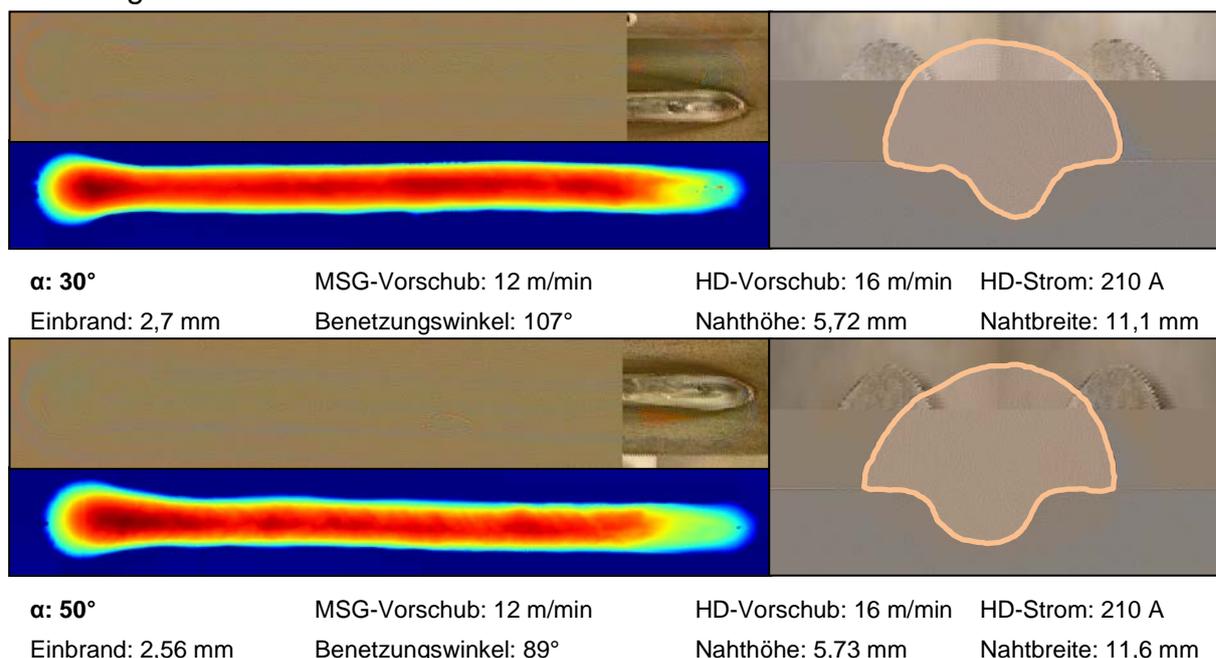


Abbildung 5-19: Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahterscheinung

Aufgrund der großen untersuchten Prozessbreite können die Schlüsse statistisch abgesichert getroffen werden. Zusammenfassend sind die Einflüsse auf die Nahtform in der Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Einflüsse auf äußere und innere Nahtparameter

Einbrand	Benetzungswinkel
<ul style="list-style-type: none"> - Steigt mit HD-Strom - Nimmt mit HD-Vorschub ab - Steigt mit MSG-Vorschub - Unabhängig vom Anstellwinkel 	<ul style="list-style-type: none"> - Nimmt mit HD-Strom ab - Steigt mit HD-Vorschub - Nimmt mit MSG-Vorschub ab - Unabhängig vom Anstellwinkel
Nahthöhe	Nahtbreite
<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängig vom HD-Strom - Steigt mit HD-Vorschub - Unabhängig vom MSG-Vorschub - Unabhängig vom Anstellwinkel 	<ul style="list-style-type: none"> - Steigt mit HD-Strom - Nimmt mit HD-Vorschub ab - Steigt mit MSG-Vorschub - Unabhängig vom Anstellwinkel

Zusammenfassung der Prozesscharakteristik des MSG Heißdrahtprozesses

Allgemein ist festzuhalten, dass der Einfluss der Steigerung des Heißdrahtvorschubs größer ist als der konträre Effekt der Erhöhung des Heißdrahtstromes. Lediglich bei der Beeinflussung der Nahtbreite gleichen sich die Effekte aus. Außerdem kann aus den Versuchsergebnissen geschlossen werden, dass der Prozess bei 50° Anstellwinkel stabiler läuft als bei 30°. Vor allem eine gleichmäßigere Nahtform mit weniger Ausreißern spiegelt sich in den Messwerten wider. Weiterhin ist festzustellen, dass bei hohen Vorschüben bei 30° das geometrische Prozessfenster des Schnittpunktes aus Heißdraht und Elektrode so gering wird, dass ein stabiler Prozess nicht mehr einstellbar ist. Versuche bei 30° und 10 m/min MSG-Vorschub waren nur bis 21 m/min Heißdrahtvorschub möglich und auch davor sind vermehrt Bindefehler aufgetreten.

Eine weiterführende wissenschaftliche Untersuchung der Sensibilität des Prozesses gegenüber der Positionierung des Schnittpunktes aus Heißdraht und Elektrode erscheint sinnvoll. Vor allem für die Verwendung des Verfahrens bei sehr großen Heißdrahtvorschüben bei flachen Winkeln, wenn der Draht durch das Schmelzbad hindurch gefördert wird, und niedrigen MSG-Vorschüben, wenn ein kleineres Schmelzbad vorliegt, ist eine Analyse erforderlich. Dabei sollte auch die Neigung zur Porosität untersucht werden.

Neben der Nahtform wurden bei den Versuchen auch die Prozessgrößen Schweißspannung und Schweißstrom gemessen und analysiert. Dadurch konnte geschlussfolgert werden, dass der MSG-Prozess nicht durch den Heißdraht (Strom, Vorschub und Anstellwinkel) beeinflusst wird.

Aus Prozessbeobachtungen ist ebenfalls zu schließen, dass die obere Prozessgrenze unabhängig vom MSG-Prozess oder vom Anstellwinkel ist. Das Anhaften des Heißdrahts an der unteren SKD (*nicht mögliche* Schweißnaht) wird ausschließlich durch die Stromwärme, welche durch die Kombination aus Heißdrahtstrom und -vorschub beeinflusst wird, bedingt. Bei hohen Vorschüben liegt die Prozessgrenze bei niedrigerem Energieeintrag in den Heißdraht als bei geringen Vorschüben. Dies ist

vor allem durch die höhere Dynamik und daraus resultierenden früheren Ausknicken des Drahtes zu erklären ist. Nichtsdestotrotz ist die Prozessgrenze Schwankungen unterlegen. Verschiedene Einflussfaktoren sorgen für ein variables Verhalten. Dazu gehört die Dressierung des Drahtes, die Führung des Drahtes innerhalb der Vorwärmeinheit und die Oxidation des Drahtes.

Die **Dressierung** hat den positiven Einfluss, dass die Kontaktierung innerhalb der SKD an derselben Stelle stattfindet und damit die Vorwärmstrecke nicht variiert. Jedoch kann eine starke Dressierung oder Biegungen im Draht dazu führen, dass dieser bei hohen Temperaturen und damit einhergehender geringerer Stabilität in der Führung steckenbleibt. Der Einsatz eines Push-Pull Antriebs mit einer Richteinheit oberhalb der Vorwärmeinheit könnte diesem Problem entgegenwirken. Allerdings ist die resultierende Arbitrarität des Kontaktierungspunktes in der SKD zu beachten.

Eine Überarbeitung der **Führung** des Heißdrahtes in der Vorwärmeinheit, vor allem das Vermeiden von Sprüngen im Durchmesser, kann die Drahtzufuhr gleichmäßiger gestalten.

Durch **Oxidation** des Zusatzdrahtes zwischen den SKD wird der Prozess instabiler. Bei der Kontaktierung wird die Oxidschicht abgerieben, was bei langen Schweißvorgängen zum Verstopfen der Führung und damit zum Steckenbleiben des Drahtes führt. Mit der Integration einer Gasspülung in die Vorwärmeinheit ist davon auszugehen, dass sich diese Problematik bei niedrig legierten Stählen vermeiden lässt und den Einsatz von hochlegierten Heißdrähten bei großen Vorwärmströmen ermöglicht.

Eine Überprüfung des Erfolges der vorgeschlagenen Maßnahmen kann in Zukunft zur Reduktion des Versuchsaufwandes aufgrund der Unabhängigkeit ohne den MSG-Prozess erfolgen. Lediglich der Heißdraht müsste durch die geänderte Vorwärmeinheit erwärmt werden.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Nahtform in einem breiten Bereich eingestellt und an die designierte Anwendung angepasst werden kann. Mit Hilfe von drei Einflussgrößen, dem Heißdrahtstrom, dem Heißdrahtvorschub und dem MSG-Vorschub, kann der Einbrand von 0,5 mm bis 3,4 mm, der Benetzungswinkel von 50° bis 130°, die Nahtbreite von 9 mm bis 15 mm und die Nahthöhe von 4,5 mm bis 7 mm variiert werden. Dabei wird die Nahtform nicht durch den Anstellwinkel des Heißdrahtes beeinflusst.

5.5 Energieeintragungsmessungen

Für die Messung des Energieeintrags des Prozesses ins Bauteil wurde der in Abschnitt 4.2 durch SPANIOL entwickelte Versuchsaufbau genutzt. Dieser wurde um die kalorimetrische Messung des Energieeintrags in Brenner und Vorwärmeinheit ergänzt. Während der Schweißversuche wurde der Volumenstrom und die Ein- und Ausflusstemperatur der Kühlung des Bauteils, des MSG-Brenners und der Vorwärmeinheit gemessen. Mit der Gl. 5-1 kann der Wärmefluss, der durch die Kühlung abtransportiert wird, aus der spezifischen Wärmekapazität c , dem Volumenstrom \dot{V} , der Dichte ρ und der Temperaturdifferenz ΔT berechnet werden. In

der Folge wird zur einfacheren Darstellung nur noch der Wärmefluss zur Auswertung verwendet.

$$\frac{Q}{\Delta t} = c * \dot{V} * \rho * \Delta T \quad \text{Gl. 5-1}$$

Die vollständigen Messungen können in Anhang A.1 nachvollzogen werden. Dabei ist zu beachten, dass folgend gemittelte Werte genutzt werden. In der Messung der Bauteilkühlung liegen zyklische Schwankungen des Wärmeflusses vor, welche durch die variierende Nähe des Schweißprozesses zum Ausfluss der Kühlung und damit zur Messstelle bedingt sind. Bei der Messung der Kühlung der Vorwärmeinheit ist der Einsatz des Kühlaggregats zu beachten. Aufgrund der Leitungslänge erreicht neu gekühlte Flüssigkeit den Ausfluss nicht sofort. In der Zwischenzeit ist der Wärmefluss infolge der zu großen Temperaturdifferenz verfälscht.

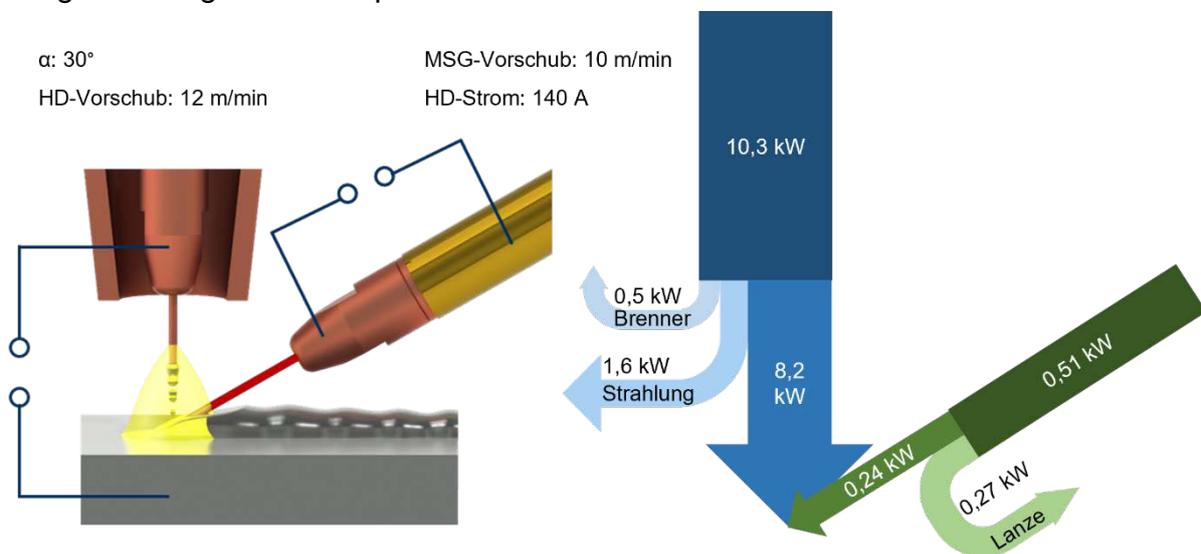


Abbildung 5-20: Sankey Diagramm für die Prozessenergie

Durch die vorliegenden Messungen an Bauteil, MSG-Brenner und Vorwärmeinheit sowie der Dokumentation von Spannung und Strom für den MSG- und den Vorwärmprozess wird der Energieeintrag des Prozesses vollständig betrachtet. In Gl. 5-2 werden die einzelnen Teilenergien zusammengefasst und in Abbildung 5-20 dargestellt. Messdaten bei anderen Versuchskonfigurationen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Kühlung einen idealen Wirkungsgrad hat und Abwärme in andere Bauteile oder an die Luft nicht vorliegen. Dadurch wird der Wert für die Strahlungsenergie leicht überrepräsentiert. Auch die Annahme, dass der Heißdraht aufgrund der vergleichsweise geringen Temperaturen keine Strahlungsenergie aufweist, ist eine Vereinfachung, welche zu einer Unterrepräsentation des Energieeintrags des MSG-Prozesses ins Bauteil führt.

Energieeintrag Bauteil

Bei der Auswertung der Messdaten muss beachtet werden, dass die Umsetzung des äquivalenten Materialeintrags nur mit einer Absenkung der Schweißgeschwindigkeit möglich war und somit eine Vergleichbarkeit bei der Leistung nur begrenzt gegeben ist. Infolge der Einführung der Streckenenergie (s. Gl. 5-3), der Energie über der Nahtlänge, ist der Vergleich möglich. Durch die Messungen der Bauteilkühlung beim

MSG-Prozess ohne Heißdraht wird die, aus der Literatur bekannte, Kopplung aus Energie- und Materialeintrag bestätigt. Der Heißdrahtprozess weist im Vergleich zum materialäquivalenten Prozess einen deutlich reduzierten Wert auf und zeigt, dass die Kopplung von Material und Energie nicht mehr in gleichem Maße vorhanden ist.

$$Q_{MSG} + Q_{HD} = Q_{BT} + Q_{VE} + Q_{BR} + Q_{Str.} \quad \text{Gl. 5-2}$$

$$E = \frac{\dot{Q}_{BT}}{v_s} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Mit dem Heißdrahtstrom steigt der Energieeintrag zwar kontinuierlich an, allerdings ist der Anstieg absolut betrachtet gering, sodass die Variation der Nahtform weitgehend ohne Veränderung des Energieeintrages ins Bauteil möglich ist. Der Anstellwinkel hat dahingegen keinen Einfluss auf den Energieeintrag ins Bauteil. (s. Tabelle 5-4; Streckenenergie)

Der Wirkungsgrad ($\dot{Q}_{BT}/(P_{elMSG} + P_{elHD})$) des MSG-Prozesses liegt ohne Heißdraht mit ca. 75 % unter den Referenzwerten (80 % bis 90 %) der Literatur [48] [86]. Die Abweichung ist durch unterschiedliche Messverfahren und Messunsicherheiten zu erklären. Daher ist die Steigerung des Wirkungsgrades beim Heißdrahtprozess, unabhängig vom Heißdrahtstrom, auf knapp 80 % positiv zu bewerten. Eine mögliche Erklärung ist bei *Ribeiro et al.* [48] zu finden. In der Studie konnte festgestellt werden, dass der Zusatzdraht Energie vom MSG-Lichtbogen aufnimmt, welche anderweitig als Strahlungsenergie verloren gegangen wäre.

Tabelle 5-4: Vollständige Energieeintragsmessung

	v_s	P_{elMSG}	P_{elHD}	\dot{Q}_{Br}	\dot{Q}_{VE}	$\dot{Q}_{BT_{HD}}$	$\dot{Q}_{BT_{MSG}}$	$\dot{Q}_{Str.}$	E
	[mm/s]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[kJ/mm]
kein HD	5	11009		480			7960	2569	15,92
kein HD	10	9572		438			7308	1826	7,31
HD: 30° 140 A	10	10265	513	480	269	243	8164	1620	8,41
HD: 50° 140 A	10	10212	561	480	268	293	8145	1586	8,44
HD: 50° 160 A	10	10034	831	480	327	504	8133	1420	8,64
HD: 50° 190 A	10	10090	1069	480	398	671	8026	1584	8,70

Energieeintrag MSG-Brenner

Am MSG-Brenner wurde der Kühlkreislauf während der Versuche ohne Heißdraht untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Abwärme mit einer Erhöhung des Materialeintrags (geringere Schweißgeschwindigkeit) nur minimal von ca. 440 W auf 480 W ansteigt. Der komplette Messverlauf ist in Anhang A.1 zu finden. Infolge der längeren Schweißdauer bei gleichem Drahtvorschub ist der Wert bei geringerer Schweißgeschwindigkeit statistisch höher abgesichert. Für die Betrachtung der Heißdrahtversuche wird folgend dieser Wert in Höhe von 480 W genutzt. Durch die Isolation von der Gasdüse zur Vorwärmeinheit kann die Gasdüse separat vom Heißdrahtprozess betrachtet werden.

Für die Entwicklung des Demonstrators spielt die Abwärme in den Brenner eine Rolle, jedoch ist der größere Wert in Höhe von 480 W so gering, dass er keine erhöhte Anforderung darstellt.

Energieeintrag Vorwärmeinheit

Der Energieeintrag in die Vorwärmeinheit ist ebenso wie beim Bauteil unabhängig vom Anstellwinkel und steigt mit dem Heißdrahtstrom an. Absolut ist der Wert mit 270 W bis 400 W im betrachteten Bereich gering. Der komplette Messverlauf ist in Anhang A.1 zu finden. In Zukunft ist es denkbar ein in die Heißdrahtstromquelle integriertes Kühlaggregat zu nutzen. Auch für die Demonstratorentwicklung stellt der Wärmeintrag keine kritische Anforderung da.

Aufgrund der geringen Messanzahl ist die Ermittlung eines eindeutigen Verhältnisses zwischen abgeführter Leistung und Heißdrahtstrom nicht möglich. Die aufgenommenen Werte lassen einen linearen Zusammenhang von ca. 2 W/A vermuten (s. Tabelle 5-5). Durch Messungenauigkeiten, einem Grundwärmefluss durch die Differenz zwischen Kühlmitteltemperatur am Eingang und der Umgebungstemperatur oder Schwankungen im Schweißprozess, wird diese Überlegung zusätzlich erschwert. Aufgrund der begrenzten Bearbeitungszeit dieser Arbeit, war eine Validierung des Verhältnisses nicht möglich.

Der Wirkungsgrad des Heißdrahtes steigt mit dem Vorwärmstrom ($1 - (\dot{Q}_{VE}/P_{el_{HD}})$). Bei 140 A werden ca. 50 % der Energie ins Bauteil geleitet, bei 190 A sind es knapp 65 %. Auf Basis der gemessenen Werte kann die Ursache dieser Beobachtung nicht eindeutig ermittelt werden. Mit Untersuchungen des Heißdrahtes ohne den MSG-Prozess können bei verringertem Versuchsaufwand statistisch abgesicherte Werte ohne den Einfluss des Lichtbogens aufgenommen werden. Durch den Wechsel des Kühlaggregats könnte außerdem analysiert werden, ob die beobachteten Werte von einer zu geringen Kühlleistung verursacht werden. Im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit konnten die vorgeschlagenen Überlegungen nicht verfolgt werden.

Tabelle 5-5: Verhältnis Kühlleistung zu Heißdrahtstrom

	$\alpha = 30^\circ$ $I_{HD} = 140 A$	$\alpha = 50^\circ$ $I_{HD} = 140 A$	$\alpha = 50^\circ$ $I_{HD} = 160 A$	$\alpha = 50^\circ$ $I_{HD} = 190 A$
Kühlleistung Vorwärmeinheit/ Heißdrahtstrom [W/A]	1,92	1,91	2,05	2,09

6 Durchführung und Auswertung der Verbindungsschweißversuche / Joint Welding Experiments

Kurzfassung

Die Darstellung des Potentials für das Verbindungsschweißen wird im Rahmen dieses Kapitels anhand von zwei Schweißaufgaben dargestellt. Aufgrund der Relevanz des Prozesses für große Blechstärken werden Verbindungsschweißungen für 8 mm und 20 mm dicke Bleche aus 1.0045 untersucht. Neben der Darstellung der Schweißmöglichkeit werden ebenfalls die mechanisch-technologischen Güteparameter der Verbindung analysiert.

Abstract

The presentation of the potential for structural welding is demonstrated in this chapter through two welding tasks. Due to the significance of the process for thick sheet metal, joint welds for 8 mm and 20 mm thick plates of 1.0045 are examined. In addition to outlining the welding feasibility, the mechanical and technological quality parameters of the joint are also analyzed.

6.1 Experimenteller Aufbau

Die Parameter und Anlagen in der folgenden Tabelle 6-1 wurden für alle Versuche verwendet. Einzelne Parameter wurden für die verschiedenen Untersuchungen angepasst. Die jeweiligen Parameter sind in der Beschreibung der einzelnen Experimente zu finden. Für die Versuche zum Verbindungsschweißen wurden zwei verschiedene Blechdicken untersucht: 8 mm und 20 mm.

Tabelle 6-1: Versuchsparameter für die Untersuchungen Verbindungsschweißen

Schweißposition nach DIN EN ISO 6947	PA
Schweißprozessart	Verbindungsschweißen
Grundwerkstoff	S355JR (1.0045)
Schweißdraht Ø	1,2 mm Massivdraht
Material Schweißdraht	G3Si1 (1.5125)
Schweißstromquelle	EWM Titan XQ 500 Puls
Heißdrahtstromquelle	EWM Tetrix 550 Heißdraht (SCO)
Schutzgas	97,5 % Ar, 2,5 % CO ₂
Durchflussmenge Schutzgas	15 l/min
Substratabmessungen	300 mm x 50 mm x 8 mm 300 mm x 50 mm x 20 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit v_{HD}	Variation
Heißdrahtstrom-Strom I_{HD}	Variation

Durchführung und Auswertung der Verbindungsschweißversuche / Joint Welding Experiments

Heißdraht-Anstellwinkel α	50°
Heißdraht-Kontaktrahabstand zum Werkstück	25 mm
Länge der Heißdraht-Vorwärmstrecke	30 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit MSG v_{MSG}	Variation
Spannungskorrektur	0 V
Polung	Gleichstrom (DC)
Neigungswinkel des Brenners	0° (neutral)
MSG-Kontaktrahabstand	20 mm
Schweißgeschwindigkeit v_w	Variation
Schweißnahtlänge	250 mm
Schweißzeit	Variation

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Nahtvorbereitungen verwendet, um die Unterschiede und die Anwendbarkeit des Verfahrens aufzuzeigen. Alle Nähte wurden als Y-Naht vorbereitet. Die Art der Nahtvorbereitung ist in der folgenden Abbildung 6-1 zu sehen. Die Unterschiede sind aus der nebenstehenden Tabelle ersichtlich. Bei allen Blechen wurde ein technischer Nullspalt eingestellt und durch Heftscheidungen sichergestellt. Für den Schweißprozess wurden die Bleche in einer Vorrichtung eingespannt, um den Verzug zu minimieren. Die Wurzelbildung wurde durch eine keramische Badsicherung sichergestellt. Die Schweißversuche wurden mit dem Heißdrahtstechend und schleppend durchgeführt, um die Art der Nahtbildung zu untersuchen.

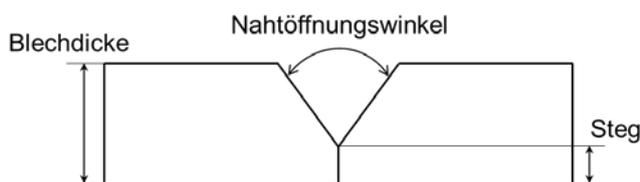


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Y-Naht-Vorbereitung

Tabelle 6-2: Varianten der verschiedenen Nahtvorbereitungen

Nummer	Blechdicke	Nahtöffnungswinkel	Steg
8-60	8 mm	60°	2 mm
8-90	8 mm	90°	2 mm
20-90	20 mm	60°	2 mm

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Verbindungsschweißen von 8-mm Blechen

Auf der Grundlage der von den Autoren durchgeführten Untersuchungen zur Verwendung einer magnetischen Lichtbogenablenkung zur Steigerung der Produktivität beim MSG-Schweißen wurde das Potenzial eines solchen Verfahrens für hochproduktive Schweißverbindungen nachgewiesen. Diese Untersuchungen zeigten, dass 8-mm-Bleche aus 1.0045 mit einer Y-Nahtvorbereitung und einem Steg von 2 mm nicht ohne Badsicherung geschweißt werden konnten. Basierend auf diesen Untersuchungen wird eine keramische Unterlage verwendet, um das MSG-Heißdrahtverfahren zum Verbindungsschweißen zu analysieren. Um auch eine Reduzierung der Schweißnahtvorbereitung zu untersuchen, wurden auch

Schweißversuche mit einer Stumpfnahht ohne Schweißnahtvorbereitung und im Nullspalt durchgeführt. Außerdem wurden verschiedene Winkel der Schweißnahtvorbereitung (60° und 90°) untersucht. Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Abbildung 6-2 dargestellt.

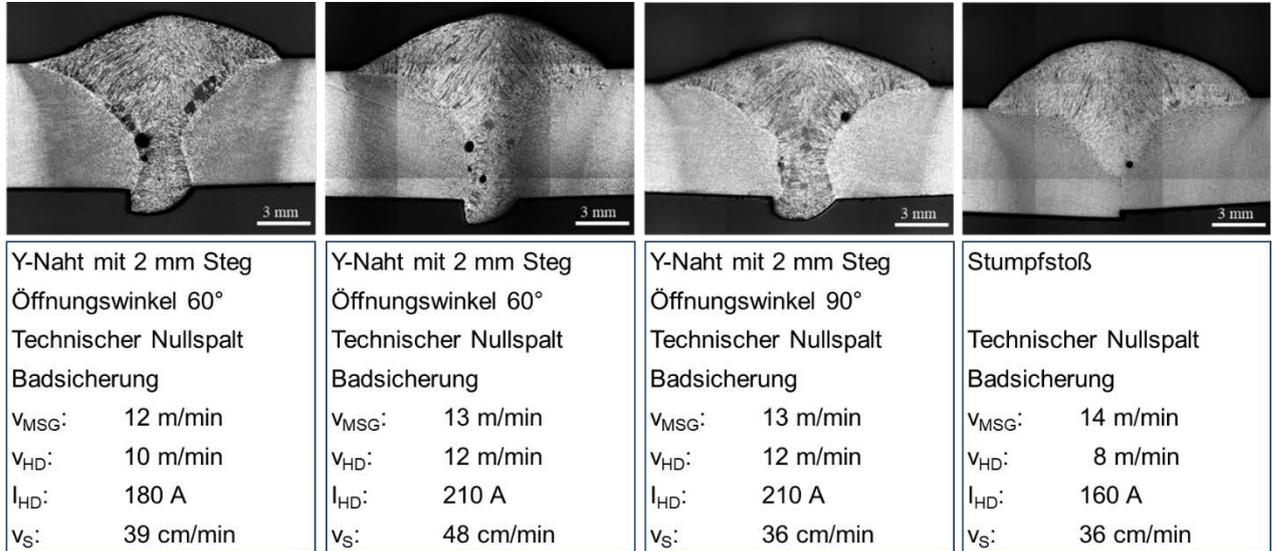


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Verbindungsschweißversuche

Anhand der Ergebnisse in der Abbildung ist zu erkennen, dass eine Verbindungsschweißung ohne Nahtvorbereitung, d.h. im Stumpfstoß, nicht möglich ist, da eine vollständige Durchschweißung nicht erreicht werden konnte.

Für die Nähte, die mit Y-Nahtvorbereitung geschweißt wurden, konnten jeweils Parameter gefunden werden, bei denen ein sicheres Durchschweißen und eine gute Nahtausformung möglich sind. Es zeigt sich, dass Verbindungen mit einem Nahtöffnungswinkel von 60° bei sonst gleichen Parametern mit einer höheren Schweißgeschwindigkeit geschweißt werden können. Dies ist auf das geringere zu füllende Nahtvolumen zurückzuführen. Bei allen Versuchen ist jedoch zu erkennen, dass Poren in der Naht auftreten. Da diese Poren kein akzeptables Schweißergebnis nach DIN EN ISO 5817 darstellen, muss das Verfahren entsprechend angepasst werden. Die Autoren stellten daher die Hypothese auf, dass durch die Verwendung des Heißdrahtes die Schmelzbadtemperatur zu niedrig war und es nicht möglich war, die Schweißnaht rechtzeitig vor der Erstarrung zu entgasen. Um dies zu untersuchen, wurden Schweißversuche mit der gleichen Schweißnahtvorbereitung, aber mit angepassten Parametern durchgeführt. Die folgende Abbildung 6-3 zeigt, dass eine Erhöhung des Energieeintrags in das Bauteil nicht dazu führte, dass die Schweißnaht porenfrei erzeugt werden konnte.

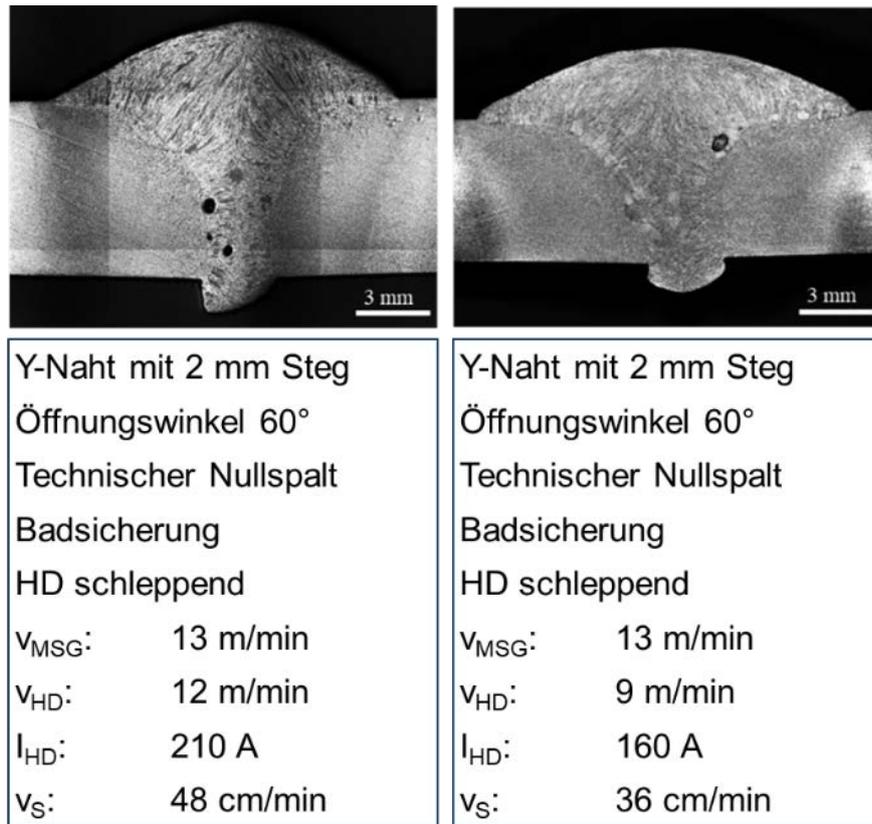


Abbildung 6-3: Ergebnisse der Verbindungsschweißungen bei unterschiedlichen Energieeinträgen

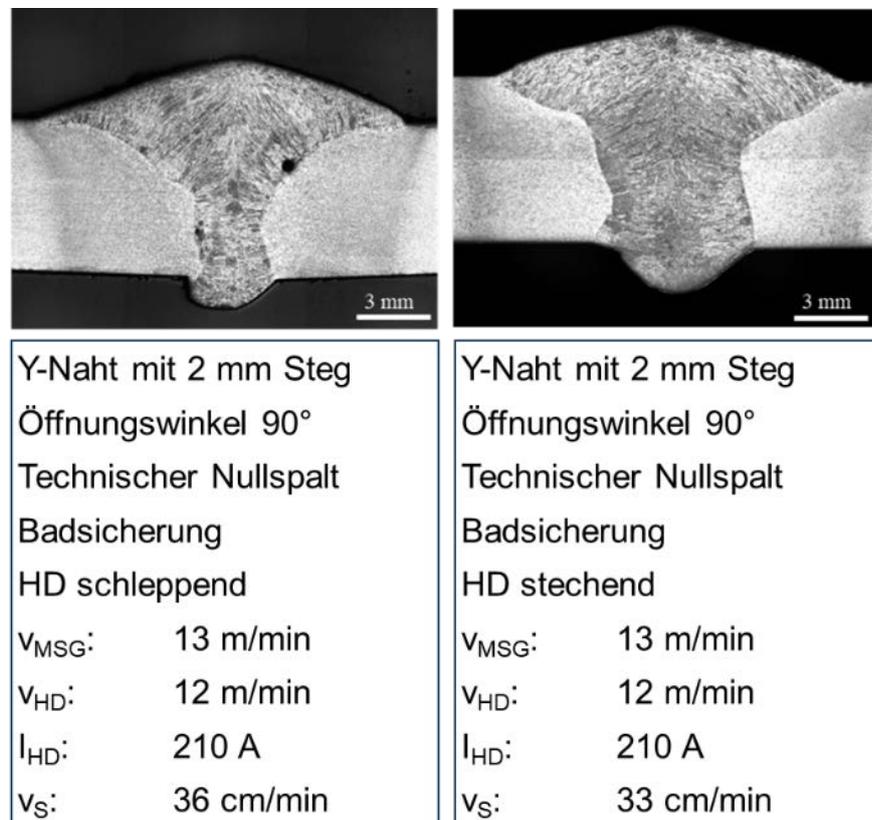


Abbildung 6-4: Ergebnisse der Verbindungsschweißungen für stechenden und schleppenden Heißdraht

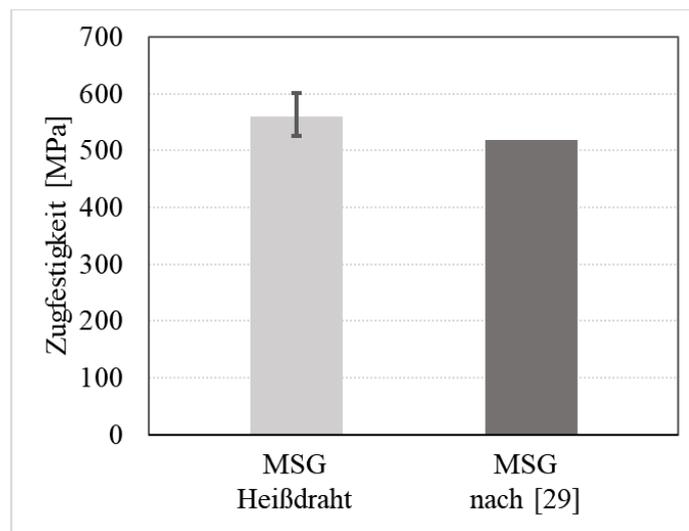


Abbildung 6-6: Ergebnisse der Zugversuche und Vergleich mit [29]

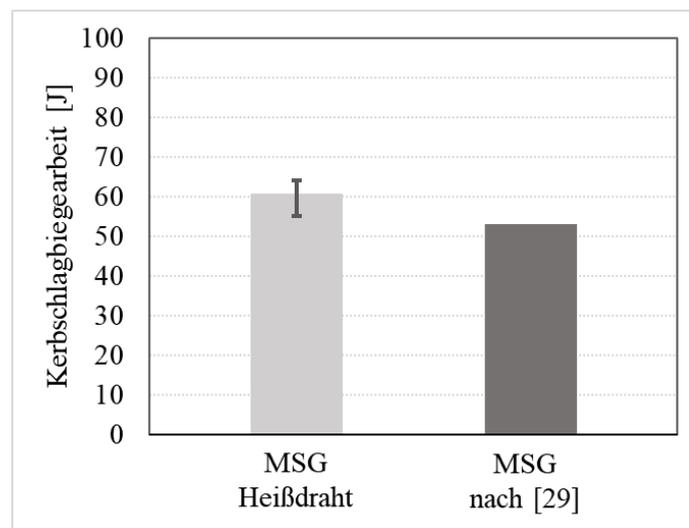


Abbildung 6-7: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche und Vergleich mit [29]

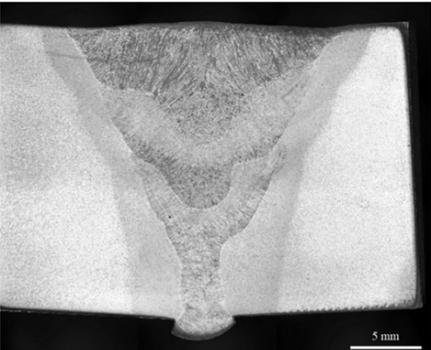
Die Zugversuche nach DIN EN ISO 4136 zeigten ein Einschnürungsverhalten vor dem Versagen, bis schließlich der Gewaltbruch eintritt. Nach DIN EN 10025 - 2 liegt die Zugfestigkeit von 1.0045 für Dicken (t) von mehr als 3 mm zwischen 470 MPa und 630 MPa, was bedeutet, dass die geprüften Proben im normalen Bereich des Grundwerkstoffs liegen. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Dias et al. [98], die einen ähnlichen Stahl (A131 DH36) verwenden, ist die Zugfestigkeit der Heißdrahtschweißnähte etwas höher (558 MPa zu 518 MPa).

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt und können daher mit den Eigenschaften des Grundwerkstoffs verglichen werden ($W \geq 27$ J bei einer Temperatur von 20 °C). In jedem Fall entsprechen die Werte den Spezifikationen eines S355JR (1.0045). Auch beim Vergleich mit den Ergebnissen von Dias et al. [29] zeigt sich, dass die Heißdrahtschweißungen eine etwas höhere Kerbschlagenergie aufweisen (61 J zu 53 J). Die Versuche zeigen, dass das MSG-Verfahren mit einem vorgewärmten Heißdraht in der Lage ist, Verbindungen von sehr guter Qualität herzustellen. Sowohl die Zugfestigkeit als auch die Kerbschlagenergie

liegen im gleichen Bereich wie bei konventionellen MSG-Schweißnähten, jedoch mit einer Schweißgeschwindigkeit von 330 mm min^{-1} mit einer Lage. Im Vergleich zu den Versuchen von Dias et al. [98] mit einem konventionellen MSG-Verfahren (zwei Lagen bei 120 mm min^{-1} und 160 mm min^{-1}) lässt sich die Schweißzeit bei Verwendung des MSG-Heißdrahtverfahrens um etwa 80 % reduzieren. Mit Hilfe des Zusatzdrahtes ist eine Abschmelzleistung von $13,5 \text{ kg h}^{-1}$ möglich, wobei noch gute Nahteigenschaften erreicht werden.

6.2.2 Verbindungsschweißen von 20-mm-Blechen

Um das Potenzial des Verfahrens auch für größere Blechdicken zu untersuchen, wurde ein Parametersatz zum Fügen von zwei Blechen mit einer Dicke von 20 mm untersucht. Der verwendete Werkstoff war wieder 1.0045 (S355JR). Die Nahtvorbereitung war eine Y-Naht mit einem Steg von 2 mm und einem Nahtöffnungswinkel von 60° und einem Nullspalt. Dieser Parameter sollte auch einen weiteren Vorteil des Verfahrens demonstrieren. Durch die Verwendung eines Heißdrahtes kann die Wurzellage mit dem konventionellen MSG-Verfahren und in der gleichen Aufspannung geschweißt werden. Das Schweißergebnis und die einzelnen Parameter der Lagen sind in der folgenden Abbildung 6-8 zu sehen.



Parameter	1. Lage	2. Lage	3. Lage
V_{MSG}	12 m/min	12 m/min	12 m/min
V_{HD}	-	12 m/min	12 m/min
I_{HD}	-	200 A	200 A
v_s	30 cm/min	30 cm/min	30 cm/min
Wartezeit	-	5 min	5 min

Abbildung 6-8: Ergebnisse der Versuche zum Verbindungsschweißen von 20 mm dicken Blechen

Die Ergebnisse in Abbildung 6-8 zeigen, dass der Prozess auch für große Blechdicken ein hohes Potenzial aufweist. Das untersuchte Blech mit einer Dicke von 20 mm kann mit 3 Lagen geschweißt werden. Es wurde eine Wartezeit zwischen den Lagen von 5 min eingestellt. Die erste Lage wurde ohne Zusatzdraht geschweißt, die zweite und dritte Lage mit einer Abschmelzleistung von jeweils 13 kg h^{-1} unter Verwendung des Zusatzdrahtes. Im Querschnitt sind in der Wurzellage vereinzelte Poren zu erkennen, was auf die veränderte Schutzgasströmung aufgrund der großen Blechdicke zurückzuführen sein dürfte. Für weitere Versuche sollte eine Anpassung der Schutzgasdüse in Betracht gezogen werden. Insgesamt hat das MSG-Verfahren mit vorgewärmtem Heißdraht ein großes Potenzial für das Verbindungsschweißen großer Blechdicken.

6.3 Zusammenfassung der Möglichkeit zum Verbindungsschweißen mit dem MSG Heißdrahtprozess

- Bei der Verwendung eines schleppenden Heißdrahtes für das Verbindungsschweißen ist das Verfahren anfällig für Poren, die wahrscheinlich auf eine nicht ideale Schutzgasabdeckung zurückzuführen sind. Ein Wechsel der Heißdrahtzuführrichtung zu einem stechenden Draht gleicht diese Probleme aus, und eine gute Verbindung ist möglich. Dies wurde für Bleche von 8 mm 1.0045 ermittelt.
- Die Versuche zeigen, dass mit dem MSG-Heißdrahtprozess sehr gute Verbindungseigenschaften für Bleche aus 8 mm Baustahl hergestellt werden können. Mit Hilfe des Zusatzdrahtes ist eine Abschmelzleistung von $13,5 \text{ kg h}^{-1}$ möglich, wobei dennoch gute mechanische Eigenschaften erreicht werden.
- Mit Hilfe des MSG-Heißdrahtprozess ist es auch möglich, dicke Bleche effizient zu schweißen. Die Versuche zeigen, dass bei der verwendeten Nahtvorbereitung 3 Lagen erforderlich waren, um 20 mm dicke Bleche zu verbinden. Aufgrund der Prozesskonfiguration kann die Wurzellage mit konventionellem MSG hergestellt werden, ohne dass die Anlage modifiziert werden muss.

7 Entwicklung eines Demonstrators mit in die Gasdüse integrierter Drahtzufuhr / Development of a demonstrator with integrated wire feed

Kurzfassung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist ebenfalls die Untersuchung des Einflusses steiler Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr auf die Nahtausbildung. Da Winkel größer 50° mit bisher vorhandener Anlagentechnik nicht möglich sind, wird im Rahmen dieses Kapitels ein Demonstrator entwickelt, der steilere Anstellwinkel zulässt. Durch die Integration der Drahtzufuhr in die Gasdüse, soll diese möglichst kompakt einsetzbar sein. Dafür werden anhand der Anforderungen und Randbedingungen Demonstratorkonzepte aufgebaut, welche anschließend diagnostisch untersucht werden. Basierend auf den Ergebnissen wird der hergestellte Demonstrator optimiert und hinsichtlich der Eignung des Prozesses untersucht.

Abstract

The objective of this research project also includes investigating the influence of steep wire feed angles on seam formation. Since angles greater than 50° are not feasible with existing equipment, a demonstrator is developed in this chapter to allow for steeper wire feed angles. By integrating the wire feed into the gas nozzle, it is intended to be as compact as possible. To achieve this, demonstrator concepts are developed based on requirements and constraints, which are subsequently diagnostically examined. The produced demonstrator is then optimized based on the results and evaluated regarding the suitability of the process.

Eine Weiterentwicklung des MSG-Heißdrahtverfahrens mit vorgelagerter Drahterwärmung soll über die in Abschnitt 5 ermittelten SBD hinaus für höhere Anstellwinkel erfolgen. Erkenntnisse aus der Literatur bei vergleichbaren Prozessen [62] [69] lassen bei steileren Anstellwinkeln ein größeres Prozessfenster mit niedrigerer Richtungsabhängigkeit erwarten. Bei Anstellwinkeln ab ca. 60° (s. Abbildung 7-1) kollidiert jedoch in der verwendeten Anordnung die untere SKD der Vorwärmeinheit mit der Gasdüse des MSG-Brenners. Demzufolge ist die Entwicklung eines Demonstrators für steile Winkel erforderlich. Aus der Auflistung der Anforderungen und Rahmenbedingungen werden prinzipielle Konzepte und schließlich umsetzbare Konstruktionen entworfen. Zuletzt wird der Demonstrator mit den Diagnostikverfahren analysiert und bewertet.

7.1 Beschreibung der Randbedingungen und Anforderungen

Durch Untersuchung der Konstruktionsaufgabe, einen richtungsunabhängigen Demonstrator in die bestehende Anlage und den vorgesehenen Prozess zu integrieren, werden im Folgenden die notwendigen Arbeitspakete und die

Anforderungsliste an den Demonstrator dokumentiert. Die Liste kann in Anhang A.2 eingesehen werden. In den drei Themengebieten **Randbedingungen**, **Düse geometrisch** und **Düse technologisch** werden Anforderungen identifiziert und nach der Verbindlichkeit [99] eingeteilt. Forderungen, welche auf jeden Fall erfüllt werden müssen, werden hinsichtlich ihrer Quantifizierung unterteilt. Festforderungen (FF) müssen einen definierten Wert erreichen, Mindestforderung (MF) haben einen Grenzwert zu über- oder unterschreiten und Richtforderung (RF) sollen die Anforderung möglichst stark ausfüllen. Demgegenüber stellen Wünsche (W) optionale Eigenschaften dar, welche erstrebenswert, jedoch nicht obligatorisch sind.

Randbedingungen

Zur Festlegung der Rahmenbedingungen für den Demonstrator muss als erstes die bisher bestehende Konstruktion (s. Abbildung 7-1) analysiert werden. Vom MSG-Brenner ist lediglich die Gasdüse (Pos. 2) kritisch. Die weiteren Komponenten des Brenners und deren Funktion wurden bereits in Kapitel 4.2 beschrieben. Für die Entwicklung des Demonstrators sollen sie unverändert aus der bestehenden Konfiguration übernommen werden, da sie bei einem geänderten Anstellwinkel keine Kollision erzeugen würden. Am Brennerhals (Pos. 1) wird die Gasdüse durch ein isoliertes Gewinde angebracht und muss für den Demonstrator aufgrund der Kollision mit der Vorwärmeinheit (Grenzwinkel in Abbildung 7-1 dargestellt) ersetzt werden.

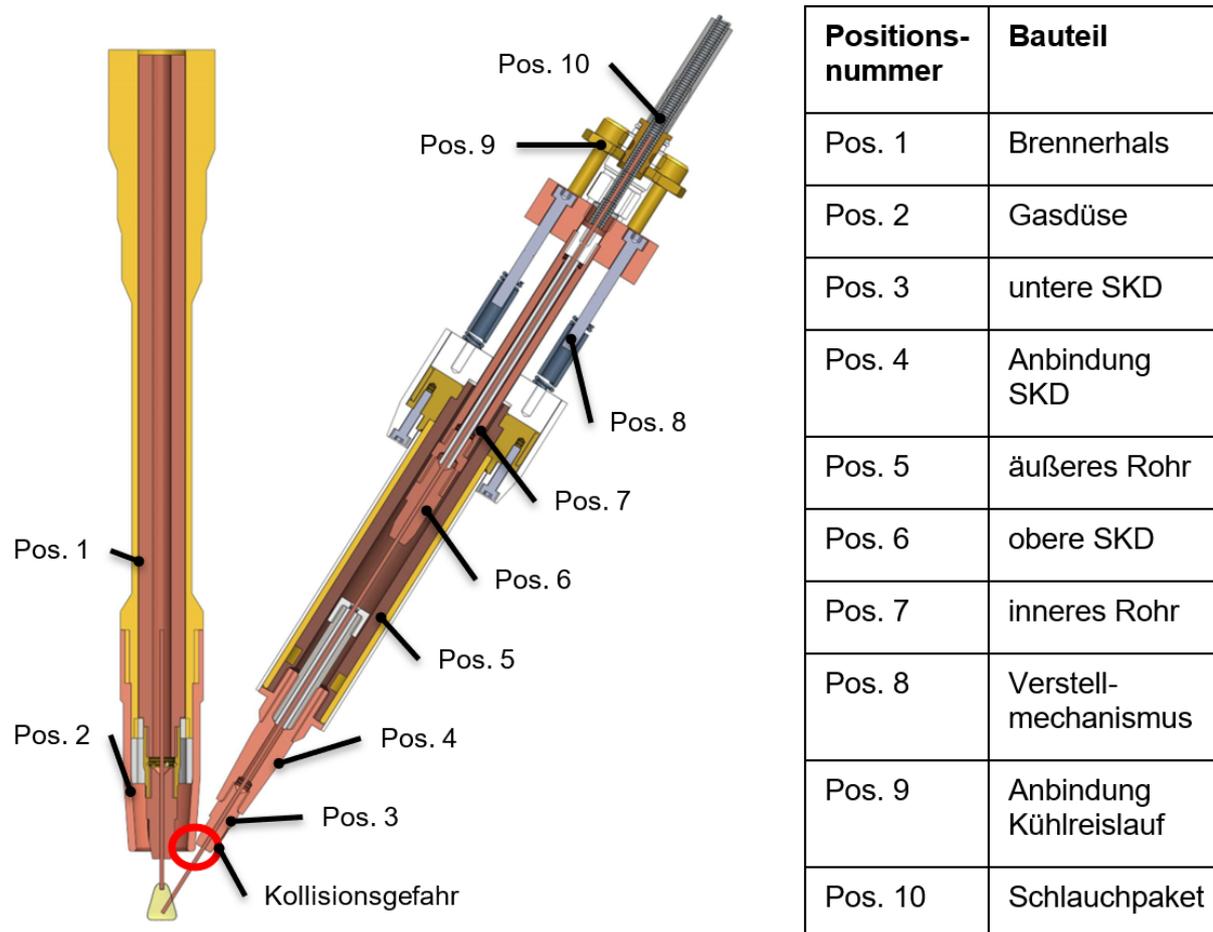


Abbildung 7-1: Anordnung bis 60° bei kritischem Winkel

Über ein Schlauchpaket (Pos. 10) wird die Vorwärmeinheit aus der Stromquelle und dem Kühlaggregat mit Leistung, Draht und Kühlwasser versorgt. Die Kontaktierung erzeugt an der oberen SKD (Pos. 6) den Pluspol und an der unteren SKD (Pos. 3) den Minuspol. Um einen Kurzschluss innerhalb der Vorwärmeinheit zu verhindern, ist das innere Rohr (Pos. 7) gegenüber dem äußeren (Pos. 5) isoliert. Zwischen den beiden SKD befindet sich die Vorwärmstrecke. Durch die ohmsche Erwärmung (s. Kapitel 2.4.2) wird der zentral geführte Draht auf stark erhöhte Temperaturen gebracht. Der Verstellmechanismus (Pos. 8) der Vorwärmstrecke spielt für diese Arbeit keine Rolle. Um den Draht möglichst prozess- und verschleißsicher zu führen, wird in der Aufnahme der unteren SKD (Pos. 4) ein Isolationseinsatz montiert, der zufälligen Kontakt zwischen Außenrohr und Draht und damit verbundenes Aufschmelzen des Drahtes in der Vorwärmeinheit unterbindet. Die bei der Erwärmung anfallende Abwärme wird über zwei separate Kühlkanäle im inneren und äußeren Rohr abtransportiert. Beide Kühlkreisläufe werden an Pos. 9 angeschlossen und vom selben Aggregat gekühlt.

Die Positionierung der Vorwärmeinheit zum Brenner wird über eine separate Befestigung am Portal umgesetzt, welche sich mit dem Brenner mitbewegt. So können viele Parameterkombinationen abgedeckt werden, jedoch ist die Anbindung zu instabil, um die Zusammenführung von Brenner und Vorwärmeinheit in der gemeinsamen Gasdüse im Prozess sicher zu gewährleisten. Für den Demonstrator soll die Vorwärmeinheit direkt mit dem MSG-Brenner verbunden werden.

Auf eine stärkere Integration der Vorwärmeinheit soll für diesen Demonstrator zu Gunsten einer kostengünstigeren und schneller herstellbaren Variante verzichtet werden. Anpassungen sollen sich auf die untere SKD oder deren Aufnahme beschränken, sodass Wasserkühlung, Drahtführung und Stromfluss wie beschrieben ablaufen.

Geometrische Anforderungen

Im Folgenden werden die geometrischen Anforderungen zum Einsatz einer gemeinsamen Gasdüse analysiert. Dabei steht die Anbindung der Vorwärmeinheit an den MSG-Brenner im Vordergrund, welche bei drei verschiedenen Anstellwinkeln, 70°, 65° und 60°, möglich sein soll. Um unterschiedliche Versuche möglichst schnell hintereinander durchzuführen, sowie bei Verschleiß die Düsen wechseln zu können, ist eine geringe Wechselzeit von maximal 2 min gefordert. Für die Vergleichbarkeit der Schweißergebnisse nach einem Düsenwechsel ist eine hohe Positionierwiederholgenauigkeit erforderlich. Die Position des Schnittpunktes aus Elektrode und Heißdraht soll deshalb nach der erneuten Montage absolut nicht mehr als 0,5 mm abweichen. Der Kontaktrahabstand soll 20 mm betragen. Um ein zentrales Eintauchen ins Schmelzbad zu ermöglichen, soll der Schnittpunkt aus Elektrode und Heißdraht 25 mm hinter der unteren SKD der Vorwärmeinheit und ca. 18 mm unter der SKD des MSG-Brenners liegen. Dieser Schnittpunkt ergibt sich aus der bisher genutzten und in Voruntersuchungen optimierten Konfiguration.

Technologische Anforderungen

Technologisch stehen vor allem der Gasfluss, die Verwendung und die Herstellung der Düse im Fokus. Um einen Prozess mit wenigen Nahtfehlern zu ermöglichen, soll nach *Dreher* [80] eine Sauerstoffkonzentration unterhalb der Düse von 50 ppm mit einem Lichtbogen erreicht werden. Ohne einen Lichtbogen soll die Abdeckung real gemessen im Bereich der bisher genutzten Gasdüse liegen. Dies soll erreicht werden, indem die Gasströmung innerhalb der Düse möglichst laminar gestaltet wird. Dafür dürfen in der Düse keine zu kleinen oder ungleichmäßigen Strömungsquerschnitte vorhanden sein. Auch Toträume sollen vermieden werden, um die Wirbelbildung nicht zu begünstigen.

Die Richtungsunabhängigkeit kann in der additiven Fertigung nur zum Tragen kommen, wenn der Schweißprozess an jeder Stelle des zu fertigenden Bauteils ausgeführt werden kann. Diesbezüglich ist eine hohe Zugänglichkeit und damit schlanke Gestaltung des Demonstrators entscheidend. Aus den Ergebnissen der Energieertragsmessung (Kapitel 5.5) wird deutlich, dass eine Kühlung der Düse nicht separat zu den bestehenden Kühlkreisläufen in dem Brenner und der Vorwärmeinheit benötigt wird. Zusätzlich ist für die Bedienbarkeit das Verschleißverhalten relevant. Während des Schweißprozesses nutzen sich verschiedene Teile am Brenner ab. Besonders an der unteren Kante und Innenseite der Gasdüse und der unteren SKD der Vorwärmeinheit sowie der SKD im MSG-Brenner sorgen Spritzer, hohe Temperaturen und Reibung für Abnutzung [80]. Die Zugänglichkeit dieser Stellen sowie die Möglichkeit des Austauschs bei Verschleiß verbessern die Einsatzbedingungen und werden als Wunsch in die Anforderungen übernommen.

Zuletzt sollen bei der Entwicklung der Düse die Herstellbarkeit möglichst einfach und die Herstellkosten möglichst gering gestaltet werden. Da es sich um Prototypen handelt, wird die Anforderung als Wunsch kategorisiert. Grundsätzlich ist auf eine kostenoptimierte Herstellung zu achten.

7.2 Entwicklung der prinzipiellen Lösung und konstruktive Ausgestaltung

In diesem Unterkapitel werden die beiden Schritte *Entwicklung der prinzipiellen Lösung* und *Entwicklung und Ausgestaltung der Baustruktur* betrachtet. Zuerst werden unabhängige Funktionen identifiziert, welche der Demonstrator erfüllen muss, um die Anforderungen zu erfüllen. Anschließend können Optionen (Teillösungen) den einzelnen Funktionen zugeordnet werden. Im Morphologischen Kasten [99] (s. Tabelle 7-1) werden die Teillösungen (Spalte 2-4) den Funktionen (Spalte 1) zugeordnet. Aus den theoretisch möglichen Teillösungen werden dann Gesamtlösungen zusammengefügt. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass sich die Optionen sinnvoll kombinieren lassen und wenn möglich Synergien erzeugen. Zuletzt werden die Gesamtlösungen zu umsetzbaren Prototypen auskonstruiert.

Identifikation Teilfunktionen und -lösungen

Drei Teilfunktionen sind zur Erfüllung der Anforderungen der Rahmenbedingungen und geometrischen Anforderungen notwendig. Erstens muss der Demonstrator an die

weiteren Bauteile des MSG-Brenners (*Anbindung Brenner*) angebunden werden. Neben der Verschraubung des bestehenden Gewindes mit einem Gewinde im Demonstrator, ist das Klemmen des Demonstrators am Brennerhals (Pos. 1; Abbildung 7-1) möglich. Außerdem kann der Demonstrator an eine verkürzte Version der Standardgasdüse angelötet werden.

Zweitens muss die Vorwärmeinheit (*Anbindung Vorwärmeinheit*) mit dem Demonstrator verbunden werden. Für eine Verschraubung muss an der Vorwärmeinheit ein zusätzliches Anschlussgewinde vorgesehen werden. Dafür bietet sich das äußere Rohr (Pos. 5; Abbildung 7-1) oder die Aufnahme der SKD (Pos. 4; Abbildung 7-1) an. Auch ein Klemmmechanismus kann an diesen beiden Teilen umgesetzt werden. Weiterhin steht die Funktionsintegration der Gasdüse mit bestehenden Teilen, prädestiniert die untere Drahtkontaktierung, zur Auswahl.

Drittens muss die Variation des Anstellwinkels (*Verstellbarkeit Anstellwinkel*) gewährleistet werden. Der komplette Wechsel des Demonstrators steht dabei einem austauschbaren fest verbundenen Einsatz, der den Anstellwinkel bestimmt, und einem integrierten, aber beweglichen Einsatz gegenüber.

Tabelle 7-1: Morphologischer Kasten Düsenentwicklung

Lösungen Funktionen	1	2	3
Anbindung Brenner	Schrauben	Klemmen	Löten
Anbindung Vorwärmeinheit	Schrauben	Klemmen	Funktionsintegration
Verstellbarkeit Anstellwinkel	Verschiedene Düsen	Wechselteil	Bewegliches Verbindungsstück
Gasfluss Laminarisierung	Allgemeine Gestaltungsempfehlungen	Zusätzlicher Gasfluss Vorwärmeinheit	Zusätzlicher Gasfluss Hauptströmung
Verschleißschutz	Beschichtung/Spray	Wechselkomponenten	Keine separaten Maßnahmen

●—● schutzgasoptimiert ●—● bauraumoptimiert ●—● verschleißgerecht

Um die technologischen Anforderungen zu erfüllen sind zwei weitere Teilfunktionen erforderlich. Auf die Schutzgasabdeckung (*Gasfluss Laminarisierung*) kann über die allgemeinen Gestaltungsempfehlungen hinaus durch den Einsatz eines zusätzlichen

Gasflusses entlang der Vorwärmeinheit oder parallel zur Hauptströmung [100, 101] Einfluss genommen werden.

Die Gestaltung des Verschleißverhaltens (*Verschleißschutz*) kann durch den Einsatz von Beschichtungen und Antihafsprays [80] oder die Integration von Wechselkomponenten an den prozessnahen Stellen optimiert werden.

Gesamtlösungen

Um die zum Teil widersprüchlichen Anforderungen bestmöglich abbilden zu können, wurden die, in Abbildung 7-2 dargestellten, drei Düsenvarianten mit den folgenden Schwerpunkten zusammengestellt und weiterentwickelt:

Die beste Zugänglichkeit für beliebige Schweißanwendungen und damit ein möglichst großes Einsatzspektrum bei der additiven Fertigung bietet die **bauraumoptimierte Düse**. Ein kleiner Durchmesser wird vor allem durch den Verzicht auf zusätzliche Maßnahmen zur Verschleiß- und Gasflussoptimierung erreicht. Wie auch bei den anderen zwei Varianten wird für die Anbindung am Brenner das bestehende Gewinde genutzt und die Montage der Vorwärmeinheit wird mit Klemmung umgesetzt. Dafür wird die Anbindung der unteren SKD (Pos. 4, Abbildung 7-1) angepasst. Neben der Anpassung der Außenkontur erfolgt auch die Anpassung der Vorwärm länge, um eine Klemmfläche zu generieren. Das Klemmsystem gewährleistet einen schnellen Wechsel der Düsen ohne Anpassung der bestehenden Konstruktionen. Als Resultat können für geänderte Anstellwinkel verschiedene Gasdüsen eingesetzt werden.

Bei der **schutzgasoptimierten Gasdüse** liegt der Fokus auf einer möglichst geringen Sauerstoffkonzentration im Prozessbereich. Eine optimale Abdeckung des Schweißbereichs soll durch eine gleichmäßige Strömung in der Düse infolge eines zusätzlichen Gasflusses entlang der Vorwärmeinheit durch einen Metallschaum, der die Strömung laminar gestaltet, umgesetzt werden. Die weiteren Funktionen werden analog zur bauraumoptimierten Düse konstruiert.

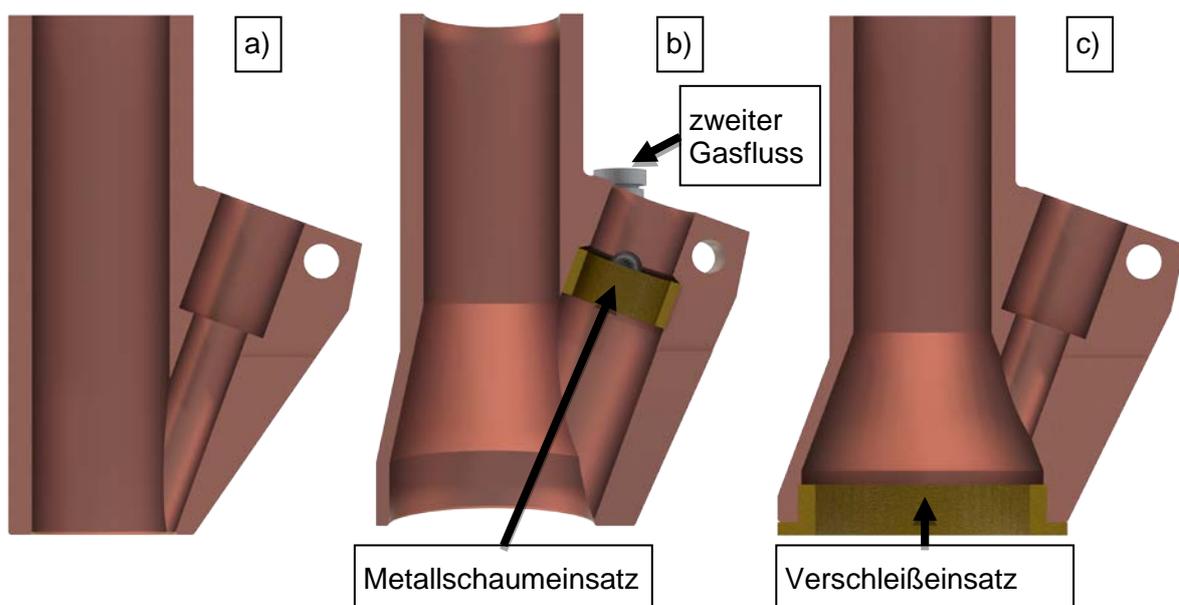


Abbildung 7-2: Demonstratorvarianten: a) Bauraumoptimiert, b) Schutzgasoptimiert, c) Verschleißgerecht

Durch den Einsatz eines Verschleißteils an den am stärksten durch Spritzer und hohe Temperaturen beanspruchten Stellen der Gasdüse (untere Kante und Innenseite) kann die **verschleißgerechte Gasdüse** eine längere Lebensdauer des Basisteils ermöglichen. Das Verschleißteil lässt sich schnell und kostengünstig austauschen. Die weiteren Funktionen werden analog zur bauraumoptimierten Düse konstruiert. Aufgrund des Gewindes in der Düsenöffnung und der bei flachen Winkeln resultierenden Kollision zur Heißdraht-SKD konnte keine Variante für 60° Anstellwinkel konstruiert werden.

Die Integration des Demonstrators aus MSG-Brenner, Vorwärmeinheit und gemeinsamer Gasdüse in den Versuchsaufbau erfolgt durch die Befestigung am Portal mit Kunststoffprismen. So kann eine Isolation gegenüber dem Portal und eine korrekte Ausrichtung der Zusatzdrahtzufuhr in schleppender Position gewährleistet werden. Zusätzlich zur Anbindung über die Gasdüse wird die Vorwärmeinheit durch ein Gestell am Brennerhals ohne Positionsbestimmung, welche zur statischen Überbestimmtheit führen würde, befestigt. Der veränderte Aufbau ist im Anhang A.3 (s. Anhang ebenso wie die technischen Zeichnungen (s. Anhang A.4) der Varianten dokumentiert.

7.3 Diagnostische Untersuchung des Demonstrators

Um eine Bewertung der verschiedenen Varianten vornehmen zu können, wurden die Gasdüsen in einem Sauerstoffkonzentrations- und einem Schlierenmesstand bzgl. der Qualität ihrer Schutzgasabdeckung untersucht. Aus Zeit- und Kostengründen wurde von jeder Variante die Gasdüse mit einem Anstellwinkel von 70° additiv aus Aluminium gefertigt. Dadurch erfolgen die Messungen an der Gasdüsenform, die die besten Eigenschaften für richtungsunabhängiges Schweißen verspricht. Neben den drei neu konstruierten Düsen wird als Referenz eine Standard MSG-Gasdüse der Fa. Binzel untersucht. Aufgrund der geringen thermischen Beständigkeit des Aluminiums (niedrige Schmelztemperatur) sind die additiv gefertigten Düsen allerdings nicht für einen Praxistest geeignet. Nach Auswahl der Vorzugsvariante erfolgt für weitere Untersuchungen die konventionelle Fertigung aus Kupfer.

7.3.1 Durchführung diagnostischer Untersuchungen

Sauerstoffmessung

Zur Aufnahme der Sauerstoffkonzentration an verschiedenen Positionen unterhalb der Gasdüse, wird der Demonstrator auf einem kartesischen Portal oberhalb der Sauerstoffsonde montiert. Diese befindet sich unterhalb einer 0,5 mm Bohrung in einer Kupferplatte. Es erfolgt eine Untersuchung der Kaltgasströmung, die einen relativen Vergleich zwischen den Varianten ermöglicht. Somit brennt kein Lichtbogen während der Messungen und es muss keine Stromquelle (Leistung, Draht und Kühlung) angeschlossen werden. Um eine hohe Realitätsnähe zu gewährleisten, werden stationäre Drahtenden für die MSG-Elektrode und den Zusatzdraht implementiert. Als Schutzgas wird günstiges Argon verwendet, das über einen direkt auf der Gasflasche montierten Druckminderer auf einen Vordruck von 2 bar reduziert wird. Dann wird das Gas durch einen Durchflussregler auf den geplanten

Volumenstrom geregelt und der Gasdüse zugeführt. Beim Einsatz der gasflussoptimierten Düse kommt ein zweiter Durchflussregler zum Einsatz, der über ein Y-Stück parallel zum ersten geschaltet wird.

Die Untersuchung der Sauerstoffverteilung wird in drei Stufen geführt. Zuerst erfolgen Punktmessungen, dann Linienmessungen und zum Schluss eine Flächenmessung. Dadurch wird am Anfang ein großer Parameterbereich getestet und die größte Informationsdichte muss lediglich für den optimalen Bereich erhoben werden.

Für die **Punktmessung** wird der Demonstrator direkt über der Sondenbohrung platziert und analog zum vorgestellten Vorgehen wird ein einzelner Messwert erhoben. Bei der gasflussoptimierten Düse werden bei drei verschiedenen Metallschäumen Messpunkte für einen Durchfluss an der Vorwärmeinheit zwischen 5 l/min und 10 l/min (in 1 l/min Schritten) und einem Durchfluss am MSG-Brenner von 10, 15 und 20 l/min erhoben. Die optimalen Versuchsparameter werden anschließend für die Linienmessungen übernommen und nicht weiter variiert. Derartige Untersuchungen sind bei den anderen beiden Varianten und der Referenzdüse nicht notwendig, da dort nur ein einzelner Gasfluss vorliegt. Es erfolgen sofort die Linienmessungen.

Bei den **Linienmessungen** werden, entlang der Schweißrichtung bei schleppender Drahtzufuhr, 49 Messpunkte mit einem Abstand von jeweils 1 mm angefahren (s. Anhang A.7), um den gesamten Bereich unter der Gasdüse abzudecken. Die gemessene Konzentration wird mit der aktuellen Position des Brennerkopfes abgespeichert. Dieses Vorgehen wird für alle betrachteten Düsen bei 10, 15 und 20 l/min Durchflussmenge wiederholt.

Zuletzt erfolgt eine **Flächenmessung** bei der optimalen Durchflussmenge durch das Abfahren eines mäanderförmigen Pfades. Die Messung wird auf einem Quadrat von 48 mm x 48 mm (s. Anhang A.5) ausgeführt. Jedoch wird der Abstand der Punkte auf 2 mm erhöht, um die Dauer und den Gasverbrauch zu senken und dabei die Messgenauigkeit ausreichend gut beizubehalten. Aus den Messwertpaaren aus der Sauerstoffkonzentration und der Position des Brenners lässt sich anschließend ein zweidimensionales Diagramm der Schutzgasabdeckung erstellen. Eine Auflistung aller durchgeführten Sauerstoffmessungen kann in Anhang A.5 eingesehen werden.

Schlierentechnik

Die Schlieraufnahmen dienen in erster Linie zum besseren Verständnis der Ergebnisse der Sauerstoffmessungen. Für die Messungen wird der Demonstrator in der Töpler Z-Anordnung montiert. Ein hinreichender Dichtegradient zur Abbildung der Schlieren wird durch die Verwendung eines Mischgases aus 70 % Helium und 30 % Argon sichergestellt. Wie bei der Sauerstoffmessung erfolgt die Gasversorgung aus einer Gasflasche und die untersuchten Durchflussmengen werden durch einen bzw. zwei Durchflussregler eingestellt. Der Versuchsaufbau ist in Anhang A.6 abgebildet. Analog zur Sauerstoffmessung wird ausschließlich die Kaltgasströmung untersucht. Zur Analyse werden für alle Konfigurationen Bilder aufgenommen, für welche Linienmessungen erstellt wurden. Damit kann eine qualitative Aussage über die Schutzgasabdeckung basierend auf der räumlichen Ausprägung der Strömung getätigt werden. Die Aufnahmen werden mit einer Photron Fastcam SA4 500K-M1

und einem festbrennweiten Objektiv AF Nikkor 180 über 5 s mit einer Bildrate von 120 fps erstellt.

7.3.2 Auswertung Diagnostik

Referenzdüse

Die durchgeführten Messungen sind nur untereinander vergleichbar und vor allem durch das Vernachlässigen des Lichtbogens nicht absolut zu bewerten. Die Anziehungskräfte des Lichtbogens bündeln das Schutzgas um die abschmelzende Elektrode und das Strömungsverhalten verbessert sich gegenüber der Kaltgasströmung. Dadurch kann bei höheren Durchflussmengen eine zu starke Wirbelbildung unterbunden werden. [80] Es ist zu erwarten, dass die gemessenen Werte daher schlechter als entsprechende Werte mit Lichtbogen in der Literatur [102] oder vom Hersteller (unter 20 ppm bei einer Standard MSG-Gasdüse) [103] ausfallen werden.

Um die Schutzgasabdeckungen der neu konstruierten Gasdüsen bewerten zu können, wird als Referenz eine Standard-MSG-Düse der Fa. Binzel untersucht. Bei den Linienmessungen wird die Differenz zwischen der Kaltgasströmung und der Messung mit einem Lichtbogen deutlich. Der herstellerseitig gemessenen Konzentration von 20 ppm stehen Konzentrationen von minimal 300 ppm gegenüber (s. Abbildung 7-4 a)). Der schnelle Anstieg der Kontamination bei größerem Abstand von der Elektrode entspricht dagegen den Erwartungen. Eine Verringerung der Schutzgasmenge führt zu einem besseren Messergebnis. Das lässt sich anhand der Schlierenaufnahmen erklären (s. Abbildung 7-3 a) bis c)). Liegt bei 20 l/min eine starke Wirbelbildung unterhalb der Gasdüse vor, reduziert sich diese zu einem eher laminaren Verlauf bei 15 l/min bzw. 10 l/min.

Dementsprechend wird das beste Ergebnis bei 10 l/min gemessen. Abweichend davon wird jedoch die Flächenmessung bei 15 l/min durchgeführt, da der positive Effekt von niedrigen Durchflussmengen durch den Einfluss des Lichtbogens überlagert wird. Aufgrund praktischer Erfahrungen im Schweißensatz ist ein besseres Ergebnis bei größeren Volumenströmen zu erwarten. Auf der Flächenmessung ist ein beinahe konzentrisches Gebiet mit guter Schutzgasabdeckung um die Elektrode herum zu beobachten (s. Abbildung 7-4 b)).

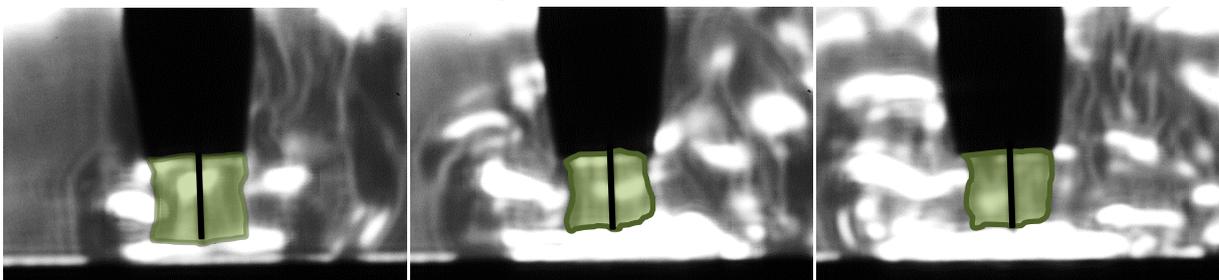


Abbildung 7-3: Schlierenmessung der Referenzdüse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min

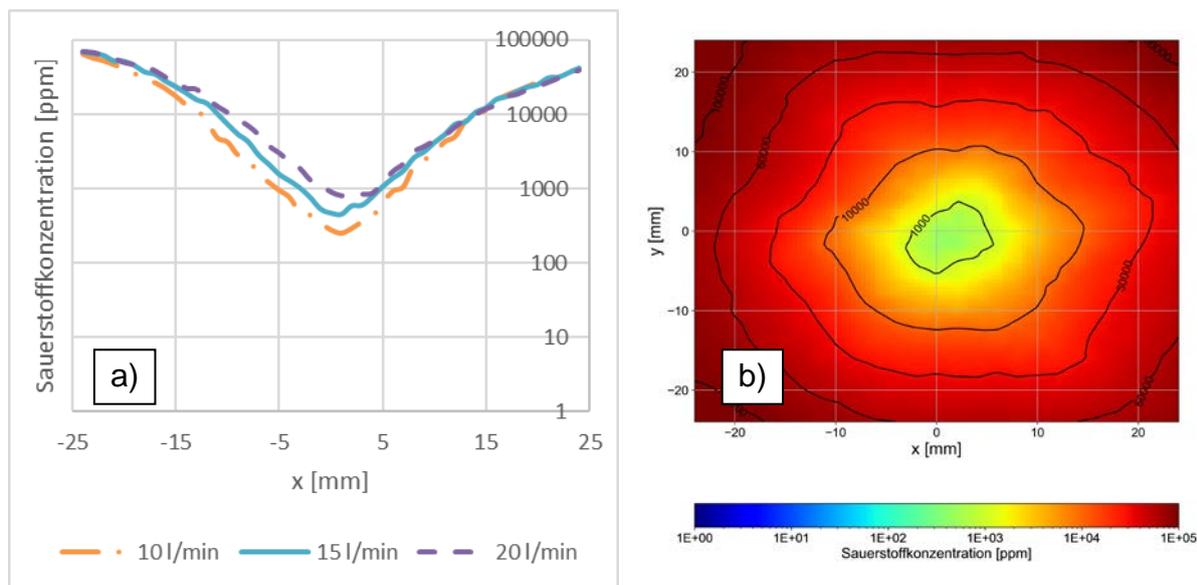


Abbildung 7-4: Sauerstoffmessung der Referenzdüse in a) Linienmessung b) Flächenmessung

Bauraumoptimierte Düse

Unterhalb der bauraumoptimierten Gasdüse wird eine Sauerstoffkonzentration von minimal ca. 800 ppm erreicht (s. Abbildung 7-6 a)). Die Qualität der Abdeckung variiert zwischen den unterschiedlichen Volumenströmen nur geringfügig mit derselben Tendenz wie bei der Referenzmessung. Bei einem niedrigen Durchfluss ergeben sich minimal bessere Werte als bei einem hohen Durchfluss. Daher wird analog zur Referenz die Flächenmessung mit 15 l/min durchgeführt. Die Schlierenbilder (Abbildung 7-5 a) bis c)) zeigen eine Verschiebung der Strömung nach links und damit vor das Schmelzbad bei schleppender Zufuhr. Auf die Kontamination des Schutzgases mit Sauerstoff scheint dies jedoch, ebenso wie der Wirbel unterhalb des Zusatzdrahtes, keinen eindeutigen Einfluss zu haben. Eine Verschiebung des Schutzgases von der Elektrode weg kann in der Linienmessung nicht festgestellt werden.

Das Ergebnis der Flächenmessung (s. Abbildung 7-6 b)) gestaltet sich auf schlechterem Niveau ähnlich zur Referenzmessung. Um die Elektrode herum befindet sich ein ausreichend großes Plateau niedriger Konzentration, das entsprechend der Wirbel leicht entlang der Schweißrichtung gestreckt ist. Die absolut erreichten Konzentrationswerte sind zwar hoch, aber unter Einbezug der Referenzmessung wird ein Schweißprozess umsetzbar sein.

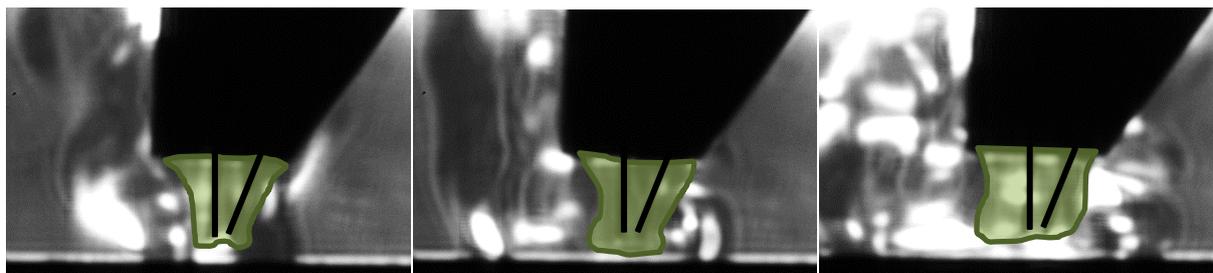


Abbildung 7-5: Schlierenmessung der bauraumoptimierten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min

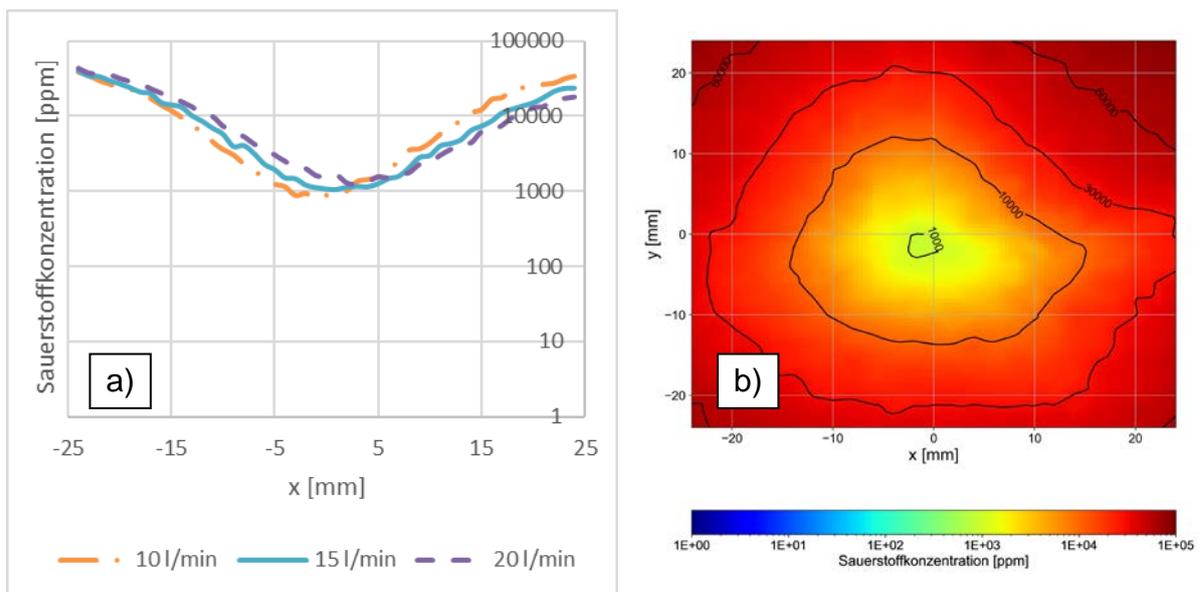


Abbildung 7-6: Sauerstoffmessung der bauraumoptimierten Düse in a) Linienmessung
b) Flächenmessung

Schutzgasoptimierte Düse

In Abbildung 7-7 b) sind die Messwerte der Sauerstoff-Punktmessung für den Schaum 2 (s. Abbildung 7-7 a)) im Einsatz bei der schutzgasoptimierten Gasdüse dargestellt. Im Vergleich zu Schaum 1 und Schaum 3 erreicht der Schaum 2 die besten Werte und wird für die weiteren Untersuchungen verwendet. Das komplette Messprotokoll für Schaum 1 bis 3 befindet sich in Anhang A.7. Die höhere Porendichte, welche auf den nicht verwendeten Ausschnitten zu erkennen ist, lässt eine bessere Laminarisierung des zusätzlichen Gasflusses erwarten. Um eine optimale Abdeckung zu erreichen, muss der Durchfluss an der Vorwärmeinheit an den Durchfluss des Brenners angepasst werden. Die minimalen Konzentrationen können bei [10 + 6; 15 + 8; 20 + 10] l/min erzielt werden.

Neben den Linienmessungen der ausgewählten Kombinationen wurde eine Messung ohne zusätzlichen Gasstrom an der Vorwärmeinheit zum Vergleich mit 15 l/min durchgeführt. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der zusätzliche Gasstrom die Ergebnisse der Düse verbessert, jedoch liegt die geringste Sauerstoffkonzentration mit 5000 ppm sehr hoch. Ausschlaggebend für die hohe Kontamination ist vermutlich der große Düsendurchmesser, welcher konstruktiv für die Integration des zusätzlichen Gasflusses notwendig ist. Außerdem ist das Minimum deutlich nach entgegen dem Zusatzdraht (s. Abbildung 7-9 a)) verschoben. Für flachere Winkel (65° und 60°) ist mit einer stärkeren Verschiebung zu rechnen. Auf den Schlierenaufnahmen ist diese Verschiebung deutlich stärker als bei der bauraumoptimierten Düse zu erkennen (s. Abbildung 7-8 a) bis c)). Auch der Unterschied zwischen den Durchflussmengen tritt hier stärker in Erscheinung. Analog zu den beiden anderen Messungen wird jedoch die Flächenmessung mit 15 + 8 l/min durchgeführt, da in der Schlierenaufnahme von 10 + 6 l/min bereits ohne Lichtbogen kaum Gas auf der zum Zusatzdraht gerichteten Seite der Elektrode zu sehen ist.

Entwicklung eines Demonstrators mit in die Gasdüse integrierter Drahtzufuhr / Development of a demonstrator with integrated wire feed

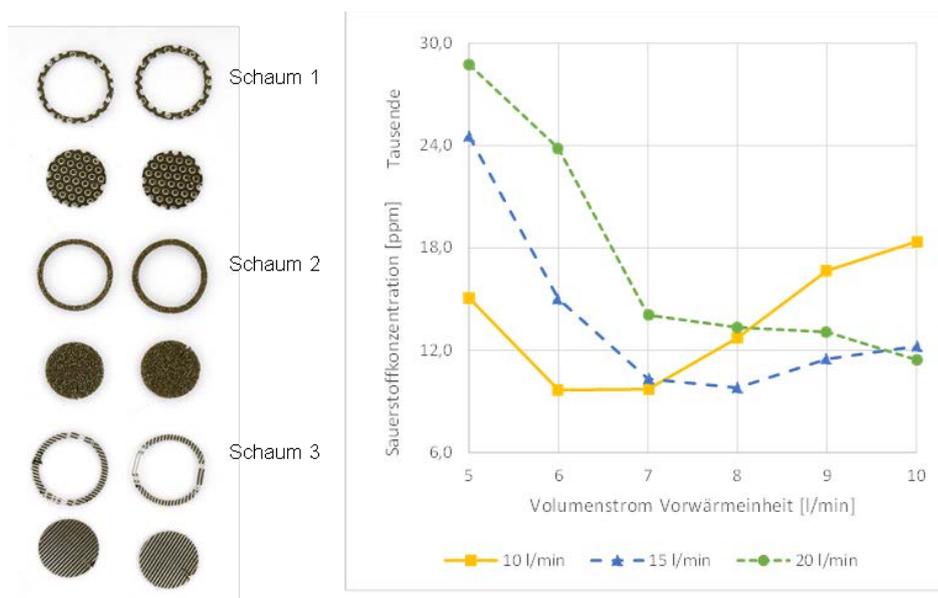


Abbildung 7-7: Darstellung der Metallschaumringe mit Ausschnitten b) Punktmessungen des Schaums 2

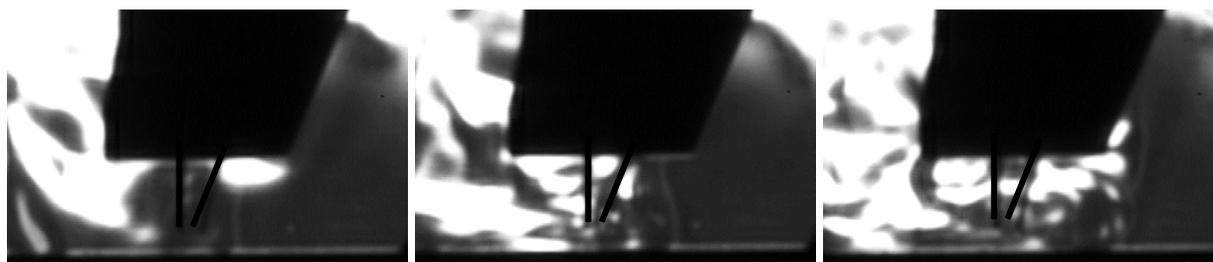


Abbildung 7-8: Schlierenmessung der schutzgasoptimierten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min

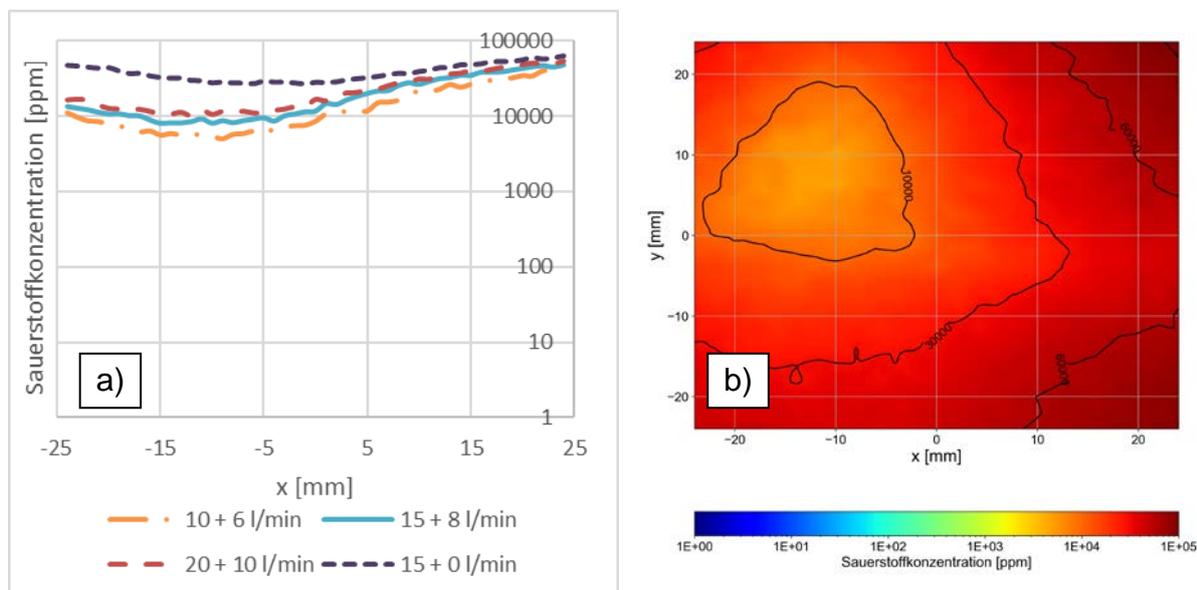


Abbildung 7-9: Sauerstoffmessung der schutzgasoptimierten Düse in a) Linienmessung b) Flächenmessung

Die Flächenmessung unterstützt die Beobachtung eines stark verschobenen optimalen Abdeckungsgebietes (s. Abbildung 7-9 b)). Neben der Verschiebung entlang der Schweißrichtung liegt auch eine Verschiebung orthogonal zur

Schweißrichtung vor. Möglicherweise entsteht dies durch eine gekippte Vorwärmeinheit oder einen gekippten Schaum infolge von Toleranzen in der Fertigung oder Montage. Für die Freigabe der Düse zum Einsatz beim Schweißen sollten aufgrund der hohen Sauerstoffkontamination zusätzliche Untersuchungen mit realitätsnäheren Rahmenbedingungen (mit Lichtbogen) durchgeführt werden.

Verschleißgerechte Düse

Bei der verschleißgerechten Düse wird in der Linienmessung (s. Abbildung 7-11 a)) nur eine minimale Sauerstoffkonzentration von 32000 ppm erreicht. Zwischen den verschiedenen Volumenströmen besteht kein erkennbarer Unterschied. Analog zu den weiteren Messungen wird daher ein Durchfluss von 15 l/min für die Flächenmessung gewählt. Die Schlierenbilder zeigen durchweg eine turbulente Strömung unter der Gasdüse (s. Abbildung 7-10 a) bis c)). Mögliche Ursachen dafür sind der große Düsenquerschnitt, welcher konstruktiv zur Integration des Verschleißteils notwendig ist, sowie der Hinterschnitt, der durch das Verschleißteil erzeugt wird.

Die Flächenmessung zeigt durchweg eine sehr hohe Sauerstoffkonzentration an, sodass davon ausgegangen werden muss, dass ein sauberer Schweißprozess mit dieser Gasdüse nicht möglich ist (s. Abbildung 7-11 b)).

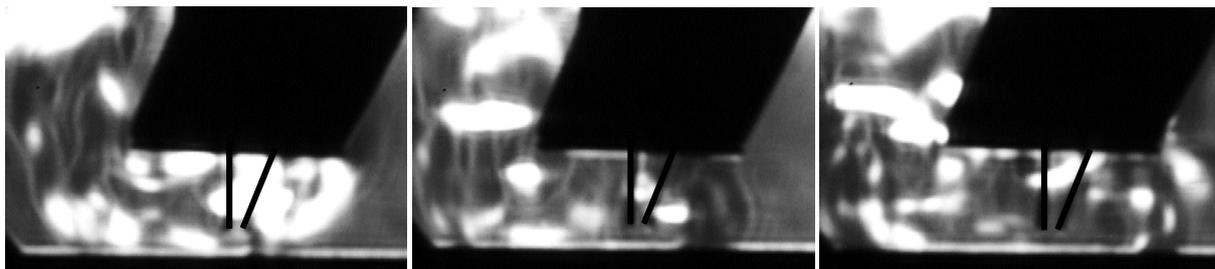


Abbildung 7-10: Schlierenmessung der verschleißgerechten Düse mit a) 10 l/min b) 15 l/min c) 20 l/min

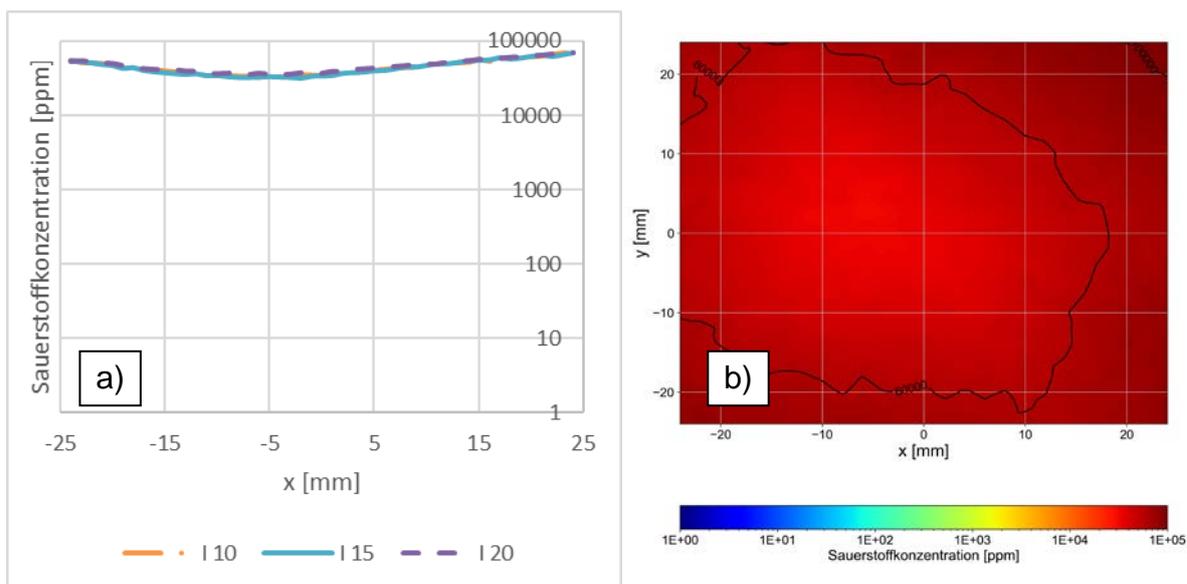


Abbildung 7-11: Sauerstoffmessung der verschleißgerechten Düse in a) Linienmessung
b) Flächenmessung

7.4 Auswahl Vorzugsvariante

Nach der Untersuchung der Varianten erfolgt eine Gegenüberstellung und die Bewertung der Gasdüsen. Dafür wird die Methode der Nutzwertanalyse [99] angewandt, wobei es sich um eine gewichtete Punktebewertung handelt. Die Kriterien werden aus der Anforderungsliste erarbeitet. Da, nach Morphologischem Kasten, die gleichen Lösungen für die Anbindung von Brenner und Vorwärmeinheit und die Verstellbarkeit bei allen Varianten eingesetzt werden, werden nur die Kriterien Qualität der Schutzgasabdeckung, Zugänglichkeit in Zwangslagen, Verschleißfestigkeit und fertigungstechnischer Aufwand betrachtet und mit 1 (schlecht) bis 4 (sehr gut) bewertet.

Die identifizierten Kriterien sind unterschiedlich kritisch für den Einsatz im angedachten Prozess. Zur Gewichtung der Kriterien wird ein paarweiser Vergleich durchgeführt. Die identifizierten Kriterien werden untereinander verglichen (2 = Kriterium ist wichtiger; 1 = Kriterien sind gleich relevant; 0 = Kriterium nicht so kritisch; Summe eines Vergleichs immer = 2) und die erreichte Bewertung pro Kriterium aufsummiert. Aus dem relativen Anteil ergibt sich die Gewichtung des Kriteriums. [99]

Die Tabelle 7-2 zeigt die ausgewertete Nutzwertanalyse mit bereits eingetragener Gewichtung, deren Ermittlung in Anhang A.8 nachvollzogen werden kann. Bei der verschleißgerechten Variante wurde die Qualität der Schutzgasabdeckung mit null bewertet, da bei 32000 ppm kein stabiler Prozess möglich ist. Als Konsequenz wird die Variante aus der Bewertung aufgrund des nicht Erfüllens einer Festanforderung ausgeschlossen.

Als Konzeptfavorit wird die bauraumoptimierte Düse mit großer Eindeutigkeit ermittelt. Da die Schutzgasabdeckung der schutzgasoptimierten Düse deutlich überlegen ist, entfällt deren Zweckmäßigkeit. Sollte sich der Verschleiß der Düse in folgenden Untersuchungen als kritisch erweisen, könnte der Einsatz von Schutzsprays- oder Beschichtungen geprüft werden. Für diese Arbeit wird die bauraumoptimierte Variante durch konventionelle Fertigung aus Kupfer für 70° hergestellt und untersucht.

Tabelle 7-2: Nutzwertanalyse

Variante / Kriterium	Gewichtung	Bauraumoptimiert		Schutzgasoptimiert		Verschleißgerecht	
	Absolut	Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet	Bewertung	Gewichtet
Summe	100		3,1		1,35		-
Schutzgasabdeckung	50	3	1,5	1	0,5	0	0
Fertigung	10	3	0,3	2	0,2	1	0,1
Zugänglichkeit	25	4	1	2	0,5	1	0,25
Verschleiß	15	2	0,3	1	0,15	4	0,6

7.5 Validierung der Konstruktion

Bei den geplanten Schweißparametern konnte der Prozess mit 70° Anstellwinkel nicht umgesetzt werden. Während des Schweißens oxidiert das Schmelzgut durch mangelnde Schutzgasabdeckung. Die mangelnde Schutzgasabdeckung ist nicht auf

die neu entworfene Gasdüse zurückzuführen, da niedrigere Heißdrahtvorschübe ohne Oxidation des Schmelzgutes eingesetzt werden können. In Abbildung 7-12 ist das Ergebnis bei 12 m/min und 6 m/min Heißdrahtvorschub dokumentiert.



Abbildung 7-12: Schweißnaht bei einem steilen Anstellwinkel

Aus Prozessbeobachtungen ist zu schließen, dass der Heißdraht bei hohen Vorschüben den Materialübergang des MSG-Prozesses stören könnte. Die abgelenkten Tropfen der MSG-Elektrode führen zu starken Verwirbelungen und verhindern eine sinnvolle Prozessgestaltung ab einem Heißdrahtvorschub von ca. 8 m/min. Im Gegensatz zu flacheren Winkeln tritt dieser Effekt bei 70° auf, da der Heißdraht für längere Zeit in großer Nähe zum Lichtbogen ist. Außerdem setzt aufgrund des steilen Winkels der Heißdraht auf dem Schmelzgrund auf und stört den Tropfenübergang. Mit höheren Heißdrahtströmen kann diese Dynamik möglicherweise reduziert werden. Allerdings ist die Drahterwärmung bei der Demonstratordüse infolge der verlängerten Vorwärmstrecke und daraus resultierender Instabilität des Drahtes begrenzt.

7.6 Optimierung der Konstruktion

Anhand der Untersuchungen mit den entwickelten Schutzgasdüsen ist zu sehen, dass eine Adaption der bisher genutzten Brennertechnik nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Durch die zu lange Vorwärmstrecke, die für die Nutzung der bisherigen Drahtvorwärmung notwendig ist, kommt es zu einem zu kleinen Prozessfenster und daraus resultierend zu starken Prozessinstabilitäten. Daher ist eine Optimierung der Gasdüse, aber vor allem der Drahtzufuhr notwendig.

Aus den durchgeführten Untersuchungen für die Gasdüsentypen kann geschlossen werden, dass mithilfe einer Düse, welche den Schutzgasstrom des MSG-Brenners nur in geringem Maße beeinflusst die beste Schutzgasabdeckung für einen Prozess mit integrierter Drahtzufuhr realisiert werden kann. Daher wird bei der Optimierung des Demonstrators vor allem die Drahtzufuhr weiterentwickelt. Anhand der Energieeintragsmessungen in Abschnitt 5.5 ist zu sehen, dass nur eine geringe Kühlung der Vorwärmeinheit notwendig ist. Daher wurden für die optimierte Konstruktion der in die Schutzgasdüse integrierten Drahtzufuhr folgende Punkte berücksichtigt:

- Geringer Einfluss des Heißdrahtes auf den Schutzgasstrom des MSG-Brenners
- Kühlung der Gasdüse und damit des unteren Heißdrahtkontaktes

Entwicklung eines Demonstrators mit in die Gasdüse integrierter Drahtzufuhr / Development of a demonstrator with integrated wire feed

- Keine zusätzliche Kühlung des oberen Heißdrahtkontaktes
- Anschluss des oberen Heißdrahtkontaktes über BIKOX®-Kabel und damit Bereitstellung von Strom, und Draht sowie zusätzlich möglicher Gaspülung des Drahtes

Die aus diesen Anforderungen und Randbedingungen optimierte Gasdüse und Drahtzufuhr kann der folgenden Abbildung 7-13 entnommen werden. Neben einer Schnittansicht der Brennertechnologie ist ebenso eine Restsauerstoffmessung abgebildet. Anhand dieser ist zu sehen, dass im Prozessbereich weiterhin keine ideale Schutzgasabdeckung vorhanden ist, diese ist jedoch für die weitere Verarbeitung von Baustahl ausreichend gut.

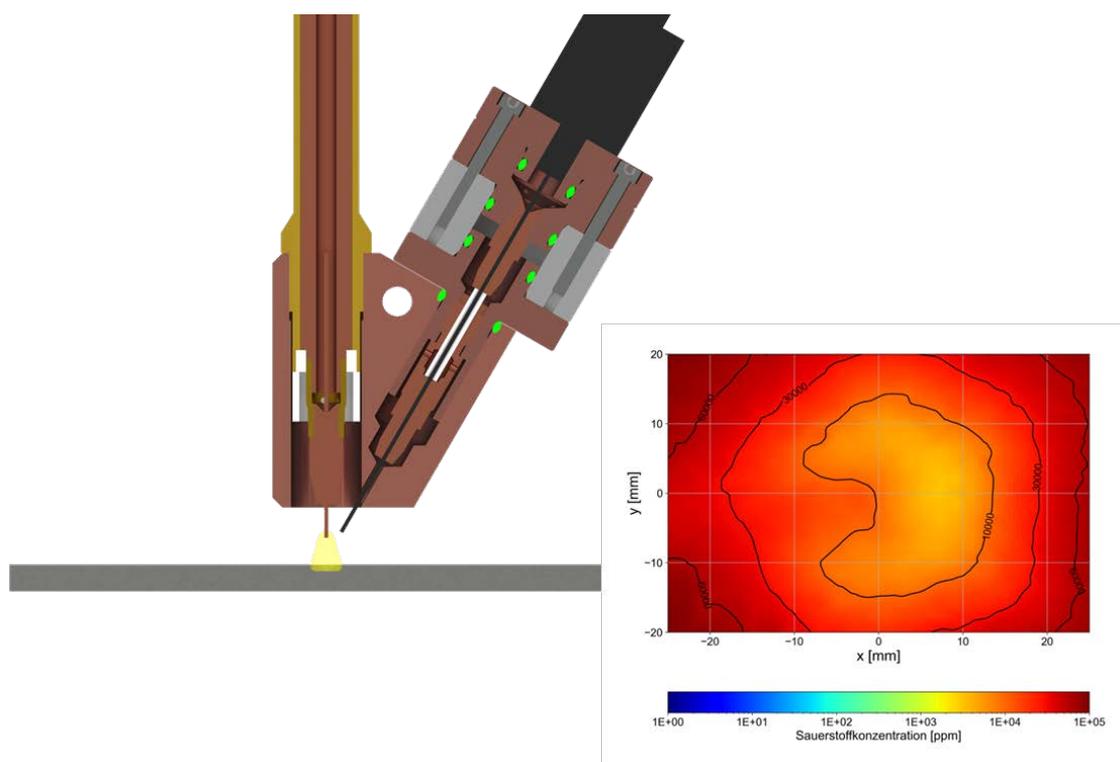


Abbildung 7-13: Schnittdarstellung der optimierten Demonstrator konstruktion und Restsauerstoffmessung

Mithilfe dieses Demonstrators wurden anschließend Testschweißungen durchgeführt. Um dabei die Einsatzfähigkeit zu untersuchen, wurde sowohl die Spannungskorrektur des MSG-Prozesses als auch die Lichtbogenart (Sprühlichtbogen und Impulslichtbogen) geändert. Anhand der in Abbildung 7-14 dargestellten Schweißergebnisse und Prozessbilder sind die möglichen Prozessgrenzen, aber auch die Beeinflussung des Lichtbogens durch den Heißdraht zu sehen. Für den Fall, dass ein Sprühlichtbogen ohne Spannungskorrektur eingesetzt wird, ist ein sehr uniformes Schweißergebnis möglich. Anhand von Prozessaufnahmen ist jedoch zu sehen, dass ein sehr dynamisches Abschmelzen des Heißdrahtes und eine dynamische Tropfenablösung des MSG-Prozesses stattfindet. Dies ist auf eine erhöhte Interaktion der beiden Drähte durch den steilen Anstellwinkel von 65° zurückzuführen. Durch diese hohe Dynamik wird jedoch das Schweißergebnis nicht negativ beeinflusst. Eine Reduzierung der Beeinflussung kann durch einen größeren Abstand zwischen MSG-Draht und Heißdraht oder durch einen flacheren Anstellwinkel der Drahtzufuhr realisiert werden. Bei einer Anpassung der

Spannungskorrektur in den positiven Bereich wird der Lichtbogen länger. Dadurch steigt die Interaktion zwischen MSG-Draht und Zusatzdraht, der Prozess wird hochdynamisch und nicht mehr zu kontrollieren. Durch die Interaktion der MSG-Tropfen mit dem Heißdraht kommt es zu Verwirbelungen und ultimativ zu Poren in der Schweißnaht. Es ist zu sehen, dass der Lichtbogen für steile Heißdrahtwinkel möglichst kurz sein sollte. Diese Schlussfolgerung wird durch Untersuchung eines Impulslichtbogens bestätigt. Durch den kurzen Lichtbogen kommt es zu weniger Interaktionen zwischen den Drähten und damit zu einem weniger dynamischen Prozess. Das Schweißergebnis ist, wie beim konventionellen Sprühlichtbogen, uniform und gut.

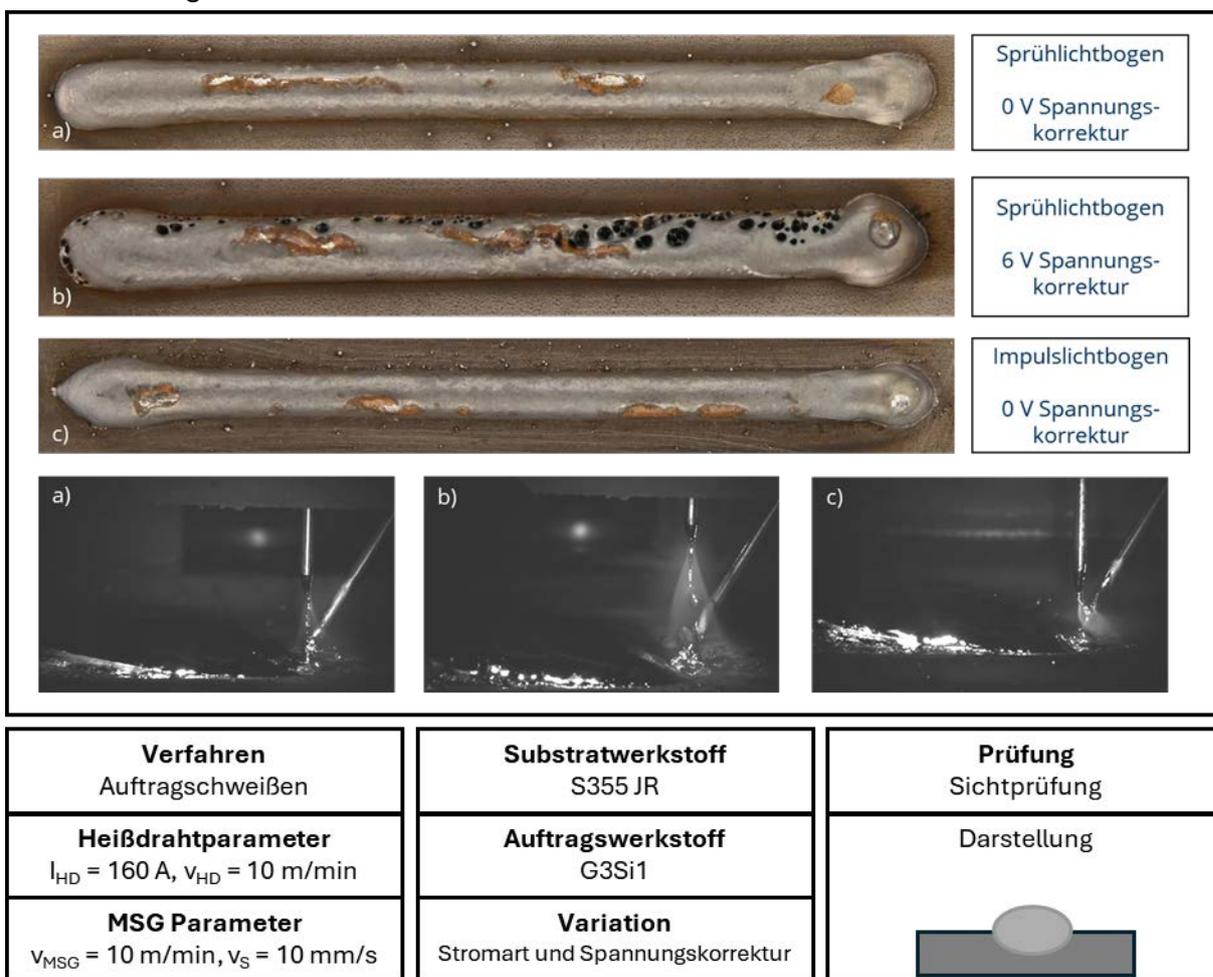


Abbildung 7-14: Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Demonstrators und Einfluss der Lichtbogenart auf den Werkstoffübergang

7.7 Richtungsabhängigkeitsuntersuchungen

Für WIG-Prozesse ist zu sehen, dass mit steilerem Drahtzufuhrwinkel eine bessere Richtungsunabhängigkeit erreicht werden kann. Daher soll für den entwickelten Demonstrator diese Hypothese ebenfalls für MSG-Zusatzdrahtprozesse untersucht werden. Dafür wurden quadratische Strukturen auftraggeschweißt. Durch die Änderung der Zuführrichtung und durch eine Vermessung der Nahtgeometrie kann der Grad der Richtungsabhängigkeit des Prozesses ermittelt werden. Diese Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 7-15 dargestellt.

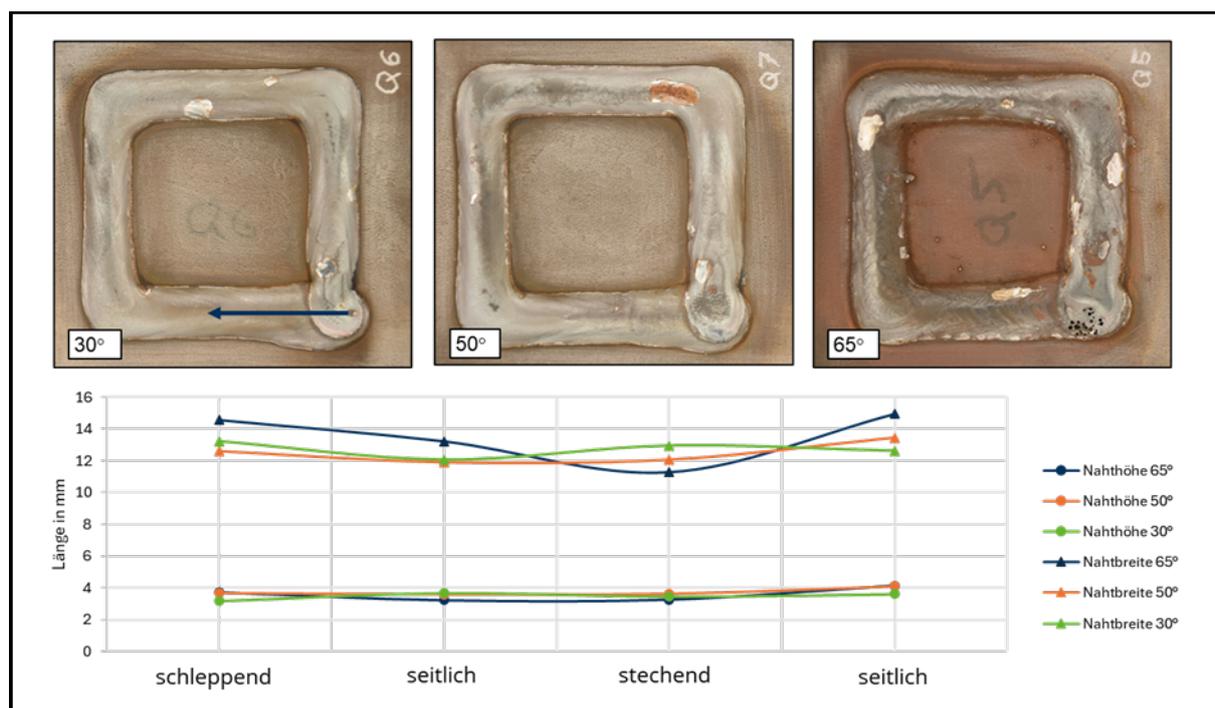


Abbildung 7-15: Darstellung des Einflusses der Schweißrichtung und des Anstellwinkels auf die Richtungsabhängigkeit des MSG-Heißdrahtprozesses

Die vorliegenden Untersuchungen liefern Einblicke, die darauf hindeuten, dass die Hypothese einer verbesserten Richtungsunabhängigkeit bei steilen Drahtzuführwinkeln nicht unmittelbar vom WIG-Prozess übertragbar ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass insbesondere bei einem Zuführwinkel von 65° eine erhöhte Variation in Bezug auf die Nahtbreite festgestellt wird, während die Nahthöhe für alle untersuchten Zuführwinkel stabil bleibt. Des Weiteren lässt sich ableiten, dass ein Optimum hinsichtlich der Richtungsunabhängigkeit bei einem Zuführwinkel von 50° auftritt, was auf eine geringere Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Zusatzdraht zurückzuführen ist. Aufgrund des gekoppelten Energie- und Materialeintrags beim MSG-Prozess wird der Tropfenübergang durch den Zusatzdraht beeinflusst, wobei ein tieferes Eindringen ins Schmelzbad die Richtungsunabhängigkeit des Prozesses begünstigt. Bei flacheren Zuführwinkeln wie den untersuchten 30° ist zudem festzustellen, dass ein zu starkes Eindringen ins Schmelzbad die Richtungsunabhängigkeit verschlechtert.

Aufgrund der doch guten Ergebnisse und besseren Reproduzierbarkeit werden die nachfolgenden Versuche jedoch trotzdem mit dem Demonstrator mit 65° Anstellwinkel durchgeführt.

8 Durchführung und Auswertung der Auftragschweißversuche und der additive Fertigung / Testing and analysing cladding and additive manufacturing

Kurzfassung

Die Darstellung des Potentials für das Auftragschweißen und die additive Fertigung werden im Rahmen dieses Kapitels dargestellt. Für das Auftragschweißen werden dabei Schichten aus 1.4430 auf Substraten aus 1.0045 aufgetragen. Dabei werden Aufmischungsgrad und Legierungsabbrand in Abhängigkeit der Prozessparameter untersucht. Für die additive Fertigung werden Wand- und Blockstrukturen aufgebaut. Hierbei wird vor allem die Produktivität maximiert, um das Potential des Zusatzdrahtprozesses bestmöglich darzustellen.

Abstract

The presentation of the potential for surfacing welding and additive manufacturing is provided within this chapter. For surfacing welding, layers of 1.4430 are deposited on substrates of 1.0045. The degree of dilution and alloy depletion are investigated as functions of process parameters. For additive manufacturing, wall and block structures are fabricated, with a focus on maximizing productivity to showcase the full potential of the wire feed process.

8.1 Auftragschweißversuche

MSG-Prozesse mit Zusatzdraht werden in der Praxis vor allem für das Auftragschweißen (Cladding) eingesetzt. Durch den zusätzlichen Draht kann die Abschmelzleistung und damit die Produktivität erhöht werden. Ebenfalls wird über den zweiten Draht der Energieeintrags ins Bauteil reduziert. Dadurch kann die für das Auftragschweißen wichtige Größe des Aufmischungsgrades möglichst klein eingestellt werden. Der Aufmischungsgrad beschreibt das Verhältnis von Nahtfläche im Grundwerkstoff (Ae) zu Nahtfläche, die Aufgetragen (As) wurde. Dabei ist, um ein Vermischen der meist werkstofftechnisch höher legierten Auftragschicht mit dem Grundwerkstoff zu minimieren, ein kleiner Aufmischungsgrad von ca. 5% - 20% anzustreben. Dabei ist jedoch immer zu beachten, dass die Anbindung der aufgetragenen Schicht sichergestellt werden muss.

Im Rahmen dieses Projektes sollen, zur Untersuchung der Eignung des Prozesses für das Auftragschweißen, Schichten aus hochlegiertem Stahl (1.4404) auf Baustahlsubstrate (S355) aufgetragen werden.

8.1.1 Experimenteller Aufbau

Die Parameter und Anlagen in der folgenden Tabelle 8-1 wurden für alle Versuche verwendet. Einzelne Parameter wurden für die verschiedenen Untersuchungen

angepasst. Die jeweiligen Parameter sind in der Beschreibung der einzelnen Experimente zu finden. Es wurden vor allem Untersuchungen zum Einfluss der Heißdrahtstromstärke auf die Ausbildung der Auftragsnaht sowie den Legierungsabbrand durchgeführt. Ebenso wurde der Einfluss des Heißdrahtvorschubs untersucht.

Tabelle 8-1: Versuchsparameter für die Untersuchungen zum Auftragschweißen

Schweißposition nach DIN EN ISO 6947	PA
Schweißprozessart	Auftragschweißen
Grundwerkstoff	S355JR (1.0045)
Schweißdraht Ø	1,2 mm Massivdraht
Material Schweißdraht	G 19 9 (1.4430)
Schweißstromquelle	EWM Titan XQ 500 Puls
Heißdrahtstromquelle	EWM Tetrix 552 HW
Schutzgas	97,5 % Ar, 2,5 % CO ₂
Durchflussmenge Schutzgas	15 l/min
Substratabmessungen	200 mm x 100 mm x 8 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit v _{HD}	Variation
Heißdrahtstrom-Strom I _{HD}	Variation
Heißdraht-Anstellwinkel α	70°
Heißdraht-Kontaktrohr Abstand zum Werkstück	25 mm
Länge der Heißdraht-Vorwärmstrecke	30 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit MSG v _{MSG}	10 m/min
Spannungskorrektur	0 V
Polung	Gleichstrom (DC)
Neigungswinkel des Brenners	0° (neutral)
MSG Kontaktrohr Abstand	20 mm
Schweißgeschwindigkeit v _w	10 mm/s
Schweißnahtlänge	150 mm x 3 Mäander
Schweißzeit	50 s

Die Berechnung des Aufmischungsgrades erfolgt analog der in der folgenden Abbildung 8-1 dargestellten Formel.

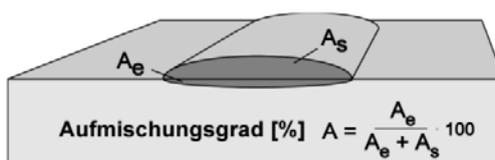


Abbildung 8-1: Berechnung des Aufmischungsgrades

8.1.2 Ergebnisse Auftragschweißversuche

Für die Untersuchungen zur Eignung des Verfahrens für das Auftragschweißen wurden Versuche mit unterschiedlicher Heißdrahtstromstärke durchgeführt. Diese wurde dabei zwischen 110 A und 170 A in 10 A-Schritten variiert. Dabei wurden drei Schweißnähte mit gleichem Abstand von 7,5 mm nebeneinander geschweißt. Das äußere Nahterscheinungsbild kann dabei dem Anhang entnommen werden. Anschließend wurden die Proben getrennt und es wurden Makroschliffe angefertigt. Diese sind in der folgenden Abbildung 8-2 dargestellt.

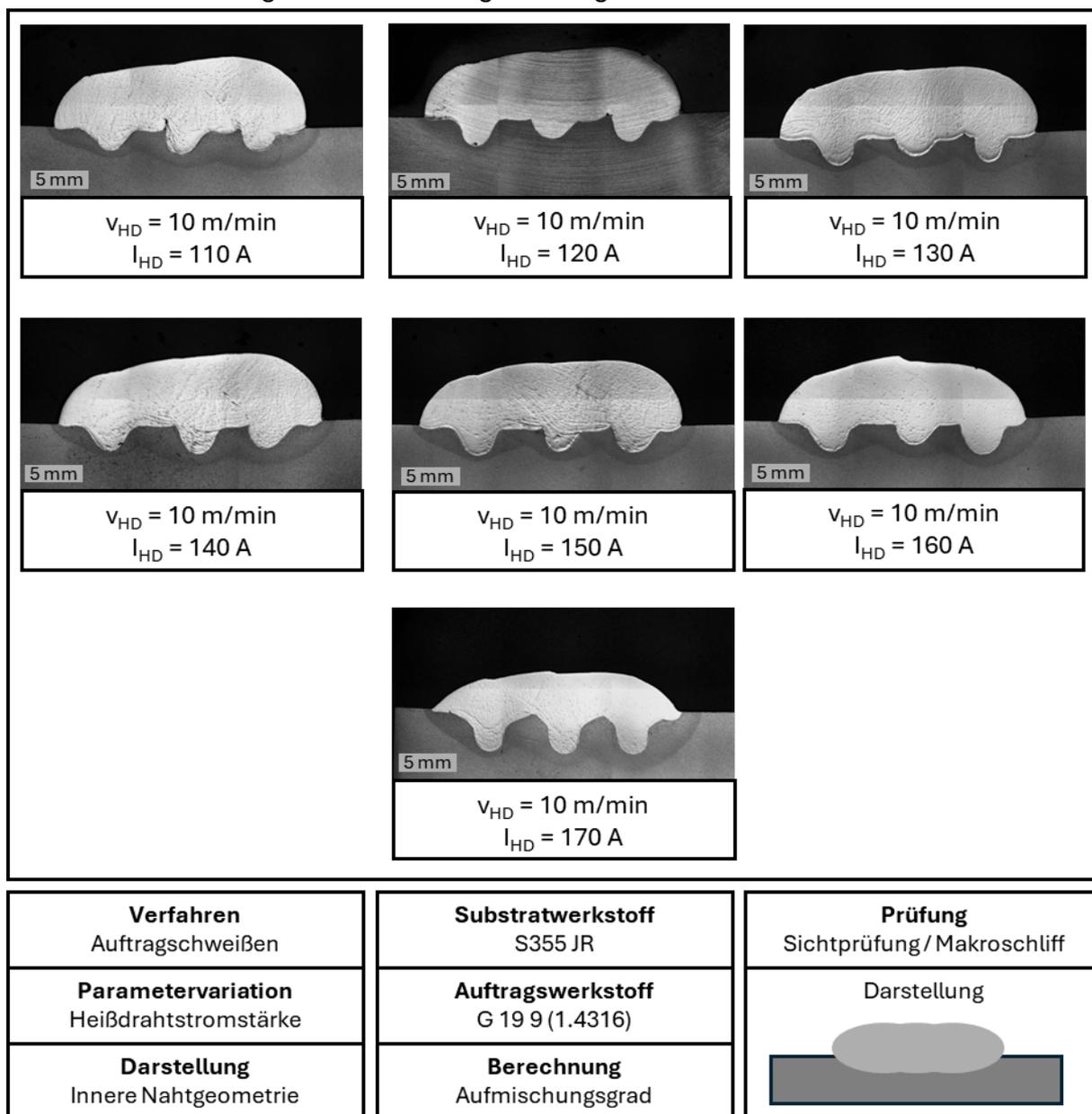


Abbildung 8-2: Innere Nahtgeometrie der Auftragschweißversuche

Anhand der Makroschliffe in Abbildung 8-2 ist zu sehen, dass für alle durchgeführten Versuche Schweißnähte mit ausreichender Qualität hergestellt werden konnten. Anhand der ebenfalls durchgeführten Vermessung (siehe Abbildung 8-3) der Schweißnähte ist zu sehen, dass für einen großen Bereich von 110 A bis 150 A

Heißdrahtstrom dieser nur einen geringen Einfluss auf die geometrische Ausbildung der Naht (Nahthöhe, Nahtbreite und Einbrand) hat. Es kann mit steigender Stromstärke eine leichte Verbreiterung der Naht festgestellt werden. Dadurch ist zu sehen, dass die Stromstärke gut zur Einstellung der Geometrie der Auftragsnaht genutzt werden kann. Bei der Betrachtung des Aufmischungsgrades (siehe Abbildung 8-4) ist zu sehen, dass dieser ebenfalls im genannten Bereich sehr uniforme Ergebnisse liefert. Bei einer weiteren Erhöhung der Heißdrahtstromstärke auf 160 A bzw. 170 A ist zu sehen, dass der Einfluss dieser Größe stark zunimmt. Durch eine Erhöhung des Heißdrahtstromes kann dabei die Nahthöhe sehr gut beeinflusst werden. Diese nimmt für 170 A besonders stark ab und wird von 5,5 mm (150 A) auf 3,1 mm (170 A) reduziert. Die Nahtbreite wird durch die höhere Stromstärke nur geringfügig beeinflusst. Ebenso ist zu sehen, dass der Einbrand und damit der Aufmischungsgrad für 170 A stark zunimmt. Für 110 A bis 150 A lag dieser zwischen 18% und 20%, bei einer Stromstärke von 170 A wird der Aufmischungsgrad beinahe verdoppelt und liegt bei ca. 40%. Dadurch ist der Einfluss der Heißdrahtstromstärke auf den Prozess sehr gut zu sehen.

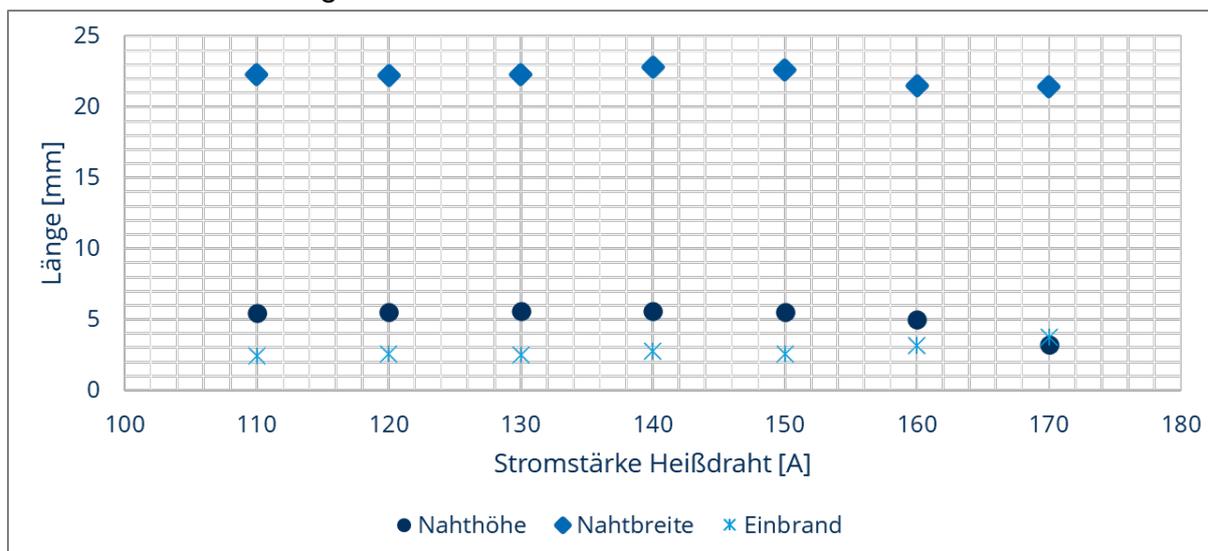


Abbildung 8-3: Abhängigkeit der äußeren Nahtgeometrie von den Heißdrahtparametern

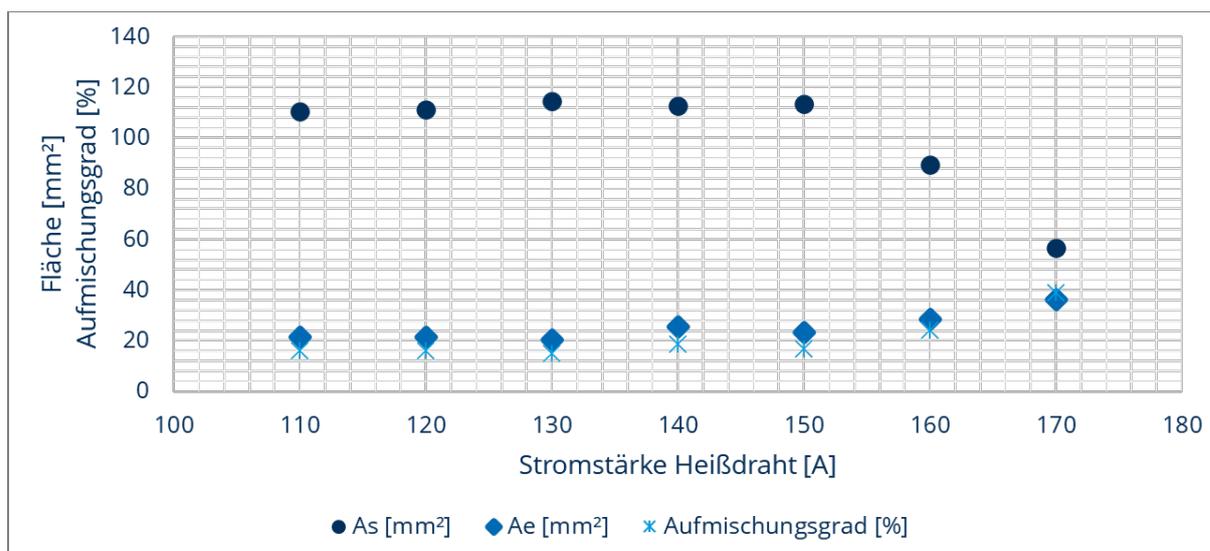


Abbildung 8-4: Abhängigkeit des Aufmischungsgrades von den Heißdrahtparametern

Bei der Untersuchung des Legierungsabbrandes mittels EDX-Analyse kann anhand von Abbildung 8-5 gezeigt werden, dass die Heißdrahtstromstärke ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Abbrand von Legierungselementen hat. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Elemente Chrom, Nickel, Mangan und Silizium analysiert. Es ist zu sehen, dass durch die Wahl der Stromstärke des Heißdrahtes der Abbrand gesteuert werden kann. Bei 110 A und 130 A findet ein Abbrand von Chrom, Nickel und Mangan von ca. 25% und von Silizium von ca. 45% statt. Bei 150 A Stromstärke wird dieser Abbrand bereits auf ca. 28% für die erstgenannten Elemente erhöht, der Abbrand von Silizium ist etwa gleich. Bei einer Erhöhung der Stromstärke auf 170 A brennen ca. 47% Chrom, Nickel und Mangan ab, Silizium ca. 54%. Anhand dieser Daten ist zu sehen, dass der Legierungsabbrand beim MSG-Heißdrahtprozess nicht unterbunden werden kann, jedoch kann durch die Wahl der Heißdrahtstromstärke dieser reduziert bzw. gesteuert werden. In Kombination mit der Wahl der Nahtgeometrie durch die Stromstärkeparameter, kann ein Prozessoptimum für jede Schweißaufgabe definiert werden.

Der gesteigerten Legierungsabbrand bei höheren Stromstärken ist vermutlich auf die höhere Schmelzbadtemperatur und den größeren Einfluss des MSG-Prozesses bei stark vorgewärmten Heißdrähten zurückzuführen.

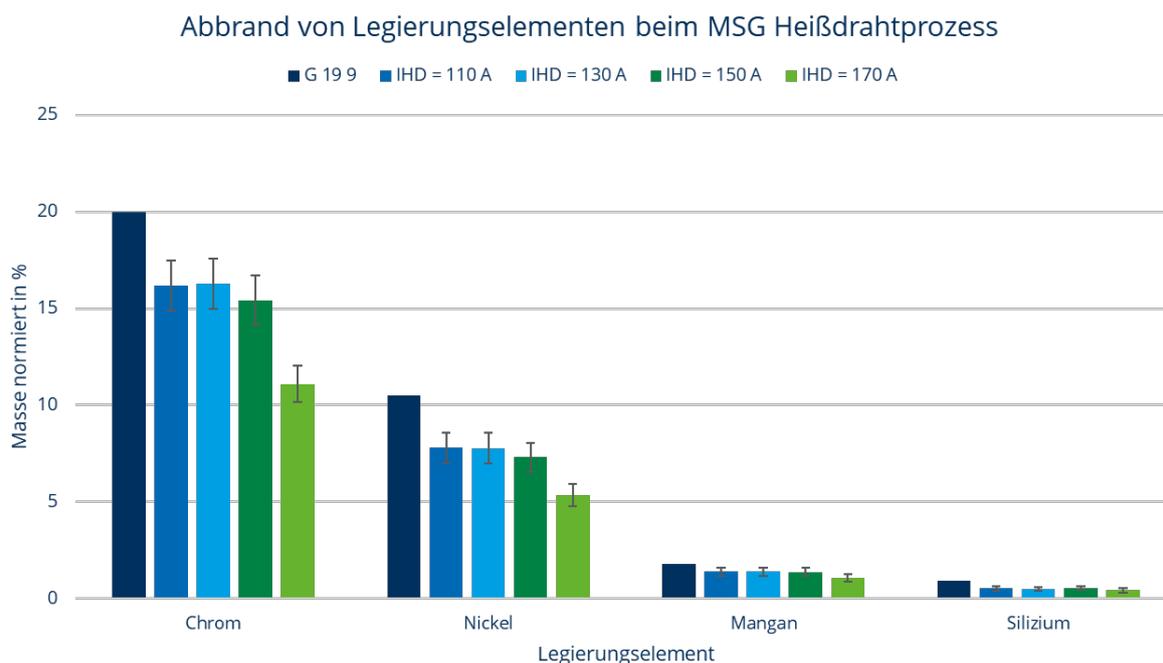


Abbildung 8-5: Darstellung des Legierungsabbrandes beim MSG-Heißdrahtprozess in Abhängigkeit des Heißdrahtstroms

Neben der Heißdrahtstromstärke wurde ebenfalls in einem Stichversuch der Heißdrahtvorschub variiert. Für die in der vorherigen Versuchsreihe gezeigten 170 A, bei welcher ein starker Abbrand stattfand, wurde der Vorschub auf 15 m/min (50% Steigerung) erhöht. Dadurch konnte, wie Abbildung 8-6 zu entnehmen, der Legierungsabbrand stark reduziert werden. Für Chrom betrug dieser nur noch ca. 11%, Nickel 18%, Mangan 19% und Silizium 36%. Jedoch ist ebenfalls, anhand des Makroschliffs, zu sehen, dass eine Anbindung nicht über die gesamte Naht möglich war. Dies ist aber wahrscheinlich nicht auf ein zu kaltes Schmelzbad, sondern auf einen zu geringen Abstand zwischen den Schweißraupen zurückzuführen. Neben der Heißdrahtstromstärke ist ebenfalls der Drahtvorschub eine geeignete Stellgröße, um die gewünschten Eigenschaften einer Auftragsnaht herzustellen. Dabei ist zu sehen, dass durch den Vorschub ebenfalls die Produktivität des Prozesses positiv beeinflusst werden kann.

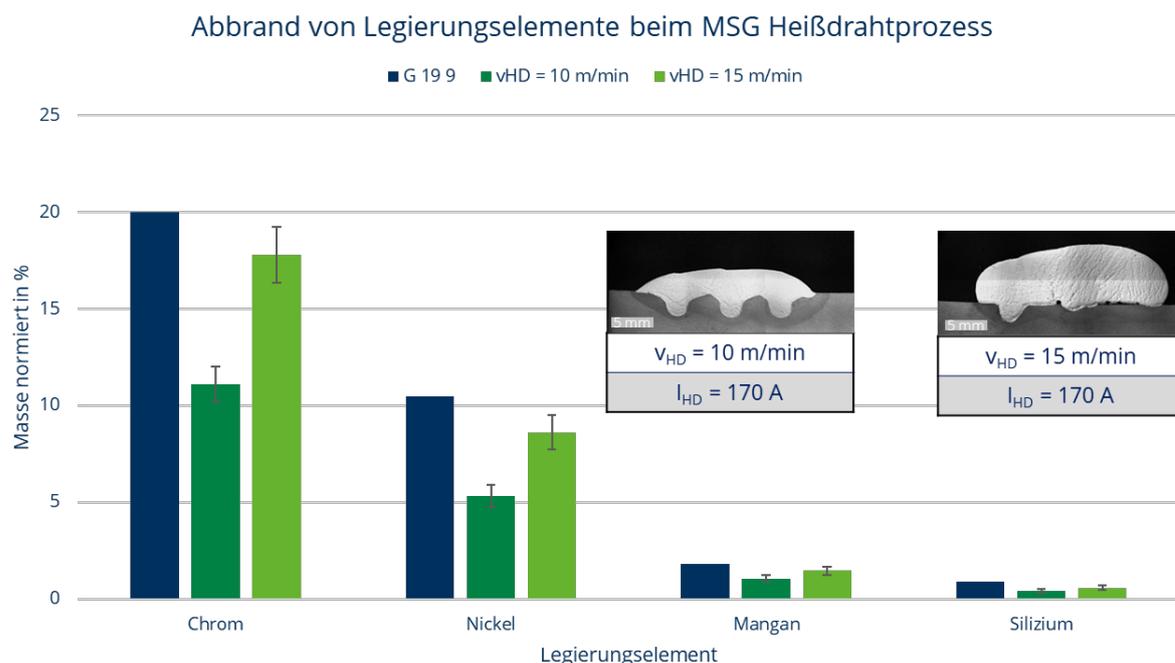


Abbildung 8-6: Darstellung des Legierungsabbrandes beim MSG-Heißdrahtprozess in Abhängigkeit vom Heißdrahtvorschub

8.2 Versuche zur additive Fertigung

MSG-Prozesse mit Zusatzdraht zeichnen sich durch eine große mögliche Abschmelzleistung aus. Dadurch sind diese Prozesse vor allem für die additive Fertigung von großvolumigen Bauteilen mittlerer Komplexität sehr gut geeignet. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Potential des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung des Zusatzdrahtes für die additive Fertigung untersucht. Dabei sollte Einerseits die Eignung hinsichtlich der Herstellung von Wandstrukturen untersucht werden, ebenso sollte auch für Bauteile größeren Volumens die Produktivität des Prozesses ermittelt werden.

8.2.1 Experimenteller Aufbau

Die Parameter und Anlagen in der folgenden Tabelle 8-2 wurden für alle Versuche verwendet. Einzelne Parameter wurden für die verschiedenen Untersuchungen angepasst. Die jeweiligen Parameter sind in der Beschreibung der einzelnen Experimente zu finden. Es wurden zwei Strukturen aufgebaut, einerseits eine Wandstruktur und zweitens eine Blockstruktur. Diese stellen die jeweiligen möglichen Anwendungsfälle sehr gut dar.

Tabelle 8-2: Versuchsparemeter für die Untersuchungen zur additiven Fertigung

Schweißposition nach DIN EN ISO 6947	PA
Schweißprozessart	Additive Fertigung
Grundwerkstoff	S355JR (1.0045)
Schweißdraht Ø	1,2 mm Massivdraht
Material Schweißdraht	G3Si1 (1.5125)

Schweißstromquelle	EWM Titan XQ 500 Puls
Heißdrahtstromquelle	EWM Tetrix 552 HW
Schutzgas	97,5 % Ar, 2,5 % CO ₂
Durchflussmenge Schutzgas	15 l/min
Substratabmessungen	200 mm x 100 mm x 20 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit v_{HD}	Variation
Heißdrahtstrom-Strom I_{HD}	Variation
Heißdraht-Anstellwinkel α	70°
Heißdraht-Kontaktrohrabstand zum Werkstück	25 mm
Länge der Heißdraht-Vorwärmstrecke	30 mm
Drahtvorschubgeschwindigkeit MSG v_{MSG}	Variation
Spannungskorrektur	0 V
Polung	Gleichstrom (DC)
Neigungswinkel des Brenners	0° (neutral)
MSG-Kontaktrohrabstand	20 mm
Schweißgeschwindigkeit v_w	Variation
Schweißnahtlänge	Variation
Schweißzeit	Variation

8.2.2 Ergebnisse Versuche zur additive Fertigung

Bei der Untersuchung zur Herstellung von Wandstrukturen konnte festgestellt werden, dass durch die Nutzung des Zusatzdrahtes eine höhere Komplexität beim Aufbau dünnwandiger Strukturen auftritt. Durch den zweiten Draht entsteht ein großes Schmelzbad, wobei gerade in höheren Lagen ein Heruntertropfen der Schmelze am Rand der Struktur auftritt. Einige Bilder von Versuchen zum Wandaufbau, bei denen kein gleichmäßiger Prozess möglich war, können dem Anhang entnommen werden. Bei den Versuchen wurde der Wärmeeintrag des Prozesses und damit die Schmelzbadgröße über die Heißdrahtzufuhr gesteuert. Jedoch ist zu sehen, dass für die additive Fertigung das Prozessfenster sehr eng ist. In der folgenden Abbildung 8-7 ist eine 15-lagige Wandstruktur abgebildet. Es ist zu sehen, dass durch den Einsatz des Heißdrahtes ungleichmäßige Lagen hergestellt wurden. Jedoch ist die Abschmelzleistung der additiven Fertigung durch den Einsatz von zwei Drähten mit jeweils 8 m/min doppelt so hoch, wie bei konventionellen Prozessen. Ebenfalls ist zu sehen, dass durch den zweiten Draht eine mittlere Lagenhöhe von ca. 3,5 mm möglich ist, welche dem 1,75-fachen des konventionellen Prozesses entspricht. Dadurch kann die Produktivität der Bauteilherstellung durch den Einsatz eines Heißdrahtes gesteigert werden, ist jedoch durch enge Prozessfenster begrenzt.



Verfahren Additive Fertigung	Substratwerkstoff S355 JR	Prüfung Sichtprüfung
Heißdrahtparameter $I_{HD} = 100 \text{ A}$, $v_{HD} = 8 \text{ m/min}$	Auftragswerkstoff G3Si1	Darstellung 
MSG Parameter $v_{MSG} = 8 \text{ m/min}$, $v_s = 10 \text{ mm/s}$	Darstellung Äußere Nahtgeometrie	

Abbildung 8-7: Mittels MSG-Heißdrahtprozess hergestellte Wandstruktur

Aufgrund der Beschriebenen Problematik des großen Schmelzbades und der an der Wandstruktur heruntertropfenden Schmelze wurde die Aufbaustrategie für großvolumige Bauteile angepasst. Bei der Herstellung von Bauteilen in Blockform wurde ein zweistufiger Prozess gewählt:

- Herstellung der Außenkontur mittels MSG-Prozess ohne Heißdraht
- Herstellung der inneren Lagen mittels MSG-Prozess mit Heißdraht

Durch die Anpassung der Aufbaustrategie konnten die Vorteile des MSG-Prozesses mit denen des Heißdrahtprozesses kombiniert werden. Die Herstellung der Außenkontur mit einem Impulslichtbogen ohne Heißdraht ermöglicht eine gezielte Wärmeeinbringung und dadurch eine endkonturnahe Bauteilherstellung. Durch den Einsatz des Heißdrahtes für die inneren Lagen können hochproduktive Prozessparameter eingesetzt werden, wodurch die Produktivität und damit auch die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung gesteigert werden kann. Vorteilhaft ist außerdem wieder die Herstellung des Bauteils mit einem Brenner – für den Wechsel auf Heißdraht ist kein Umrüstaufwand notwendig. In den folgenden Abbildungen sind das äußere Nahterscheinungsbild (Abbildung 8-8) und das innere Nahterscheinungsbild (Abbildung 8-9) dargestellt.



Abbildung 8-8: Mittels MSG-Heißdrahtprozess hergestellte Blockstruktur

Durch die Nutzung des Heißdrahtes für die inneren Lagen ist zu sehen, dass diese mit einer Verdopplung der Abschmelzleistung aufgebaut werden können. Dadurch steigt vor allem die Nahthöhe, im Vergleich zum konventionellen Prozess in den äußeren Lagen, um ca. das 2-fache an. Somit kann die Anzahl der inneren Lagen halbiert werden. Eine Beschreibung der genutzten Aufbauparameter, sowie ein Vergleich mit einem konventionell additiv gefertigten Bauteil mit CMT-Prozess ist in der folgenden Tabelle 8-3 darstellt.

Tabelle 8-3: Vergleich der Prozessparameter bei der additiven Fertigung mit einem konventionellen CMT-Prozess

Parameter	CMT Prozess	Heißdraht
Bahnplanung	30 Mäander in Querrichtung	1 äußere Bahn 3 Mäander in Längsrichtung
Schweißgeschwindigkeit	bis 15 mm/s	10 mm/s
Schweißnahtlänge	ca. 1050 mm	360 mm äußere Bahn 480 mm innere Bahn
Lagenhöhe	max. 2 mm	Äußere Bahn: 2,5 mm Innere Bahn: 5,0 mm
Bauteilhöhe	ca. 24 mm	ca. 25 mm
Wartezeit je Lage	60 s je geschweißter Lage	60s je geschweißter Innenkontur
Aufbauzeit	1460 s	1140 s

Anhand des Prozessvergleichs mit dem MSG-Prozess ist zu sehen, dass durch den Einsatz des Heißdrahtes die Abschmelzleistung verdoppelt werden kann. Durch die Variation der Aufbaustrategie liegt, durch größere Nahtlängen, die Steigerung der Produktivität bei ca. 22%.

Bei der Betrachtung des inneren Nahterscheinungsbildes in Abbildung 8-9 ist zu sehen, dass die gewählten Parameter zu einem sehr uniformen Ergebnis führen. Die inneren Lagen sind dabei etwa so hoch, wie zwei äußere Lagen zusammen. Es treten, vor allem im unteren Bereich, Poren bzw. Bindefehler am Nahtrand auf. Dies lässt sich einerseits auf die nicht ideale Schutzgasabdeckung des Demonstrators, aber auch auf die geringere Temperatur des Substrates vor der ersten Lage zurückführen. Durch den weiteren Lagenaufbau steigt die Temperatur des Substrates und der aufgebauten Struktur, wodurch die Viskosität der Schmelze weniger schnell abnimmt. Dadurch kann eine bessere Anbindung erfolgen. In einer späteren Umsetzung des Prozesses für die additive Fertigung kann durch eine Variation des Heißdrahtstromes diese Problematik gelöst werden.

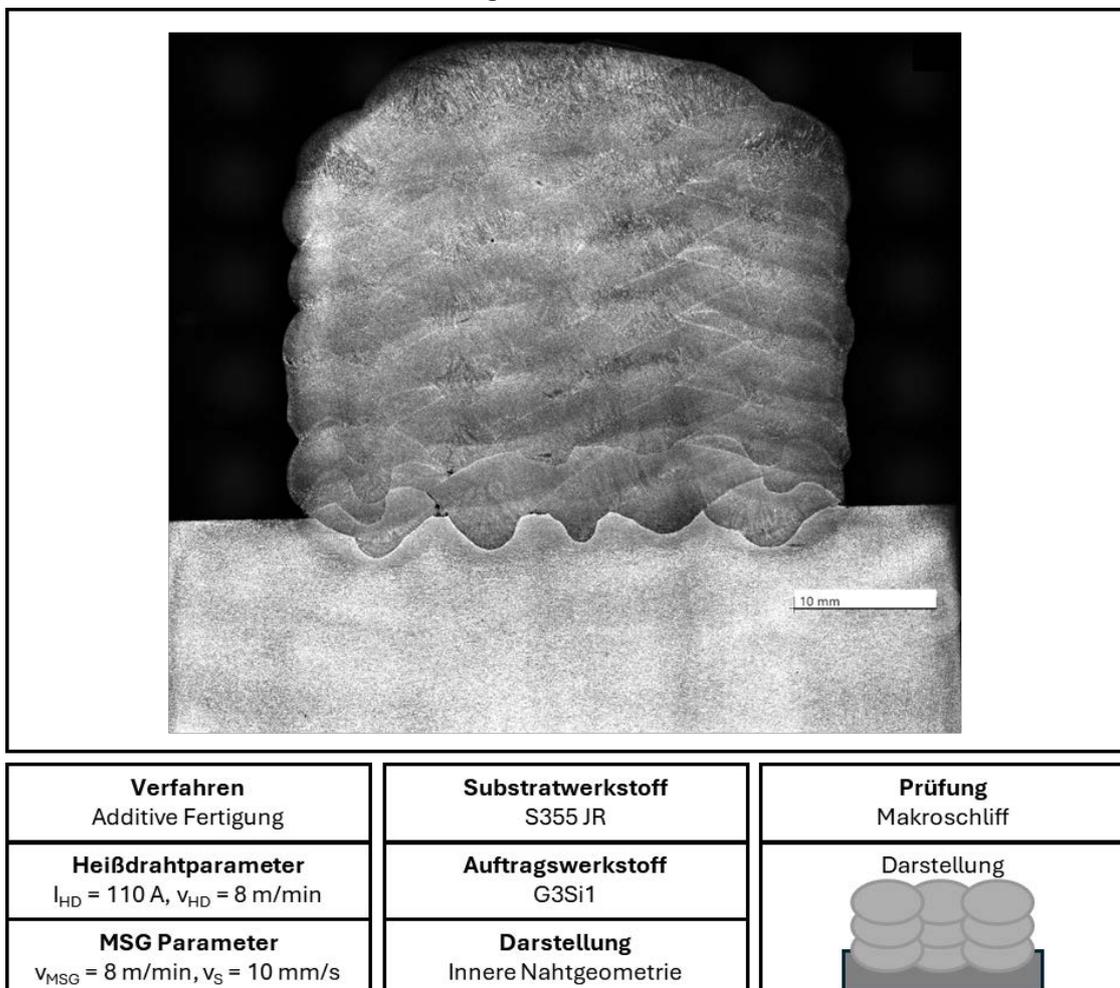


Abbildung 8-9: Innere Nahtgeometrie der additive gefertigten Blockstruktur

8.3 Schlussfolgerungen zum Auftragschweißen und der additiven Fertigung

Anhand der Untersuchungen zum Auftragschweißen und der additiven Fertigung kann gezeigt werden, dass der Prozess ein hohes Potential besitzt für dieses Schweißaufgaben eingesetzt zu werden. Eine weitere Zusammenfassung der Einzelergebnisse kann den folgenden Stichpunkten entnommen werden.

Auftragschweißen

- Hohe Produktivität bei guter Aufmischung möglich
- Legierungsabbrand kann durch Wahl der Prozessparameter begrenzt werden
- Wahl der Heißdrahtstromstärke kann die Nahtgeometrie beeinflussen und bedarfsgerecht gesteuert werden

Additive Fertigung

- Hohe Produktivität (des Prozesses für großvolumige Bauteile nachgewiesen)
- Pfadplanung muss für den Prozess angepasst werden
- Verdopplung der Abschmelzleistung auch für Wandstrukturen möglich

9 Empfehlungen zum Einsatz des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung und Zusammenfassung / Recommendations for the use of the GMAW hot wire process and summary

Im Rahmen des Forschungsprojektes, wurde der MSG Heißdrahtprozess mit vorgelagerter Vorwärmung des Heißdrahtes sowohl hinsichtlich der Prozesscharakteristik untersucht als auch das Potential des Prozesses für verschiedene Schweißaufgaben dargestellt.

Bezüglich der **Prozesscharakteristik** lässt sich zusammenfassen, dass die Steigerung des Heißdrahtvorschubs im Vergleich zur Erhöhung des Heißdrahtstroms einen signifikanteren Einfluss auf den Prozess hat, mit Ausnahme der Nahtbreite, bei der sich die Effekte ausgleichen. Bei einem Anstellwinkel von 50° verläuft der Prozess stabiler als bei 30°, was sich vor allem in einer homogeneren Nahtform mit weniger Ausreißern widerspiegelt. Bei hohen Heißdrahtvorschüben und einem Winkel von 30° wird das geometrische Prozessfenster des Schnittpunktes zwischen Heißdraht und Elektrode derart eingeschränkt, dass ein stabiler Prozess nicht mehr möglich ist. Neben der Nahtform wurden auch Schweißspannung und -strom gemessen, wobei festgestellt wurde, dass der MSG-Prozess nicht durch den Heißdraht beeinflusst wird. Die Prozessgrenze wird primär durch die Stromwärme bestimmt, wobei hohe Vorschübe zu einer niedrigeren Prozessgrenze führen. Die Dressierung des Drahtes und die Oxidation sind wesentliche Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität, deren Optimierung durch eine Überarbeitung der Drahtführung und die Integration einer Gasspülung in die Vorwärmeinheit unterstützt werden kann. Zusammenfassend können folgende generelle Empfehlungen zum Heißdrahtprozess gegeben werden:

- Der Prozess kann durch Variation der Heißdrahtstromstärke, ohne Änderung des Materialeintrags gesteuert werden.
- Eine Anpassung des Heißdrahtvorschubs kann ebenso zur Variation des Prozesses, ohne Anpassung des Energieeintrags genutzt werden.
- Ein Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr von 50° bedingt einen stabilen Prozess.
- Der vorgelagert vorgewärmte Heißdraht hat keinen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des MSG-Prozesses.
- Der Prozess wird durch die Heißdrahtstromstärke und die daraus folgende Aufweichung des Zusatzdrahtes begrenzt. Als weitere Einflussfaktoren können hierbei die Oxidation sowie Dressierung des Zusatzdrahtes gesehen werden.
- Durch Energieeintragsmessungen konnte gezeigt werden, dass der Winkel der Drahtzufuhr keinen Einfluss auf den Energieeintrag hat. Durch Adaption der Heißdrahtstromstärke kann die Nahtgeometrie angepasst werden, während der Energieeintrag ins Bauteil nahezu gleichbleibt.

Die Untersuchungen zum **Verbindungsschweißen** zeigen, dass der MSG-Heißdrahtprozess sehr gut geeignet ist 8 mm Baustahlbleche einlagig zu verschweißen, wobei eine Abschmelzleistung von bis zu 13,5 kg/h bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften erzielt werden kann. Dies legt nahe, dass der MSG-Heißdrahtprozess eine vielversprechende Option für das

Empfehlungen zum Einsatz des MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Vorwärmung und Zusammenfassung / Recommendations for the use of the GMAW hot wire process and summary

Verbindungsschweißen von Baustahlblechen darstellt und Potenzial für eine breite Anwendung in verschiedenen Branchen bietet.

In Bezug auf das effiziente Schweißen dicker Bleche zeigt sich, dass der MSG-Heißdrahtprozess ebenfalls großes Potential aufweist, wobei für 20 mm dicke Bleche mit der genutzten Nahtvorbereitung 3 Lagen erforderlich waren, die Wurzellage konnte mittels konventionellem MSG ohne Anlagenmodifikation hergestellt werden. Dies unterstreicht die Vielseitigkeit und Flexibilität des Prozesses für verschiedene Anwendungsszenarien und Betriebsbedingungen. Aus den durchgeführten Untersuchungen können folgende Anwendungshinweise zusammengefasst werden:

- Der MSG-Heißdrahtprozess eignet sich sehr gut zum Verbindungsschweißen von Baustahlblechen.
- Durch Variation der Heißdrahtstromstärke kann auch der Energieeintrags ins Bauteil angepasst werden.
- Die Nutzung eines Zusatzdrahtprozesses erlaubt es den konventionellen MSG-Prozess für Wurzelschweißungen ohne Umrüstzeiten zu nutzen.

Mithilfe eines **Demonstrators** bei dem die Zusatzdrahtzufuhr in der Gasdüse integriert ist, konnten steile Anstellwinkel der Heißdrahtzufuhr realisiert werden. Dabei zeigen Testschweißungen, dass bei einem Anstellwinkel von 65° eine große Interaktion zwischen dem Zusatzdraht und dem MSG-Draht stattfindet. Diese Interaktion hat Einfluss auf das Prozessfenster und bedingt, dass vor allem kurze Lichtbögen verwendet werden sollen. Die Untersuchungen zur Prozesscharakteristik mit steilem Anstellwinkel der Drahtzufuhr zeigen zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- Die Vorwärm länge hat einen erheblichen Einfluss auf die Prozessstabilität und sollte 30 mm nicht übersteigen
- Der Zusatzdraht sollte die Schutzgasabdeckung des MSG-Brenners so wenig wie möglich beeinflussen.
- Steile Anstellwinkel der Drahtzufuhr führen nicht zu besseren Ergebnissen hinsichtlich der Richtungsunabhängigkeit – ein Optimum wurde bei 50° Anstellwinkel gefunden.

Sowohl für das **Auftragschweißen** als auch für die **additive Fertigung** besitzt der Prozess ein hohes Potenzial. Beim Auftragschweißen ermöglicht er hohe Produktivität bei guter Aufmischung und begrenzt den Legierungsabbrand durch geeignete Prozessparameter. Darüber hinaus trägt die Wahl der Heißdrahtstromstärke zur Steuerung der Nahtgeometrie bei und ermöglicht eine bedarfsgerechte Anpassung des Schweißprozesses. Hinsichtlich der additiven Fertigung wurde eine hohe Produktivität für großvolumige Bauteile nachgewiesen, wobei eine Anpassung der Pfadplanung erforderlich ist und eine Verdopplung der Abschmelzleistung auch für Wandstrukturen möglich ist. Die Anwendung des Prozesses für diese Schweißaufgaben kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Beim Auftragschweißen ist eine hohe Produktivität bei guter Aufmischung möglich. Desweiteren kann der Legierungsabbrand durch die Wahl der Prozessparameter begrenzt werden.
- Bei der additiven Fertigung kann eine hohe Produktivität des Prozesses für großvolumige Bauteile nachgewiesen werden.
- Durch das große Schmelzbad muss die Pfadplanung für den Prozess jedoch angepasst werden.
- Durch den Zusatzheißdraht ist eine Verdopplung der Abschmelzleistung möglich.

10 Ausblick / Perspective

Die Forschungsergebnisse des Projektes zum MSG-Heißdrahtprozess liefern einen umfassenden Einblick die Prozesscharakteristika und Anwendungspotenziale. Diese Erkenntnisse bieten eine solide Basis für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen und industrielle Anwendungen in verschiedenen Schweißaufgaben. Die Optimierung des Heißdrahtprozesses durch die Variation der Drahtstromstärke und des Vorschubs ermöglicht eine präzise Steuerung des Prozesses ohne signifikante Änderungen am Materialeintritt.

Eine Implementierung des MSG-Heißdrahtprozesses bei nationalen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) könnte vielfältige Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Qualität in der Schweißproduktion eröffnen. Aufgrund der Flexibilität, Prozesseinstellbarkeit und Anpassungsfähigkeit könnte der Heißdrahtprozess insbesondere für KMU attraktiv sein, die nach kosteneffizienten und hochwertigen Schweißlösungen suchen.

Erhöhte Produktivität: Der MSG-Heißdrahtprozess ermöglicht eine erhöhte Schweißgeschwindigkeit und somit eine gesteigerte Produktivität. Dies ist besonders für KMU von Bedeutung, da sie oft unter Druck stehen, ihre Produktionskapazitäten zu maximieren, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Qualitätsverbesserung: Durch die präzise Steuerung des Prozesses können KMU eine verbesserte Schweißqualität erzielen. Dies ist entscheidend, um die Anforderungen der Kunden zu erfüllen und mögliche Nacharbeiten zu reduzieren.

Flexibilität und Vielseitigkeit: Der Heißdrahtprozess bietet eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten, von dünnen Blechen bis hin zu dicken Bauteilen. KMU können somit verschiedene Schweißaufgaben mit einem einzigen Prozess bewältigen, was die Anpassungsfähigkeit und Vielseitigkeit ihrer Fertigungslinien erhöht.

Kostensparnis: Obwohl die anfänglichen Investitionskosten für die Einführung des Heißdrahtprozesses möglicherweise höher sind, können KMU langfristig von Kosteneinsparungen profitieren. Eine erhöhte Produktivität, reduzierte Nacharbeiten und verbesserte Prozesseffizienz können zu einer insgesamt niedrigeren Fertigungskostenbasis führen.

Wettbewerbsvorteil: Die Implementierung moderner Schweißtechnologien wie dem MSG-Heißdrahtprozess kann KMU einen Wettbewerbsvorteil verschaffen, indem sie ihre Fertigungskapazitäten verbessern und qualitativ hochwertigere Produkte schneller und effizienter liefern können.

Insgesamt bietet der MSG-Heißdrahtprozess KMU die Möglichkeit, ihre Schweißprozesse zu optimieren, die Qualität zu verbessern und wettbewerbsfähiger zu werden. Durch eine sorgfältige Planung, Schulung des Personals und kontinuierliche Prozessverbesserung können KMU die Vorteile dieser Technologie voll ausschöpfen und ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit stärken.

11 Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

Tagungsbände

MSG-Heißdrahtschweißen mit vorgelagerter Heißdrahtvorwärmung
Ungethüm, T., Spaniol, E., Trautmann, M. & Füssel, U., 16 Sept. 2021, DVS Congress 2021: Große Schweißtechnische Tagung. Düsseldorf: DVS Media GmbH, S. 441-447 6 S. (DVS-Berichte, Band 371).

MSG-Heißdrahtschweißen mit vorgelagerter Heißdrahtvorwärmung
Ungethüm, T., Spaniol, E., Trautmann, M. & Füssel, U., 2022, 42. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik: Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung in Beverungen vom 06. bis 08 Oktober 2021. Düsseldorf: DVS Media GmbH, S. 156-163 8 S. (DVS-Berichte, Band 385).

Verbindungsschweißen mittels eines MSG-Heißdrahtprozesses mit vorgelagerter Heißdrahtvorwärmung
Ungethüm, T., Spaniol, E., Trautmann, M. & Füssel, U., 20 Sept. 2022, DVS Berichte. Düsseldorf: DVS Media GmbH, Band 382. S. 646-652 6 S.

GMAW hot-wire process with indirect resistive heating of the auxiliary wire
Ungethüm, T., Schilling, P., Spaniol, E. & Füssel, U., Jul. 2022, in: IIW Annual Assembly, Proceedings of the meeting of C-XII, Tokio (Japan).

Joint welding of mild steel using a GMAW hot-wire process
Ungethüm, T., Schilling, P., Spaniol, E., Schmale, H. C. & Füssel, U., Juli 2023, in: IIW Annual Assembly, Proceedings of the meeting of C-XII, Singapur (Singapur).

Erweiterung der Prozessgrenzen beim MSG-Heißdrahtschweißen durch Anpassung von Material- und Energieeintrag mittels einer vorgelagerten Heißdrahtvorwärmung
T. Ungethüm, P. Schilling, E. Spaniol, H.C. Schmale, U. Füssel, April 2024, in: Tagungsband des Innovationstag Fügetechnik 2024, Düsseldorf (Deutschland)

Zeitschriftenartikel

GMAW hot-wire process with indirect resistive heating of the auxiliary wire Ungethüm, T., Schilling, P., Spaniol, E. & Füssel, U., Aug. 2023, in: Welding in the world. 67, 8, S. 2031–2038 8 S.

Vorgesehene Veröffentlichungen

Joint welding of mild steel using a GMAW hot-wire process Tim Ungethüm, Paul Schilling, Erik Spaniol et al.

12 **Literaturverzeichnis / Bibliography**

- [1] Fang, C., Meng, X., Hu, Q., Wang, F., Ren, H., Wang, H., Guo, Y. u. Mao, M.: TANDEM and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support. *Journal of Iron and Steel Research International* 19 (2012) 5, S. 79–85
- [2] Yokota, Y., Shimizu, H., Nagaoka, S., Ito, K. u. Arita, H.: Development and Application of the 3-Electrode MAG High-Speed Horizontal Fillet Welding Process. *Welding in the World* 56 (2012) 1-2, S. 43–47
- [3] Goecke, S., Berlin, F. B. T., Hedegård, J., Joining, S. u. AB, ESAB Welding Equipment: Tandem mig/mag welding. *A Welding Review Published by Esab* 56 (2001) 2-3, S. 24–28
- [4] Motta, M. F. u. Dutra, J. C.: Effects of the variables of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on the weld bead geometry. *Welding International* 20 (2006) 10, S. 785–793
- [5] Moinuddin, S. Q., Kapil, A., Kohama, K., Sharma, A., Ito, K. u. Tanaka, M.: On process–structure–property interconnection in anti-phase synchronised twin-wire GMAW of low carbon steel. *Science and Technology of Welding and Joining* 21 (2016) 6, S. 452–459
- [6] Cabral, T. d. S., Magalhães Braga, E. de, Augusto Maciel Mendonça, E. u. Scott, A.: Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. *Welding International* 29 (2015) 12, S. 928–936
- [7] Marques, L. F. N., Santos, E. B. F., Gerlich, A. P. u. Braga, E. M.: Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. *Science and Technology of Welding and Joining* 22 (2017) 2, S. 87–96
- [8] Bergmann, J., Frisch, W. u. Günther, K.: Aufmischungsarmes, endkonturnahes Auftragschweißen hartstoffverstärkter Fe-Hartpanzerungen mittels geregelter, energiereduzierter MSG-Kurzlichtbogentechnik. *Schweißen und Schneiden-DVS-Berichte* 296 (2013), S. 602–607
- [9] Cabral, T. d. S., Dias, S. E., Filho, A. A. C., Baia, P. E. C., Borges, D. J. A. u. Braga, E. d. M.: Influence of a cobalt-based wire injection in austenitic coating deposited via CW-GMAW. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 40 (2018) 9, S. 1–11
- [10] Günther, K., Bergmann, J. P. u. Schulze, R.: Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing. *Welding Journal* 97 (2018) 4, S. 99–107

- [11] Midawi, A., Ribeiro, R., Gerlich, A., F. Dos Santos, Emanuel B., Assunção, P. u. Braga, E.: Characterization of the HAZ in X80 welds fabricated by The CW-GMAW process. 2017
- [12] Schnick, M., Wilhelm, G., Lohse, M., Füssel, U. u. Murphy, A. B.: Three-dimensional modelling of arc behaviour and gas shield quality in tandem gas–metal arc welding using anti-phase pulse synchronization. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44 (2011) 18, S. 185205
- [13] Moinuddin, S. Q. u. Sharma, A.: Arc stability and its impact on weld properties and microstructure in anti-phase synchronised synergic-pulsed twin-wire gas metal arc welding. *Materials & Design* 67 (2015), S. 293–302
- [14] Groetelaars, P. J., Morais, C. O. de u. Scotti, A.: Influence of the arc length on metal transfer in the single potential double-wire MIG/MAG process. *Welding International* 23 (2009) 2, S. 112–119
- [15] Ma, G. u. Zhang, Y.: A novel DE-GMAW method to weld steel tubes on simplified condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 63 (2012) 1-4, S. 147–153
- [16] Häßler, M., Rose, S. u. Füssel, U.: The influence of arc interactions and a central filler wire on shielding gas flow in tandem GMAW. *Welding in the World* 60 (2016) 4, S. 713–718
- [17] Ding, X., Li, H., Yang, L. u. Gao, Y.: Numerical simulation of metal transfer process in tandem GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (2013) 1-4, S. 107–112
- [18] 2020. *DIN 8580:2020-01, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*
- [19] 2003. *DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [20] Fritz, A. H. (Hrsg.): *Fertigungstechnik*. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018
- [21] Matthes, K. J. u. Schneider, W. (Hrsg.): *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Hanser eLibrary. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2016
- [22] Schellhase, M.: *Der Schweißlichtbogen - ein technologisches Werkzeug*. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 84. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1985
- [23] 2021. *DIN EN ISO 4063:2021-02, Schweißen, Hartlöten, Weichlöten, Schneiden, Mechanisches Fügen und Kleben - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern*
- [24] Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- [25] Schuler: Praxiswissen Schweißtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden 2019
- [26] US2497629 (A)
- [27] Hermanns, M. J. M. u. den Ouden, G.: Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. *Welding Journal* 78 (1999) 4, S. 137–141
- [28] Furukawa, K.: New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding International* 20 (2006) 6, S. 440–445
- [29] Goecke, S. F.: Low Energy Arc Joining Process for Materials Sensitive to Heat. Mündersbach: EWM Hightec Welding GmbH 2005
- [30] Feng, J., Zhang, H. u. He, P.: The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. *Materials & Design* 30 (2009) 5, S. 1850–1852
- [31] DVS 0973-1:2019-04, Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2019
- [32] Dzelnitzki, D.: Vergrößerung des Einbringvolumens oder Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit? - Vorteile des MAG-Hochleistungsschweißens. Mündersbach: EWM Hightec Welding GmbH 2000
- [33] 2008. *DIN 1910-100:2008-02, Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005*
- [34] Suban, M. u. Tušek, J.: Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology* 119 (2001) 1-3, S. 185–192
- [35] Blackman, S. A., Dorling, D. V. u. Howard, R.: High-Speed Tandem GMAW for Pipeline Welding. 2002 4th International Pipeline Conference (2009), S. 517–523
- [36] Spaniol, E.: Erweiterung der Prozessgrenzen von Lichtbogenheißeßdrahtverfahren. Dissertation. Dresdner fügetechnische Berichte. Technische Universität Dresden 2021
- [37] Bajcer, B., Hrženjak, M., Pompe, K. u. Jež, B.: Improvement of Energy and Materials Efficiencies by Introducing Multiple-Wire Welding. *Metalurgija* 46 (2007)
- [38] Queguineur, A., Marolleau, J., Lavergne, A. u. Rückert, G.: Evaluation of tandem controlled short-circuit GMAW for improved deposition in additive manufacture of large Nickel Aluminium Bronze naval components. *Welding in the World* 64 (2020) 8, S. 1389–1395
- [39] Syed Quadir Moinuddin u. Abhay Sharma: Multiple-Wire Welding GMAW and SAW. In: *Advances in Welding Technologies for Process Development*. CRC Press 2019, S. 1–22
- [40] Yasuda, K., Hinata, T., Jimma, T. u. Onzawa, T.: High speed single sided welding of thin sheet by multi-electrode arc welding. *Welding International* 3 (1989) 1, S. 37–41

- [41] Ueyama, T., Ohnawa, T., Tanaka, M. u. Nakata, K.: Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining* 10 (2005) 6, S. 750–759
- [42] Pal, K. u. Pal, S. K.: Study of weld joint strength using sensor signals for various torch angles in pulsed MIG welding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3 (2010) 1, S. 55–65
- [43] Ueyama, T., Ohnawa, T., Tanaka, M. u. Nakata, K.: Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 12 (2007) 6, S. 523–529
- [44] Tušek, J., Umek, I. u. Bajcer, B.: Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 10 (2005) 1, S. 15–22
- [45] Li, K. u. Zhang, Y. M.: Consumable double-electrode GMAW-Part 1: The process. *Welding Journal* 87 (2008) 1
- [46] Wu, K., He, Z., Liang, Z. u. Cheng, J.: The dynamic behavior of double arc interference in high-power double wire pulsed GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88 (2017) 9-12, S. 2795–2802
- [47] Matsumoto, T. u. Sasabe, S.: Tandem MIG welding of aluminium alloys. *Welding International* 19 (2005) 12, S. 945–949
- [48] Ribeiro, R. A., Dos Santos, E. B. F., Assunção, P. D. C., Braga, E. M. u. Gerlich, A. P.: Cold Wire Gas Metal Arc Welding: Droplet Transfer and Geometry. *Welding Journal* (2019)
- [49] Günther, K.: Werkstofftechnische Betrachtungen zum Heißdraht unterstützten MSG-Auftragschweißen hartstoffverstärkter Verschleißschutzlegierungen. Dissertation. *Fertigungstechnik - aus den Grundlagen für die Anwendung, Band 5. Technische Universität Ilmenau* 2018
- [50] Ribeiro, R. A., Santos, E. B. F., Assunção, P. D. C., Maciel, R. R. u. Braga, E. M.: Predicting weld bead geometry in novel CW-GMAW Process. *Welding Journal* 94 (2015) September, S. 301–311
- [51] Jorge, V. L., Scotti, F. M., Reis, R. P. u. Scotti, A.: The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (2020) 7-8, S. 3485–3498
- [52] Midawi, A. R. H., Ribeiro, R. A., Dos Santos, E. u. Gerlich, A. P.: Cold Wire GMAW for Automotive Applications. *CanWeld* (2017)

- [53] Heinitz, A., Rose, S., Jäckel, S., Hertel, M. u. Füssel, U.: Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen - Reduzierung gefährlicher Schweißrauche durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff. Abschlussbericht zum AiF-Projekt 18.179B. Technische Universität Dresden 2016
- [54] US3122629 (A)
- [55] Hori, K., Watanabe, H., Myoga, T. u. Kusano, K.: Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire – research on pulse heated hot wire TIG welding processes. *Welding International* 18 (2004) 6, S. 456–468
- [56] Raith, W.: Elektromagnetismus. Lehrbuch der Experimentalphysik / Bergmann, Schaefer, Bd. 2. Berlin [u.a.]: de Gruyter 2006
- [57] Bouaifi, B.: Beitrag zum Plasma-Heißdraht-Auftragschweißen dünner aufmischungsarmer Schutzschichten gegen Korrosion in wässrigen Lösungen. Dissertation. Technische Universität Clausthal 1988
- [58] Arita, H., Morimoto, T., Nagaoka, S. u. Nakano, T.: Development of Advanced 3-Electrode MAG High-Speed Horizontal Fillet Welding Process. *Welding in the World* 53 (2009) 5-6, S. 35–43
- [59] Günther, K., Bergmann, J. P. u. Schulze, R.: Hot wire assisted gas metal arc welding of Ni- TC hardfacings. *Welding and Cutting* 2013 12, S. 382–387
- [60] Guest, S. D.: Depositing Ni-WC Wear Resistant Overlays with Hot-Wire Assist Technology, University of Alberta Libraries 2014
- [61] Tsuyama, T., Yuda, M. u. Nakai, K.: Effects of hot wire on mechanical properties of weld metal using gas-shielded arc welding with CO₂ gas. *Welding in the World* 58 (2014) 1, S. 77–83
- [62] Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q., Tang, S., Fan, H. u. Ma, S.: Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes* 32 (2017) 16, S. 1881–1886
- [63] Häßler, M., Rose, S., Füssel, U., Günther, K., Eiber, M. u. Bergmann, J. P.: Herstellen gradierter Verschleißschutzschichten durch MSG-Tandemschweißen mit zusätzlicher Hartstoffeinbringung. Tagungsband zur Großen Schweißtechnischen Tagung (2015)
- [64] EWM AG u. ITAG GmbH: EWM PraxisReport Juni 2017. https://products.ewm-group.com/images/referenzen/dokumente/EWM_PraxisReport_Itag_DE_053_000016_00001.pdf, abgerufen am: 24.03.2022
- [65] Spaniol, E., Trautmann, M., Ungethüm, T., Hertel, M., Füssel, U., Henckell, P. u. Bergmann, J. P.: Development of a highly productive GMAW hot wire process using a two-dimensional arc deflection. *Welding in the World* 64 (2020) 5, S. 873–883
- [66] US4447703 (A)

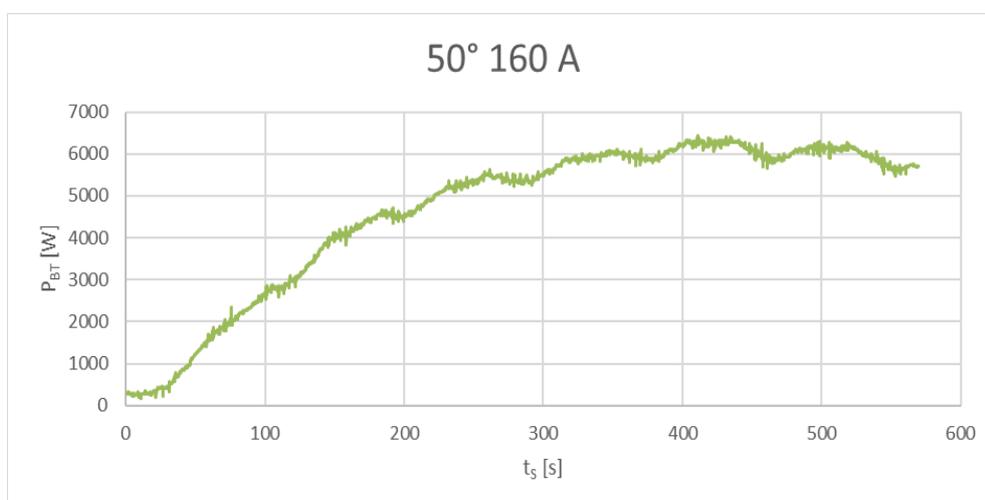
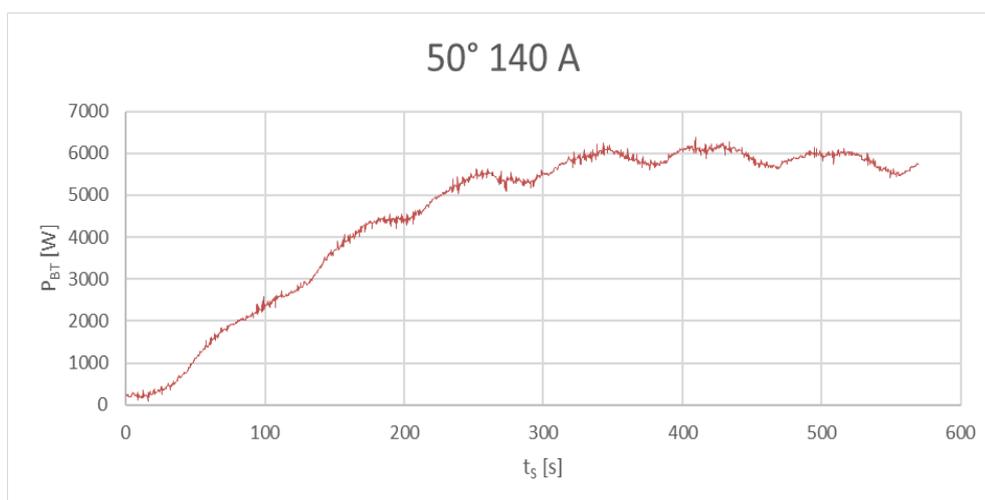
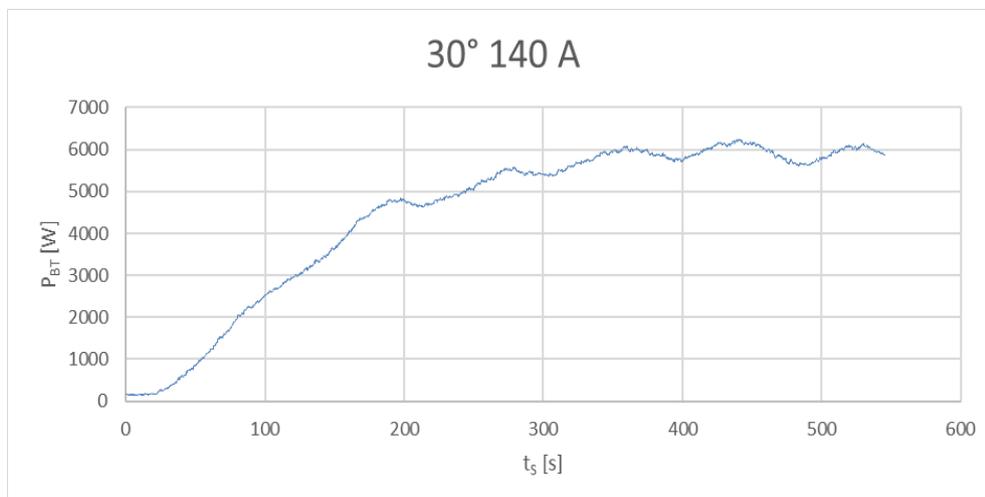
- [67] Stol, I.: Development of an advanced gas metal arc welding process. *Welding Journal* 68 (1989) 8, S. 313–326
- [68] Shahi, A. S. u. Pandey, S.: Effect of Auxiliary Preheating of the Filler Wire on Quality of Gas Metal Arc Stainless Steel Claddings. *Journal of Materials Engineering and Performance* 17 (2008) 1, S. 30–36
- [69] Ungethüm, T., Spaniol, E. u. Füssel, U.: Entwicklung eines hochproduktiven, richtungsunabhängigen WIG-Heißdrahtprozesses für die drahtbasierte additive Fertigung metallischer Bauteil. DVS Kongress (2019)
- [70] Ungethüm, T., Spaniol, E., Trautmann, M. u. Füssel, U.: MSG-Heißdrahtschweißen mit vorgelagerter Heißdrahtvorwärmung. DVS Kongress (2021)
- [71] Ogawa, Y.: High speed imaging technique Part 1 – high speed imaging of arc welding phenomena. *Science and Technology of Welding and Joining* 16 (2011) 1, S. 33–43
- [72] Schnick, M.: Numerische und experimentelle Verfahrens- und Brennerentwicklung beim Plasmalichtbogenschweißen. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2010. *Dresdner fügetechnische Berichte*, Bd. 20. Dresden: TUDpress 2011
- [73] Scotti, A., Ponomarev, V. u. Lucas, W.: A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 6, S. 1406–1413
- [74] Subramaniam, S., White, Jones, J. E. u. Lyons, D. W.: Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-* 77 (1998), 458-s
- [75] Spaniol, E.: Erweiterung der Prozessgrenzen von Lichtbogenheißdrahtverfahren, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden
- [76] Krehl, P. u. Engemann, S.: August Toepler — The first who visualized shock waves. *Shock Waves* 5 (1995) 1-2, S. 1–18
- [77] Settles, G. S. u. Hargather, M. J.: A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques. *Measurement Science and Technology* 28 (2017) 4, S. 42001
- [78] Versluis, M.: High-speed imaging in fluids. *Experiments in Fluids* 54 (2013) 2, S. 1–35
- [79] Schnick, M., Füssel, U., Häßler, M. u. Dreher, M. (Hrsg.): Visualisierung der Schutzgasabdeckung beim Lichtbogenschweißen. 2012
- [80] Dreher, M.: Numerische und diagnostische Untersuchung der Schutzgasströmung beim Metallschutzgasschweißen für die Brenner- und Verfahrensentwicklung. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2014. *Dresdner fügetechnische Berichte*, Bd. 29. Dresden: TUDpress 2014
- [81] Kocache, R. M. A., Swan, J. u. Holman, D. F.: A miniature rugged and accurate solid electrolyte oxygen sensor. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 17 (1984) 6, S. 477–482

- [82] *DIN EN 1011-1:2009-07, Schweißen_- Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe_- Teil_1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen; Deutsche Fassung EN_1011-1:2009*
- [83] Stenbacka, N., Choquet, I. u. Hurtig, K.: Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding. 2012, S. 1–21
- [84] Giedt, W. H., Tallerico, L. N. u. Fuerschbach, P. W.: GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurements. *Weld. J.* 68 (1989) 1, S. 28
- [85] Motta, M. F. u. Dutra, J. C.: Effects of the variables of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on the weld bead geometry. *Welding International* 20 (2006) 10, S. 785–793
- [86] Pépe, N., Egerland, S., Colegrove, P. A., Yapp, D., Leonhartsberger, A. u. Scotti, A.: Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes. *Science and Technology of Welding and Joining* 16 (2011) 5, S. 412–417
- [87] Haelsig, A., Kusch, M. u. Mayer, P.: New Findings On The Efficiency Of Gas Shielded Arc Welding. *Welding in the World* 56 (2012) 11-12, S. 98–104
- [88] Quintino, L., Liskevich, O., Vilarinho, L. u. Scotti, A.: Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (2013) 9-12, S. 2833–2840
- [89] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C., Shin, Y. C., Zhang, S. u. Zavattieri, P. D.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* 69 (2015), S. 65–89
- [90] Ding, Y., Zhang, X. u. Kovacevic, R.: A laser-based machine vision measurement system for laser forming. *Measurement* 82 (2016), S. 345–354
- [91] Hu, Z., Qin, X., Li, Y., Yuan, J. u. Wu, Q.: Multi-bead overlapping model with varying cross-section profile for robotic GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 31 (2020) 5, S. 1133–1147
- [92] Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., Melchor, M. A., Mugica, D. u. Suárez, A.: Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. *Procedia Manufacturing* 13 (2017), S. 778–785
- [93] Li, Y., Sun, Y., Han, Q., Zhang, G. u. Horváth, I.: Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts. *Journal of Materials Processing Technology* 252 (2018), S. 838–848
- [94] Cui, J., Yuan, L., Commins, P., He, F., Wang, J. u. Pan, Z.: WAAM process for metal block structure parts based on mixed heat input. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113 (2021) 1-2, S. 503–521

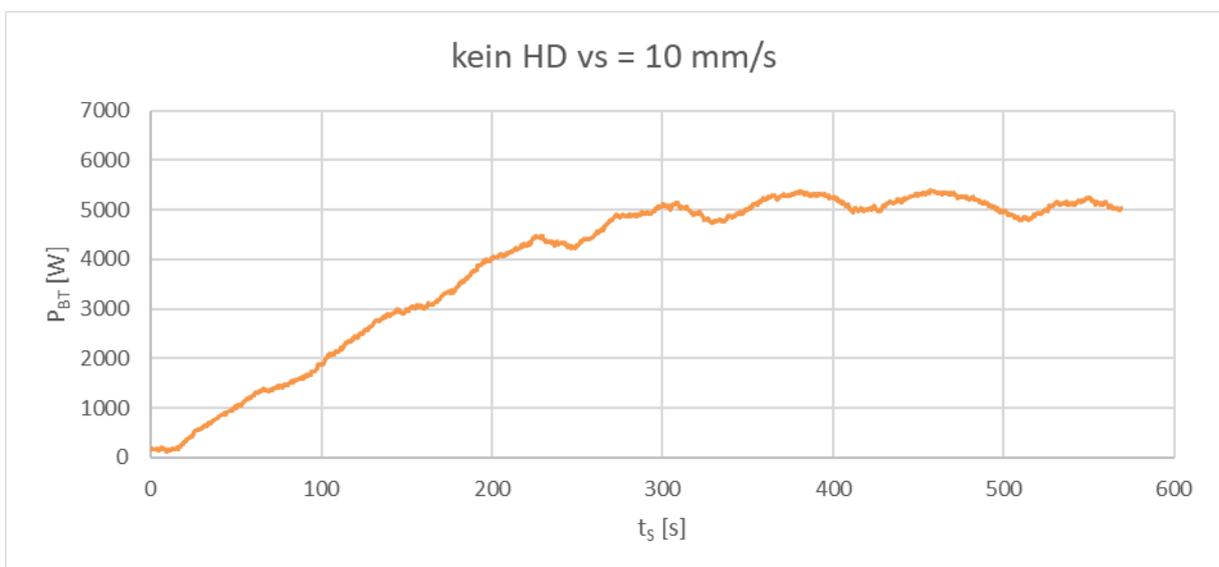
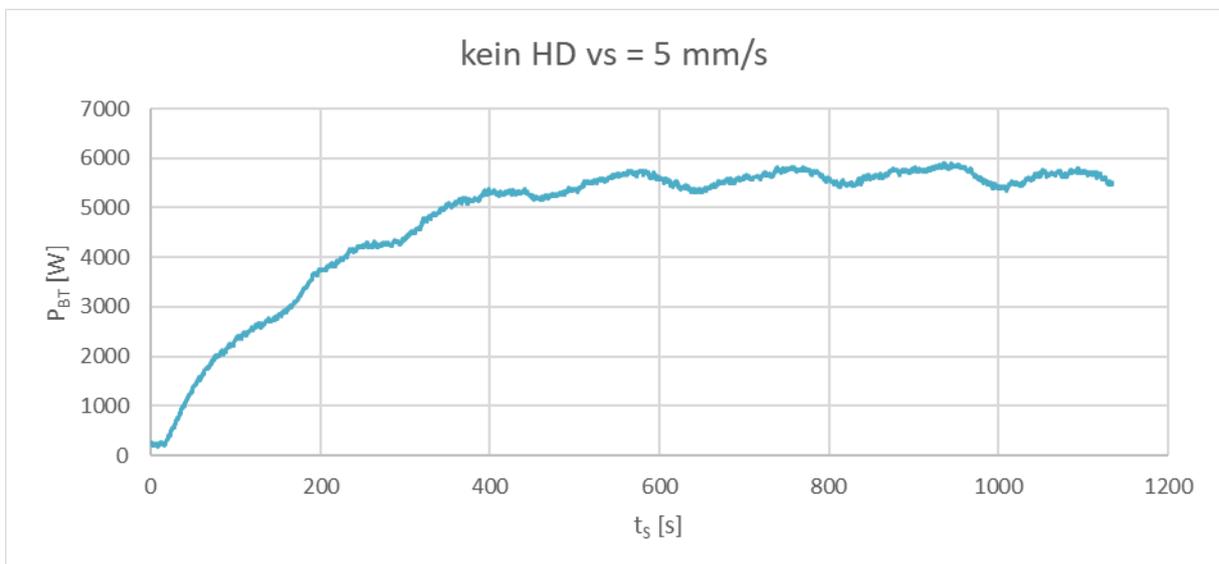
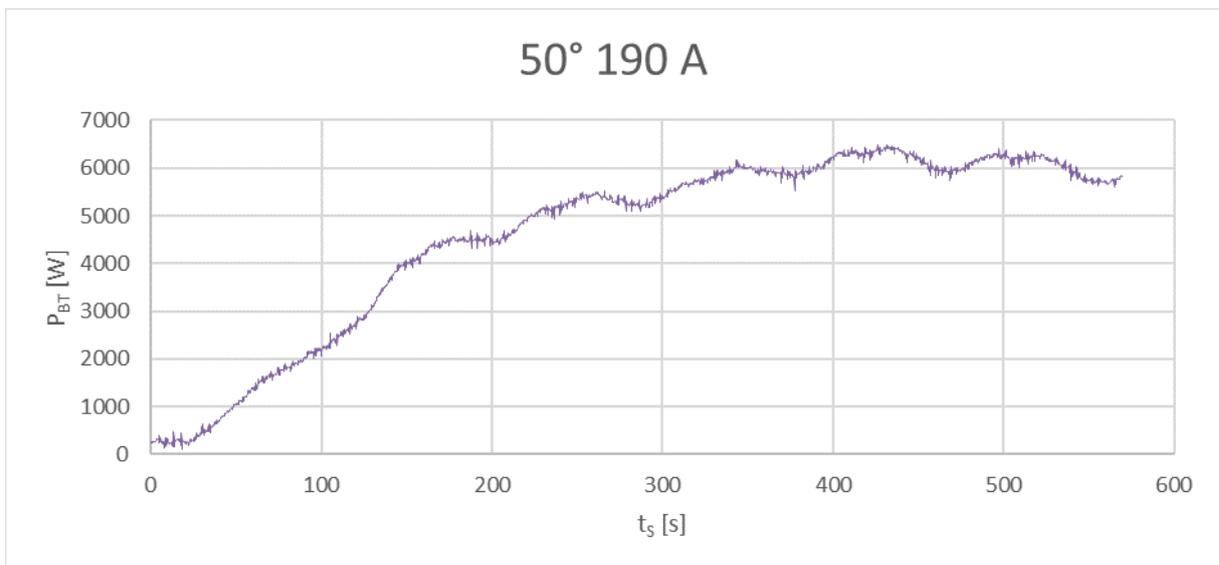
- [95] Heralic, A.: Monitoring and Control of Robotized Laser Metal-wire Deposition, Chalmers Tekniska Hogskola Dissertation. Göteborg (Schweden) 2012
- [96] Xiong, J., Li, Y.-J., Yin, Z.-Q. u. Chen, H.: Determination of Surface Roughness in Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Laser Vision Sensing. Chinese Journal of Mechanical Engineering 31 (2018) 1
- [97] Tang, S., Wang, G. u. Zhang, H.: In situ 3D monitoring and control of geometric signatures in wire and arc additive manufacturing. Surface Topography: Metrology and Properties 7 (2019) 2, S. 25013
- [98] Dias, J. M. S., dos Santos Paes, L. E., Santos, A. G. M., Borba, T. M. D., Da Paixão Carvalho, L. u. Vilarinho, L. O.: A methodology for multipass gas metal arc welding of shipbuilding steel plates with different thicknesses. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 127 (2023) 1-2, S. 751–773
- [99] Bender, B. u. Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer eBook Collection. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2021
- [100] EP1201346 (A1)
- [101] DE10314278 (A1)
- [102] Dreher, M., Füssel, U., Rose, S., Häßler, M., Hertel, M. u. Schnick, M.: Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW. Welding in the World 57 (2013) 3, S. 391–410
- [103] Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG: MIG/MAG-Gasdüsen | ABICOR BINZEL, 2022. <https://www.binzel-abicor.com/CH/deu/produkte/manuell/migmag-schweissbrenner/verschleissteile/gasduesen/>, abgerufen am: 08.03.2022

Anhang / Appendix

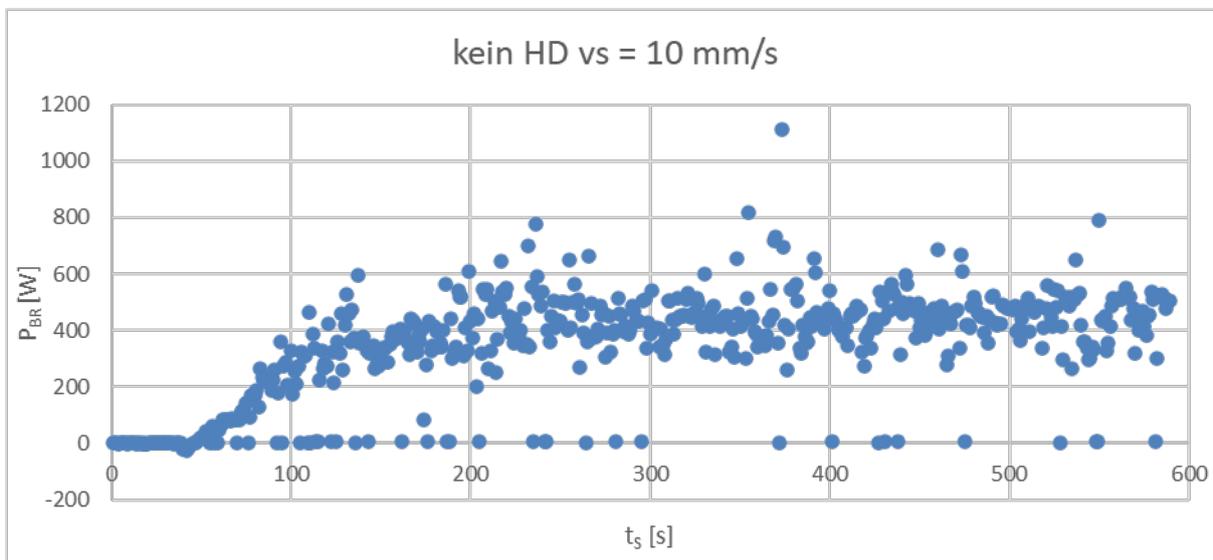
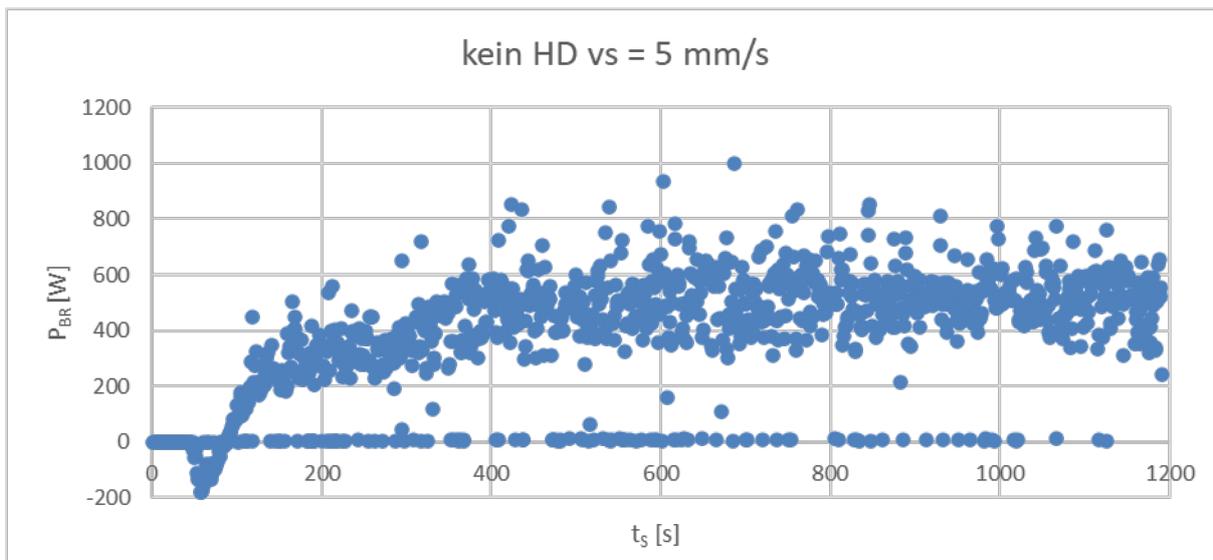
A.1 Messdaten zur Bestimmung des Energieeintrags



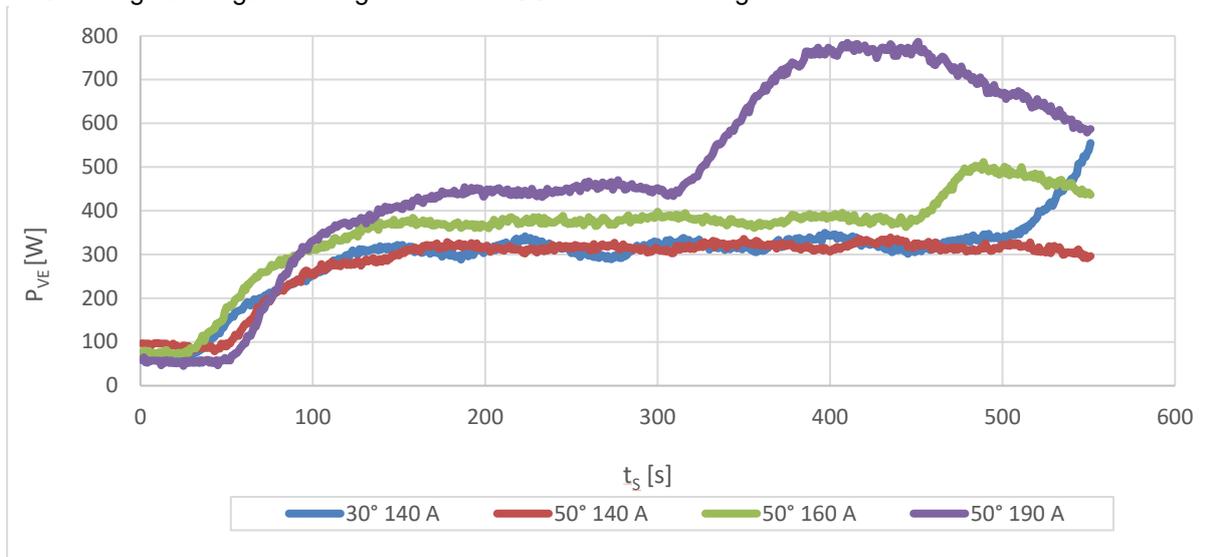
A- 1: Energieeintragsmessungen an der Substratkühlung Teil 1



A- 2: Energieeintragsmessungen an der Substratkühlung Teil 2



A- 3: Energieeintragsmessungen an der MSG-Brennerkühlung



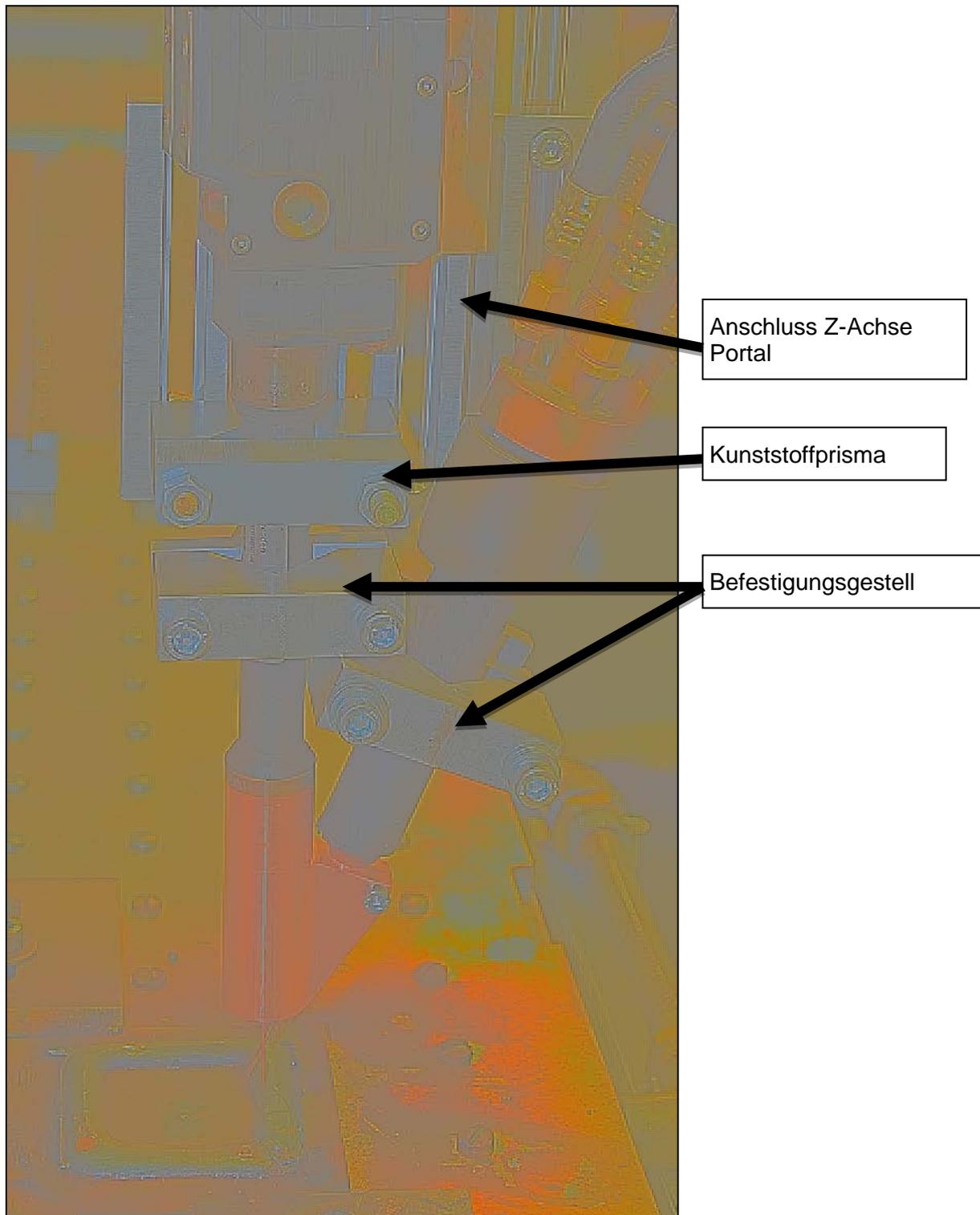
A- 4: Energieeintragsmessungen an der Heißdrahtkühlung

A.2 Anforderungsliste

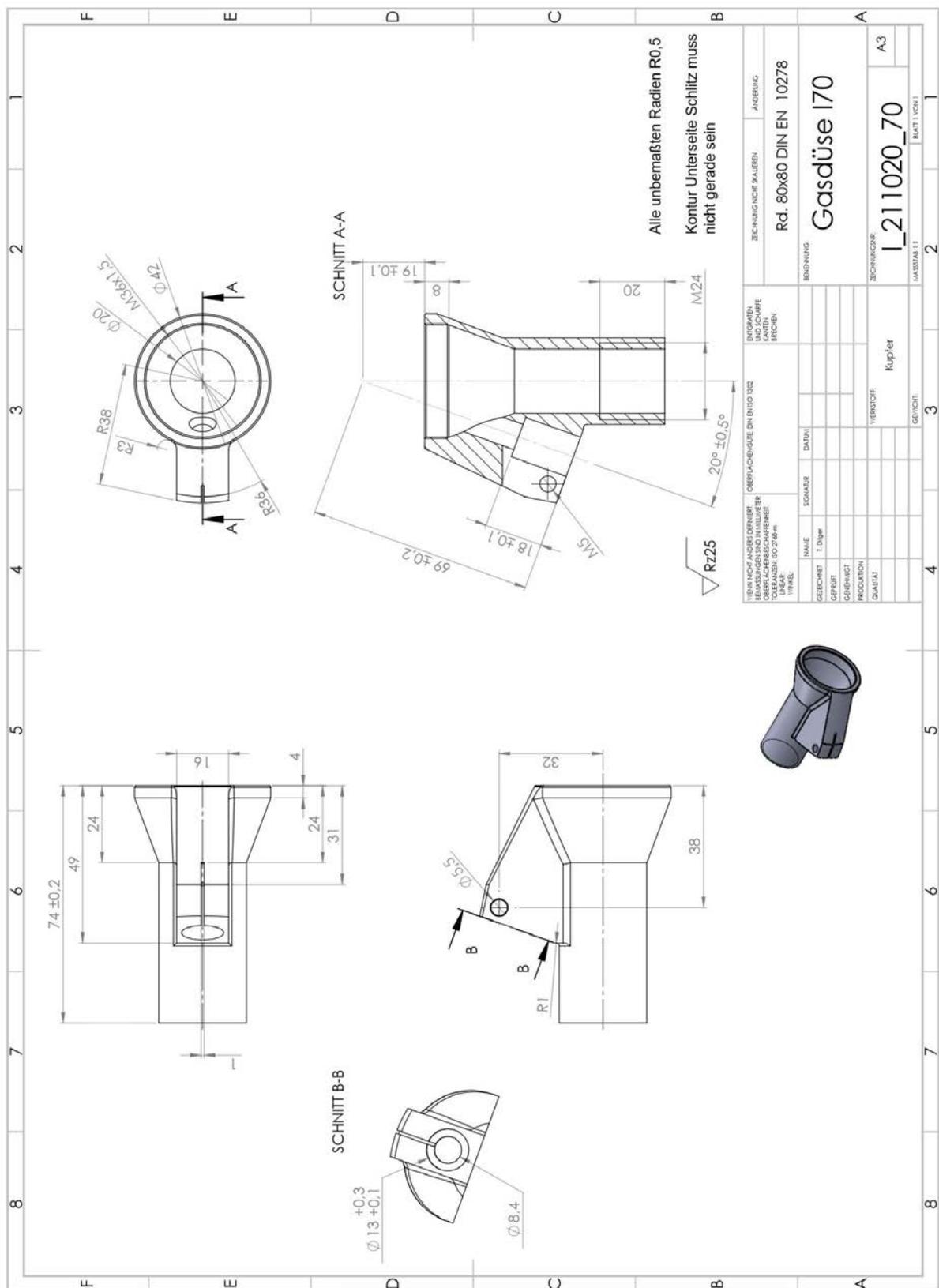
A- 5: Anforderungsliste der Gasdüsenentwicklung

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN		Fakultät Maschinenwesen Technische Universität Dresden Anforderungsliste Demonstrator MSG-Heißdraht mit vorgelagerter Drahtvorwärmung	
FF/W/MF/RF		Art der Anforderung	Wert
ID	Beschreibung/Name der Anforderung	Wert	Wert
Rahmenbedingungen			
R1	Gewinde MSG-Brenner zur Montage nutzen		
R2	Keine Änderungen am MSG-Brenner über die Gasdüse hinaus		
R3	Keine Änderung der Kühlung in Vorwärmlanze		
R4	Keine Änderung von Stromfluss und Drahtführung in Vorwärmlanze abgesehen von geringfügigen Anpassungen der unteren SKD + Aufnahme		
R5	Befestigung der Heißdrahtlanze direkt am MSG-Brenner		
R6	Nutzung einer gemeinsamen Gasdüse		
Gasdüse geometrisch			
G1	Hohe Wiederholgenauigkeit der Positionierung		Abweichung abs. <0,5 mm
G2	Geringe Wechselzeiten		< 2 min
G3	Verschiedene Anstellwinkel möglich		70°/65°/60°
G4	Schnittpunkt Elektrode und HD - Kontaktrohrabstand - Abstand Schnittpunkt zur HD - Abstand Schnittpunkt zur SKD		- 20 mm - 25 mm - ~18 mm
Gasdüse technologisch			
T1	Schutzabdeckung hochqualitativ		<50 ppm
T2	Laminarisierung in Düse ermöglichen		
T3	Keine kleinen/ungleichmäßigen Strömungsquerschnitte		
T4	Keine Toträume		
T5	Gute Zugänglichkeit		
T6	Wechsel Verschleißbereiche möglich		
T7	Kostenoptimierte Herstellung		Untere Kante Gasdüse, SKD

A.3 Aufbau mit 70° Anstellwinkel



A- 6: Aufbau des Demonstrators bei 70° Anstellwinkel



A- 9: Technische Zeichnung der verschleißgerechten Gasdüse bei 70°

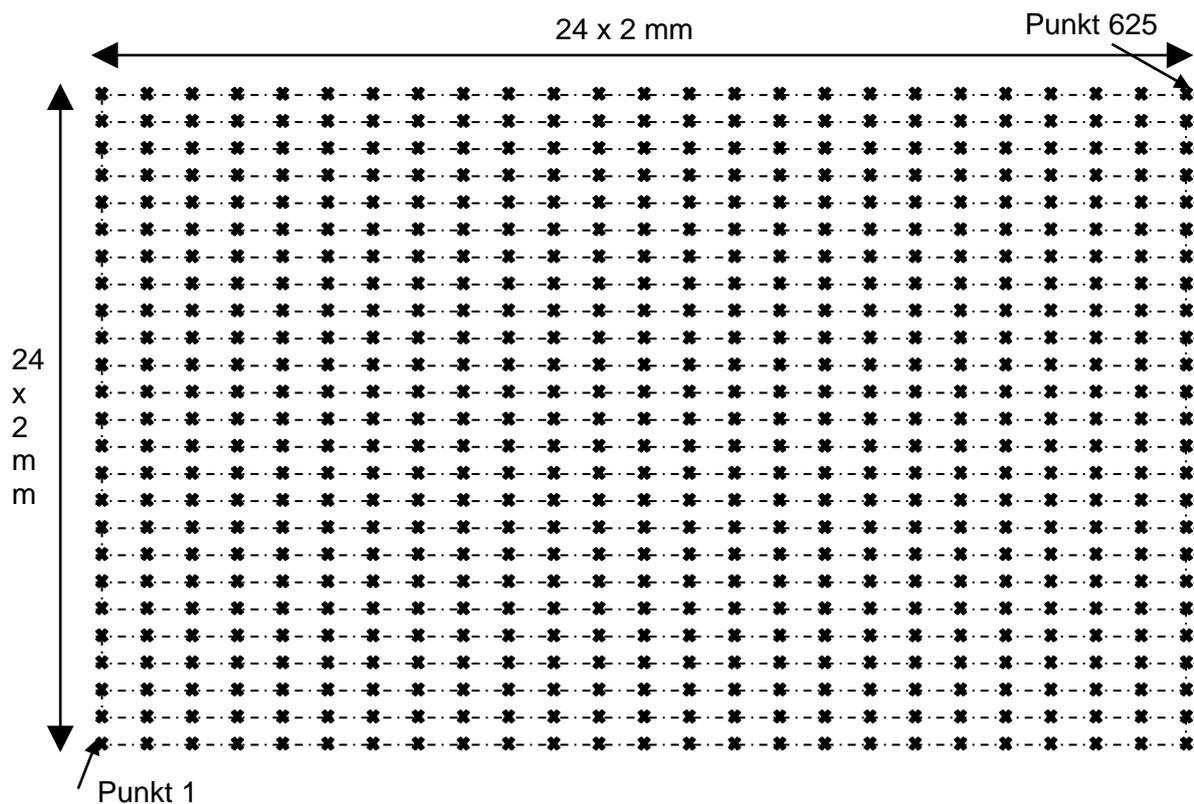
A.5 Versuchsunterlagen Sauerstoffmessungen

A- 10: Versuchsplan der Sauerstoffmessungen zur Untersuchung des Demonstrators

Punktmessungen		
Metallschaumeinsatz	Volumenströme Gasdüse [l/min]	Volumenströme Heißdraht [l/min]
		5
Schaum 1	10	6
Schaum 2	15	7
Schaum 3	20	8
		9
		10
Versuchsanzahl Punktmessungen : 54		

Linienmessungen		
Gasdüse	Volumenströme Gasdüse [l/min]	Volumenströme Heißdraht [l/min]
Referenzdüse		
bauraumoptimierte Düse	10	0
schutzgasoptimierte Düse	15	6
verschleißgerechte Düse	20	8
		10
Versuchsanzahl Linienmessungen : 13		

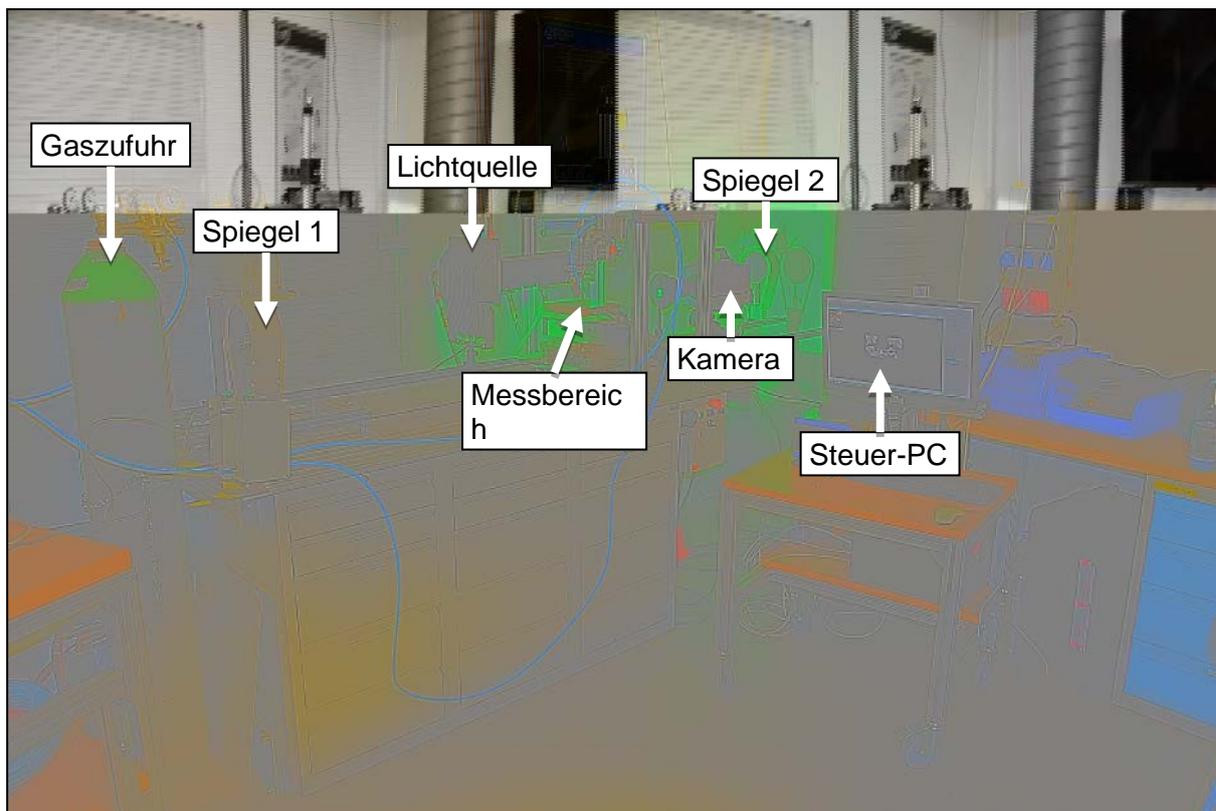
Flächenmessungen	
Gasdüse	Volumenströme Gasdüse [l/min]
Referenzdüse	
bauraumoptimierte Düse	
schutzgasoptimierte Düse	15
verschleißgerechte Düse	
Versuchsanzahl Flächenmessungen : 4	



Prozessschritt	Ablauf Punkt 1	Ablauf Punkte 2 bis 624	Ablauf Punkt 625
1	Start des Gasflusses	30 s Wartezeit	30 s Wartezeit
2	30 s Wartezeit	Messung 4 s bei 1000 Hz	Messung 4 s bei 1000 Hz
3	Messung 4 s bei 1000 Hz	Messungstopp	Messungstopp
4	Messungstopp	Verfahren mit 5 mm/s	Ende des Gasflusses
5	Verfahren mit 5 mm/s	-	-

A- 13: Versuchsaufbau und -ablauf der Sauerstoffflächenmessungen

A.6 Versuchsaufbau Schlierenmessung



A- 14: Versuchsaufbau Schlierenmessung mit markierten Komponenten

A.7 Punktmessungen der Metallschäume

A- 15: Messwerte der Punktmessungen der schutzgasoptimierten Düse bei verschiedenen Metallschäumen

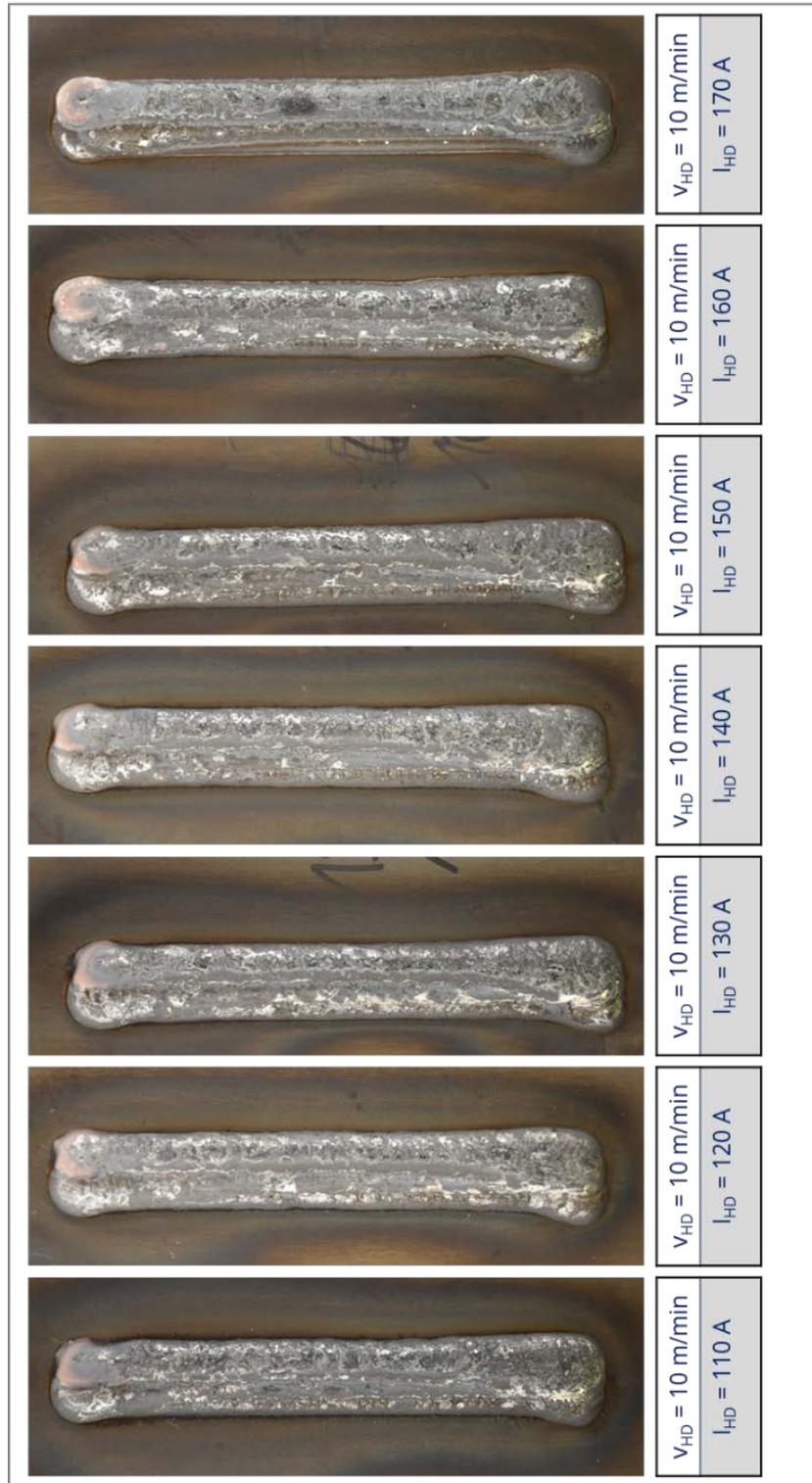
Durchfluss Vorwärm- einheit	Schaum 1			Schaum 2			Schaum 3		
	10 l/min	15 l/min	20 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min
[l/min]	10 l/min	15 l/min	20 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min
5	12124	14202	16643	15066	24548	28753	17273	18576	20457
6	13823	12082	14418	9668	15007	23836	16010	15118	18694
7	13660	11680	12431	9717	10319	14066	16626	13051	16043
8	17331	12980	10761	12714	9803	13335	20248	13369	10886
9	34255	12814	10851	16660	11484	13066	22930	15154	9697
10	40491	14052	10900	18358	12232	11439	22988	21843	10886

A.8 Ermittlung der Gewichtung der Nutzwertanalyse

A- 16: Ermittlung der Gewichtung der Nutzwertanalyse

		Vergleiche ...			
		Schutzgas- abdeckung	Fertigung	Zugänglichkeit	Verschleiß
mit...	Schutzgasabdeckung	-	0	0	0
	Fertigung	2	-	2	1
	Zugänglichkeit	2	0	-	1
	Verschleiß	2	1	1	-
	Summe	6	1	3	2
	Summe relativ	50,00 %	8,33 %	25,00 %	16,67 %
	Wertung	50	10	25	15

A.9 Auftragschweißen



A- 17: Äußeres Nahterscheinungsbild der Untersuchungen zum Auftragschweißen

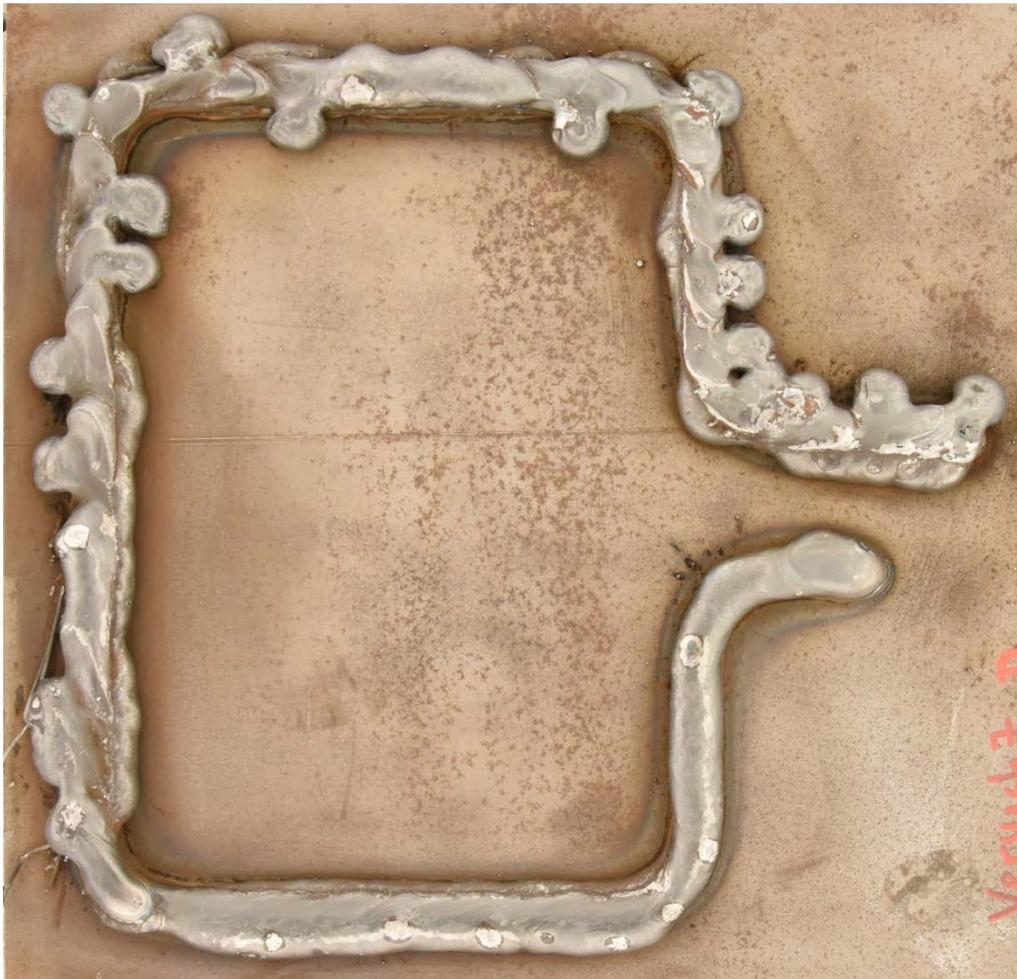
A.10 Additive Fertigung



A- 18: Draufsicht und Seitenansicht zu Versuchen zum Aufbau von Wandstrukturen mit MSG-Heißdraht



A- 19: Draufsicht und Seitenansicht zu Versuchen zum Aufbau von Wandstrukturen mit MSG-Heißdraht



A- 20: Draufsicht zu Versuchen zum Aufbau von Wandstrukturen mit MSG-Heißdraht