

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MSG-Schweißprozesse durch konsequente Nutzung
der Potentiale von Schutzgasen

der Forschungsstellen

TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Professur Fügetechnik und Montage

Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP Greifswald)

Das IGF-Vorhaben IFG 17.431 BR der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte
Verfahren e.V. des DVS wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

vom

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters der TU Dresden

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters des INP Greifswald

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
3	Stand von Technik und Forschung	5
3.1	Bekannte Einflüsse der Schutzgase auf den MSG-Prozess	5
3.2	Optische Emissionsspektroskopie an MSG-Lichtbögen	8
3.3	Numerische Simulation von MSG-Lichtbögen	9
3.4	Berechnung thermophysikalischer Eigenschaften von Plasmen	11
4	Zielstellung und Methodischer Ansatz	12
5	Experimentelle Untersuchungen zur Wirkungsweise der Gase	15
5.1	Vorgehensweise	15
5.2	Einfluss der Schutzgase auf den Werkstoffübergang	18
5.3	Bestimmung des Schutzgaseinflusses auf den MSG-Lichtbogen durch OES- Messungen	21
5.3.1	Optische Emissionsspektroskopie am Lichtbogen in Zweiergemischen	22
5.3.2	Verfahren zur Bestimmung von 2D-T-Profilen mittels HG-Aufnahmen	24
5.3.3	Auswertungen zu den 2D-Temperatur-Profilen	27
5.3.4	Stabilitätsabschätzung	29
5.3.5	Untersuchung von Schutzgasen mit bis zu vier Komponenten im Kurzlichtbogen ..	31
5.3.6	Schlussfolgerungen	33
5.3.7	Berechnete 2D-Temperaturverteilungen in MSG-Sprühlichtbögen	34
5.4	Einfluss der Schutzgase auf das Schweißergebnis	35
6	Numerische Untersuchungen zur Wirkungsweise der Gase	41
6.1	Verwendetes Modell des MSG-Lichtbogens	41
6.2	Thermophysikalische Eigenschaften der MSG-Schutzgase	42
6.3	Validierung des MSG-Lichtbogenmodells und Einfluss von CO ₂	45

6.4	Struktur des MSG-Sprühlichtbogens.....	46
6.5	Unmittelbare und mittelbare Einflüsse der Schutzgase auf die Lichtbogeneigenschaften	48
7	Zusammenfassung zur Wirkungsweise der Gase	56
8	Übertragbarkeit der Aussagen auf andere MSG-Prozesse	59
8.1	Dünoblechanwendung	59
8.2	Dickblechanwendung.....	61
9	Praxisbeispiel.....	63
9.1	Übergangslichtbogen	63
9.2	Sprühlichtbogen.....	65
9.3	Impulslichtbogen.....	67
10	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU.....	69
10.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	69
10.1	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit	70
11	Erläuterung zur Kostenaufteilung	72
11.1	Erläuterungen zu Personaleinsatz	72
11.2	Erläuterungen zu Geräteanschaffung	73
11.3	Erläuterungen zu Leistungen Dritter.....	73
12	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen.....	74
13	Projektbegleitender Ausschuss.....	77
	Quellenverzeichnis.....	78
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	85

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Benennung
<i>Lateinische Symbole</i>		
\vec{A}	V s m^{-1}	magnetisches Vektorpotential
\vec{B}	T	magnetische Flussdichte
h	J kg^{-1}	Enthalpie
I	A	Stromstärke
\vec{j}	A m^{-2}	Stromdichte
p	Pa	Druck
ε_{NEK}	$\text{W m}^{-3} \text{str}^{-1}$	Nettoemissionskoeffizient
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
\vec{u}	m s^{-1}	Geschwindigkeitsvektor
Y	kg kg^{-1}	Masseanteil
<i>Griechische Symbole</i>		
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	thermische Leitfähigkeit
μ_0	N A^{-2}	magnetische Feldkonstante
φ	V	elektrisches Potential
ρ	kg m^{-3}	Dichte
σ	$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
Indizes		
A		Komponente A
B		Komponente B
i		Variable
j		Variable

Abkürzung	Benennung
Ar	Argon
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Fe	Eisen
He	Helium
HG	Hochgeschwindigkeit
H ₂	Wasserstoff
ICCD	Intensivierte CCD (Charge-Coupled Device)
MHD	Magnetohydrodynamik
MIF	Metallinterferenzfilter
MSG	Metallschutzgasschweißen
NEK	Nettoemissionskoeffizient
OES	Optische Emissionsspektroskopie
N ₂	Stickstoff
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
WIG	Wolframinertgasschweißen

1 Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens war die Erweiterung des Prozessverständnisses zum Wirken von Schutzgasen in MSG-Prozessen und die Erarbeitung einer validen Entscheidungsbasis bei der Schutzgasauswahl. Im Rahmen der Untersuchungen wurden experimentelle, diagnostische und numerische Methoden miteinander kombiniert, um die Einflüsse der Gase auf die Lichtbogeneigenschaften, den Werkstoffübergang und das Schweißergebnis zu trennen und separat zu quantifizieren. An der TU Dresden wurden die experimentellen und numerischen Untersuchungen sowie und die Praxisversuche durchgeführt. Am INP Greifswald erfolgte die Berechnung der thermophysikalischen Schutzgaseigenschaften sowie die OES-Messungen.

Untersucht wurden ein- bis vierkomponentige Schutzgase aus Argon mit Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff. Bei 350 A und 13 m/min konnten Referenzparameter gefunden werden, die es erlauben, bei allen Schutzgasen mit einem konstanten Stickout zu schweißen – nur dieses Vorgehen erlaubt vergleichbare Ergebnisse.

Durch Sensitivanalysen mit dem entwickelten numerischen Modell wurde festgestellt, dass der unmittelbare Einfluss der Schutzgase auf das MSG-Verfahren im Vergleich zum WIG-Verfahren deutlich geringer ausfällt. Stattdessen dominieren starke Wechselwirkungen zwischen dem Schutzgas, dem Werkstofftransfer und vor allem der Metallverdampfung die Lichtbogeneigenschaften. Bereits geringe Änderungen der Metallverdampfung können den MSG-Lichtbogen prozessbestimmend beeinflussen, da die Eisenanteile im Lichtbogen deutlich sensitiver sind als die Änderungen der Schutzgaszusammensetzungen. Die Veränderung der Verdampfung und die daraus resultierende Änderung des Metaldampfanteils im Lichtbogen wird als mittelbare Beeinflussung des Prozesses bezeichnet und überwiegt die unmittelbare Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften durch die Gaszumischungen deutlich.

Zumischungen von Sauerstoff (ab 1,5 %) und Kohlenstoffdioxid (ab 2,5 %) führen zu einer kontinuierlichen Verkürzung des Unduloiden und damit zu einer Reduzierung der Kurzschlussneigung. Kohlenstoffdioxidzumischungen (ab ca. 10 %) führen aufgrund der hohen volumetrischen Enthalpie des Kohlenstoffdioxids zu einer zunehmenden Einschnürung des MSG-Lichtbogens und bedingen durch die Zunahme der elektromagnetischen Kräfte unsymmetrische Tropfenablösungen. Die so abgelösten Tropfen verursachen ein breiteres Schmelzbad und ermöglichen dadurch eine hohe Spaltüberbrückbarkeit, bedingen jedoch auch stärkere Verdampfungen und eine erhöhte Spritzerbildung.

Auswertungen von Einschweißprofilen zeigen außerdem, dass mit einem unsymmetrischen und breiten Werkstoffübergang der Schmelzwirkungsgrad (aufgeschmolzener Grundwerkstoff pro Leistung) um mehr als 50 % ansteigt. Das häufig eingesetzte M21-ArC-18 mit 18 % CO₂ zeigte den höchsten Schmelzwirkungsgrad aller untersuchten Schutzgase.

Bei der Auswahl von Schutzgasen bzw. der Konzipierung neuer Schutzgasmischungen sind aufgrund der vergleichsweise geringen Beeinflussung der Wärmeeinbringung am Werkstück folglich weniger die unmittelbare Beeinflussung durch die thermophysikalischen Eigenschaften als vielmehr die mittelbaren Beeinflussungen des Werkstoffübergangs und der Metallverdampfung von Bedeutung. Die Untersuchungsergebnisse legen beispielsweise nahe, dass der bekannte fingerförmige Einbrand unter argonreichem Schutzgas vor allem durch das konzentrierte mittige Auftreffen der heißen Zusatzwerkstoffe ohne zeitlich veränderliche seitliche Auslenkung verursacht wird.

Diese Erkenntnisse können zukünftig eingesetzt werden, um experimentelle und numerische Untersuchungen gezielt auf diese Zielgrößen abzustimmen und mögliche Schutzgaszusammensetzungen abzuleiten. Beispielhaft ist dies anhand typischer Anforderungen an Schweißprozesse im Bericht dargestellt. Abschließend wurden die Übertragbarkeit der Aussagen auf andere MSG-Prozesse überprüft und die Anwendbarkeit unterschiedlicher Gaszusammensetzungen an einem Praxisbeispiel getestet.

Durch die Ergebnisse werden die Anwender von MSG-Lichtbogenverfahren in die Lage versetzt, die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile von Schutzgasen zu erkennen und gezielt zur Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit auszunutzen. Gleichzeitig wurde das Verständnis zum Wirken und zur Kombinierbarkeit von Gaszusammischungen vertieft, um Voraussetzungen für eine verbesserte und zielgerichtete Entwicklung neuer mehrkomponentiger Schutzgase zu schaffen. Auch wenn die Untersuchungen vorwiegend an Stahlwerkstoffen mit Sprühlichtbögen durchgeführt wurden, ermöglichen die Ergebnisse die Entwicklung und Auswahl von komplexen Schutzgasen für den breiten Anwenderkreis der MSG-Verfahren.

Das Vorhaben liefert die experimentellen und numerischen Ansätze, um zukünftig Schutzgase noch stärker unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Zusatzwerkstoff hinsichtlich der Verdampfung und des Werkstofftransfers zu optimieren.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die hohe Produktivität, die einfache Handhabung, die hohe Verfügbarkeit und die moderaten Investitionskosten sind Gründe für die sehr hohe Verbreitung von Metall-Schutzgas-Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen metallischer Werkstoffe bei KMU. Die permanente Erhöhung der Anforderungen an die Werkstoffe und die Technologien zwingen zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Fügeverfahren sowie der Anlagentechnik. Bisher werden diese Weiterentwicklungen vorwiegend durch Verbesserungen der Prozessführung und -regelung erreicht, welche vor allem durch die komplexe Steuer- und Regelungstechnik digital gesteuerter Inverterstromquellen ermöglicht werden. Die dadurch neu entwickelten speziellen Schweißprozesse, wie z.B. CMT, ColdArc, cold weld, STT oder ForceArc und Speed Pulse haben sich trotz höherer Anlagenkosten in vielen Schweißfertigungen etabliert.

Im Gegensatz dazu ist das Potential spezieller Schutzgase für MSG-Verfahren bisher kaum erschlossen. Zwar ist bekannt, dass beim Schutzgasschweißen der Energie- und Ladungsträgertransfer im teilweise ionisierten Schutzgas stattfindet und somit die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Schutzgases den Energieeintrag in Grund- und Zusatzwerkstoff sowie den Werkstoffübergang signifikant beeinflussen, jedoch werden in der Fertigung vorwiegend Standardgase verwendet, wie z. B.:

- ISO 14175 - I1 (100 % Ar) für Nichteisenmetalle,
- ISO 14175 - M12 (argonreiche Mischgase mit 2,5 % CO₂) für hochlegierte Stähle,
- ISO 14175 - M21 (argonreiche Mischgase mit 18 % CO₂) für un- und niedriglegierte Stähle.

Müssen besondere Anforderungen erfüllt werden (flache Nahtübergänge, hohe Schweißgeschwindigkeit oder große Einschweißtiefe), wird auf Sondergase zurückgegriffen. Alle Gashersteller bieten weitere Gasgemische an, jedoch sind für deren Auswahl und Einsatz ein hoher experimenteller Aufwand und die Anpassung von Schweißparametern und Kennlinien notwendig.

Das Hauptdefizit ist, dass durch das bisher übliche empirische Vorgehen zwar der Einfluss des Schutzgases auf den Werkstoffübergang (Tropfengeometrie und Spritzer) sowie das resultierende Schweißergebnis (Nahtaussehen, Legierungszusammensetzung, Poren und Einbrand) untersucht und dokumentiert werden, das eigentliche Werkzeug, der Lichtbogen, jedoch als nicht zugängliche „Black Box“ betrachtet wird.

Im Rahmen des DFG / AiF Forschungsclusters Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug wurden 2008 bis 2011 neue numerische und experimentelle Analysewerkzeuge entwickelt, u. a. [Her2012]. Diese ermöglichen die hohe orts- und zeitaufgelöste Beschreibung der physikalischen Vorgänge im MSG-Lichtbogen. Durch den Einsatz dieser neuen Werkzeuge ist es möglich, die Wirkungsweise von Gasen nachvollziehen zu können und daraus Rückschlüsse auf Einsatz verfügbarer sowie auf die Entwicklung neuer Schutzgasmischungen ziehen zu können.

Das Potential von numerischen und experimentellen Analysewerkzeuge wurde im AiF-Forschungsvorhaben „Einfluss der Schutzgase beim Wolframinertgasschweißen (WIG) mit nichtabschmelzender Elektrode“ (IGF 15.774, Laufzeit: 2008-2010) bereits erfolgreich aufgezeigt. Durch Anwendung der numerischen Simulation mit physikalischen Modellen, der experimentellen Lichtbogenanalyse und durch Schweißversuche wurden die Wirkung der Prozessgase beim WIG-Schweißen wissenschaftlich erklärt und Schlussfolgerungen für Anwendungen spezieller Prozessgase abgeleitet. Die theoretischen Erkenntnisse werden neben den Erfahrungswerten der Anwender und Gashersteller angewandt, um den experimentellen Aufwand bei der Gaserprobung zu reduzieren und um Verfahrensrandbedingungen abzuleiten, mit denen die angestrebten technologischen und wirtschaftlichen Effekte erreicht werden. Es wurde auch gezeigt, dass geeignete Gaszusammensetzungen theoretisch hergeleitet werden können („Gase-Design“).

Während der Bearbeitung des oben genannten Forschungsvorhabens wurde von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses der Wunsch geäußert, äquivalente Erkenntnisse auch für die wirtschaftlich wesentlich bedeutsameren MSG-Verfahren zu erarbeiten. Ansatz war, dass komplexe Schutzgasgemische mit drei oder mehr Komponenten eingesetzt werden können, um den MSG-Prozess an die werkstofftechnischen, konstruktiven und technologischen Anforderungen anzupassen. Die dadurch realisierbaren Schweißaufgaben sind anspruchsvoll, ermöglichen hohe Margen und haben deshalb für KMU eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Dem Einsatz dieser Schutzgase stehen jedoch neben den höheren Kosten vor allem die notwendigen umfangreiche Schweißversuche für die experimentelle Erprobung dieser Gase durch den Anwender entgegen. Dieser Aufwand für die Schweißversuche ist bei Gasen mit zwei Komponenten noch vertretbar, jede weitere Komponente erfordert jedoch eine weitere Dimension der Versuchsmatrix und bewirkt eine Vervielfachung des Versuchsumfangs. Die Anwender müssen daher in die Lage versetzt werden, die Vorteile von speziellen Gasen theoretisch herzuleiten und vorab quantitativ zu bewerten.

3 Stand von Technik und Forschung

3.1 Bekannte Einflüsse der Schutzgase auf den MSG-Prozess

Das Schutzgas determiniert beim MSG-Schweißen maßgeblich den Lichtbogen und den Tropfenübergang. Zu Beginn der Anwendung des MSG-Schweißens in den 1950er Jahren wurden für das Schweißen von unlegiertem Stahl zunächst Argonmischgase mit 1-5 % CO₂ empfohlen, während für das Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen das inerte Gas Argon verwendet werden sollte [Tru1999]. Aufgrund der hohen Kosten bei der Gewinnung von Argon setzte sich jedoch CO₂ als kostengünstiges Schutzgas für das Schweißen von Baustählen durch. Der Abbrand von Legierungselementen wird durch überlegierte Drahtelektroden und die Porenneigung mit desoxidierenden Elementen kompensiert [Tru1999]. Der Nachteil, dass unter CO₂ nicht mit hohen Stromstärken gearbeitet werden kann, weil sich kein Sprühlichtbogen, sondern ein Langlichtbogen ausbildet, kann nur durch den Einsatz argonreicher Schutzgase beseitigt werden. Das ist die Ursache dafür, dass in Deutschland und Europa fast ausschließlich mit Ar-CO₂ Mischgasen gearbeitet wird. Nach DIN EN ISO 14175 werden Schutzgase für Lichtbogenschweißverfahren in folgende Hauptgruppen eingeteilt:

- inerte Gase und inerte Mischgase (I)
- oxidierende Mischgase mit Sauerstoff und / oder Kohlenstoffdioxid (M)
- stark oxidierende Mischgase mit Sauerstoff und / oder Kohlenstoffdioxid (C)
- reduzierende Mischgase (R)
- reaktionsträge Gase oder reaktionsträge Mischgase mit Stickstoff
- Sauerstoff (O) und weitere Mischgase (Z).

Die bisherigen Erkenntnisse zum Wirken der Gase resultieren im Wesentlichen aus experimentellen Untersuchungen, vor allem aus Schweißversuchen, sowie anschließender Beurteilung von Einbrand, von Nahtaussehen und Nahtimperfectionen, von Spritzern und der Metallurgie des Schweißgutes. Der Stand des Wissens ist unter anderem in [Tru1999] [Tru2001] [Ste1993] [Dil1994] [Mat2008] [Böh1990] beschrieben und wird im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

Argon (Ar) ist ein leicht ionisierbares Inertgas, das einen gleichmäßigen und stabilen Lichtbogen ergibt. Beim MSG-Schweißen wird es sowohl in reiner Form oder als „Trägergas“ für inerte und aktive Mischgase verwendet. Aus einem hohen Argonanteil im Schutzgas resul-

tiert ein feintropfiger Werkstoffübergang mit vergleichsweise wenigen Spritzern und ein tiefer schmaler Wurzeleinbrand (Argonfinger). In Europa wird Argon in Mischgasen als inertes Trägergas verwendet, dem folgende Komponenten zugemischt werden können.

Helium (He) ist ebenfalls ein Inertgas, jedoch schlechter ionisierbar als Argon. Es verursacht vor allem einen breiteren Einbrand ohne Einbrandfinger. Nach [Böh1990] ergibt sich ein heißeres Schmelzbad, wodurch das Entgasen der Schmelze verbessert wird und eine deutlich geringere Porenzahl resultiert.

Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird als Aktivgas-Komponente in Mischgasen verwendet. Aufgrund des unregelmäßigen Nahtaussehens und der hohen Spritzeranzahl beim CO₂-Schweißen werden in Deutschland vorwiegend argonreiche Mischgase mit CO₂-Anteil verwendet, z. B. M21-ArC-18 mit 18% CO₂. Jedoch ergeben sich Spritzer sowie Oxidbeläge, die nach dem Schweißen aufwändig zu entfernen sind.

Bei hochlegierten Werkstoffen lässt sich durch geringe aktive Gasanteile die Nahtform und das Nahtaussehen verbessern. Ein zu hoher CO₂-Anteil verursacht Anlauffarben, den Abbrand von Legierungselementen und die Gefahr unerwünschter Chromkarbidbildung.

Sauerstoff (O₂) wird beim MAG-Schweißen als Aktivgaskomponente in Mischgasen verwendet. Hierbei wird eine Beeinflussung des Tropfenübergangs und das Erhöhen des Einbrands sowie eine verbesserte Nahtform und Nahtaussehen (analog CO₂) angestrebt. Da ein hoher O₂-Anteil zu einem Abbrand von Legierungselementen und Kohlenstoff sowie zu Poren führt, werden meist geringe Konzentrationen verwendet.

Wasserstoff (H₂) wird fast ausschließlich beim Schweißen von austenitischen Stählen angewendet. Bei unlegierten Stählen und Nichteisenmetallen besteht die Gefahr der Porenbildung und/oder der Wasserstoffversprödung. Durch Wasserstoff kann (analog zum Helium) eine Erhöhung des Einbrands und vor allem eine Verbreiterung des Nahtquerschnitts erreicht werden. Sicherheitsanforderungen begrenzen den H₂-Anteil im Schutzgas auf Anteile auf maximal 15 %, in der Regel werden zwischen 5 und 10 % zugemischt.

Stickstoff N₂ wird vor allem als Austenitbildner beim Schweißen von Duplexstählen eingesetzt. In [Böh1990] wird auf Probleme durch Porenbildung hingewiesen. Geringe Zumischungen von ca. 300 ppm NO führen zu einer Verringerung der Ozonbildung [AGA1995].

Dieser Wissensstand ist nicht ausreichend, um den stetig steigenden wirtschaftlichen, werkstofftechnischen und konstruktiven Anforderungen an schweißtechnische Anwendungen gerecht zu werden. So gelten die bisherigen Erkenntnisse für zweikomponentige Gase und sind nach Aussage der Gashersteller nur sehr begrenzt auf Schutzgase mit drei oder vier Kom-

ponenten zu übertragen. Außerdem sind vorwiegend qualitative Hinweise dokumentiert. Quantitative Beschreibungen der erreichbaren Effekte sind von größerem Nutzen für die Anwender, weil nur so die Schutzgase hinsichtlich ihrer Wirkung direkt mit den technologischen Zielstellungen zu vergleichen sind, vgl. Abbildung 3.1: Beispiele für die quantitative Beschreibung von Schutzgaseigenschaften [Böh1990]. In der Literatur sind die Effekte in ihrer Quantität jedoch nur selten dokumentiert [Böh1990] [Tru2001]. Außerdem werden nur einige ausgewählte und zumeist positive Eigenschaften beschrieben, während die gleichzeitig auftretenden nachteiligen Wirkungen kaum quantifiziert werden.

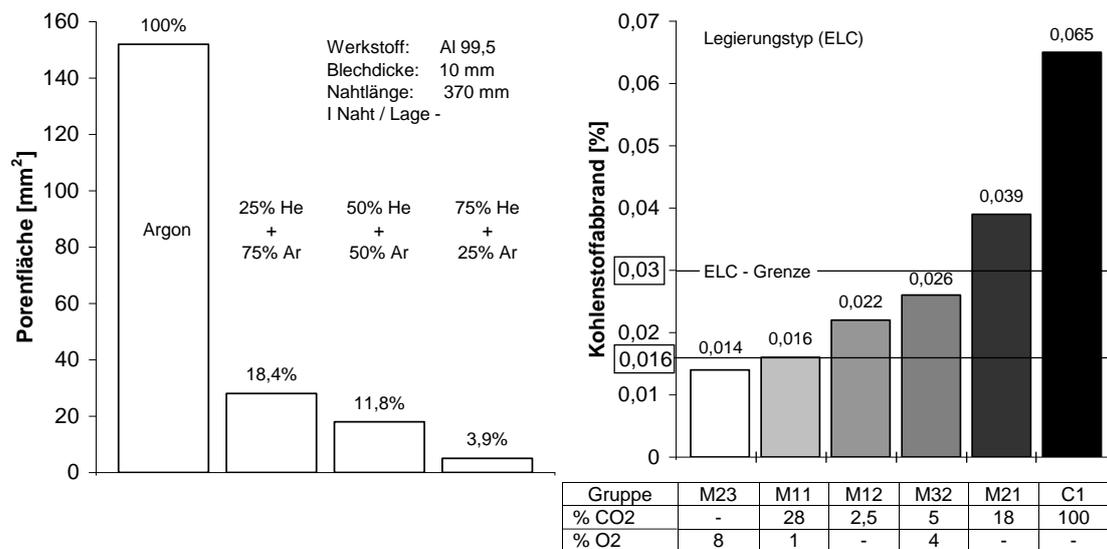


Abbildung 3.1: Beispiele für die quantitative Beschreibung von Schutzgaseigenschaften [Böh1990]

Zu erwähnen ist, dass seit einigen Jahren verstärkt Schutzgase mit drei oder vier Komponenten angeboten und eingesetzt werden. Die Idee, durch mehrere Zumischungen die Eigenschaften des Schutzgases gezielt einzustellen, ist nicht neu. Bereits 1958 wurde das erste Patent für ein 3-komponentiges Gas zum MAG-Schweißen angemeldet [Pat1958]. Das bekannteste Vierkomponentengas wurde für den sog. T.I.M.E.-Prozess entwickelt und besteht aus 65 % Ar, 26,5 % He, 8 % CO₂ und 0,5 % O₂. Der T.I.M.E.-Prozess ist ein Hochleistungs-MSG-Schweißverfahren, bei dem oberhalb des Leistungsbereichs des Sprühlichtbogens der rotierende Lichtbogen genutzt wird. Dadurch können eine deutlich höhere Schweißstromstärke und Abschmelzleistung realisiert werden. Die Untersuchungen der **T.I.M.E.-Gase** von [Sub2001] [Tru1999] [Lah1991] verdeutlichen, dass durch das Schutzgas der Werkstoffübergang, der Einbrand, die Spritzer und Prozessstabilität besonders im Bereich des rotierenden Hochleistungs-Sprühlichtbogens signifikant positiv zu beeinflussen sind, während im konventionellen Sprühlichtbogenbereich der Einfluss der Gase auf die Ab-

schmelzleistung vergleichsweise gering ist. Die Untersuchungen verdeutlichen das prozesstechnische Potential von Mischgasen mit drei oder vier Komponenten, auch wenn der rotierende Hochleistungs-MSG-Lichtbogen in der Industrie relativ selten eingesetzt wird.

Etabliert sind Gase mit 3-4 Komponenten vor allem bei werkstofftechnisch anspruchsvollen Schweißanwendungen. So werden korrosionsbeständige Nickelbasiswerkstoffe mit Gemischen aus Argon, Helium, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff geschweißt. Auch bei hoch- und höchstfesten Stählen kann den Anforderungen an den Wärmeeintrag, die Wärmeeinflusszone und die Nahteigenschaften häufig nicht nur durch die Schweißparameter allein entsprochen werden. Mehrkomponentige Schutzgase ermöglichen das gezielte Anpassen der Wärmeleitung beim Schweißen, z. B. das Beeinflussen des Einbrands, der Schweißnahtgeometrie und der Wärmeeinflusszone. Im Bereich konventioneller Werkstoffe werden Mischgase mit drei Komponenten zunehmend zum Schweißen von Dünoblechen im Überlappstoß, Wurzellagen oder Stumpfstoß verwendet. Besonders in Ländern, in denen Mischgase mit hohem CO₂-Anteil den Standard darstellen (z. B. England, Frankreich, Russland), werden bei Dünoblechanwendungen verstärkt Mischgase mit weniger als 10 % CO₂ und zusätzlichem Sauerstoff empfohlen (z. B. 7 % CO₂, 2,5 % O₂ und Rest Argon). Das Gas verhindert das Durchbrennen des Bleches, und außerdem werden die Spritzerbildung, Metallverdampfung und Emissionen beim Aufreißen der Kurzschlussbrücke vermindert [Air2011]. In Deutschland werden solche Gase bisher selten genutzt, auch weil deren Potential gegenüber einem konventionellen M21-ArC-18 wissenschaftlich nicht dokumentiert ist.

3.2 Optische Emissionsspektroskopie an MSG-Lichtbögen

Dieses Diagnostikverfahren ist ein weit verbreitetes nicht-invasives Verfahren, um Lichtbögen zu analysieren. Die Temperatur- und Teilchendichtemessungen mit Hilfe von OES zu bestimmen geht auf eine lange Geschichte zurück [Bar1950, Ols1963, Wie1991]. Einige der dort beschriebenen Verfahren sind auch auf Lichtbogenplasmen, wie die in einem Schweißlichtbogen anwendbar. Sie basieren auf der Annahme eines LTE im Plasma und erlauben damit die Berechnung der Temperaturabhängigkeit von Teilchendichten der beteiligten Elemente und damit der Plasmastrahlung.

In bestimmten Fällen, wo der Emissionskoeffizient über das Normmaximum hinausgeht, kann die Methode nach Fowler und Milne [Fow1923, Fow1924] angewendet werden. Diese wurde auf Sternatmosphären angewandt und später auf elektrische Lichtbögen erweitert [Lar1951]. Der Vorteil dieser sogenannten Fowler-Milne Methode ist, dass eine Absolutkalib-

rierung nicht notwendig ist, weshalb sie in der Diagnostik mit OES weit verbreitet ist. Sie wurde auf stationäre und gepulste WIG-Lichtbögen angewendet [Tan2009, Ma2008]. Allerdings sind einige der Annahmen, die zur Herleitung der Methode verwendet wurden nicht vollständig auf den WIG-Lichtbogen anzuwenden, wie in [Far1988] gezeigt wird. Dort wurden Abweichungen vom LTE im Randbereich nachgewiesen. Außerdem muss das Normmaximum für die Anwendung dieser Methode überschritten werden und es darf sich nur um ein einkomponentiges Plasma handeln, weshalb z. B. keine Metaldampfumischungen vorhanden sein dürfen.

Eine andere Methode ist der Vergleich zwischen der absolut Intensität der Plasmastrahlung mit berechneten Intensitäten, um eine Temperatur herzuleiten. Das ist die klassische OES Methode mit dem Namen „Absolut-“ oder „Ein-Linien-Methode“. Normalerweise ist dafür ein spektroskopisches System notwendig mit höherer Auflösung, um Linien zu separieren und eine geeichte Kalabrierlichtquelle für die Bestimmung der Absolutintensitäten. Dadurch lassen sich im allgemeinen Linien- und Kontinuumsstrahlung gut trennen und bietet genaue Ergebnisse.

Der Nachteil besteht darin, dass mit einer Aufnahme immer nur 1D-Profile erstellt werden können. Für 2D-Profile sind mehrere Messungen in verschiedenen Höhen im Lichtbogen notwendig. Dies schränkt die Möglichkeiten der HG-Diagnostik für klassische Spektrometer auf eine Dimension ein.

3.3 Numerische Simulation von MSG-Lichtbögen

Lichtbogenschweißprozesse sind durch eine Vielzahl an simultan ablaufenden physikalischen Vorgängen geprägt, in denen die eingesetzten Stoffe in allen Aggregatzuständen vorkommen (fest, flüssig, gasförmig, plasmatisch). Seit den 1980er Jahren werden vermehrt Methoden der numerischen Simulation verwendet, um die komplexen physikalischen Zusammenhänge in Lichtbögen zu untersuchen. Die überwiegende Anzahl an Veröffentlichungen über entwickelte Modelle existieren für Lichtbogenschweißverfahren mit nichtabschmelzender Elektrode wie dem WIG- und Plasmaschweißverfahren. Zusammenfassungen sind u. A. bei Murphy [Mur2001], Tanaka und Lowke [Tan2007] und Schnick [Sch2011] zu finden. In den Modellen wird meist von einem Schutzgas aus Argon oder Helium ausgegangen. Eine Erweiterung der Modellvorstellungen auf praxisrelevante Schutzgasgemische wie z.B. Ar-He-, Ar-N₂- oder Ar-H₂-Mischungen wurde im IGF-Vorhaben 15.774 [Füs2010] am Beispiel eines WIG-Schweißprozesses vorgenommen.

Im Rahmen des DFG / AiF Forschungsclusters Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug (Laufzeit: 2008 - 2011) wurden die bestehenden Modellvorstellungen erweitert, um die dominanten physikalischen Vorgänge in MSG-Lichtbogenschweißprozessen abzubilden. Im Rahmen des Forschungsclusters wurde festgestellt, dass die an den schmelzflüssigen Elektroden entstehenden Metaldämpfe einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens besitzen. Ursächlich ist vor allem die hohe Strahlungsemission der Metalle im Lichtbogen, welche um mehrere Größenordnungen höher sein können als die der eingesetzten Schutzgase [Sch2009]. Erst durch die Implementierung der Metallverdampfung in die numerischen MSG-Lichtbogenmodelle ist es möglich, die von [Zie2007] [Bri2008] [Rou2010] gemessenen Temperaturfelder im Argon-Lichtbogen und speziell das radiale Temperaturminimum in der Bogenachse mittels Simulation nachzuvollziehen.

Für die numerische Simulation des MSG-Lichtbogens wird demnach ein magnetohydrodynamisches Gleichungssystem gelöst, welches die Gleichungen der Strömungsmechanik mit den Gleichungen der Elektromagnetik verknüpft. Neben der allgemeinen Masseerhaltungsgleichung (3.1.1) wird eine zusätzliche Gleichung für den Masseanteil der Metaldampfkomponente (3.1.2) eingeführt.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1.1)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_B)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_B + \vec{j}_B) = 0 \quad (3.1.2)$$

In der Impulserhaltungsgleichung (3.1.3) wird der Einfluss der Lorentzkraft berücksichtigt, die durch das Kreuzprodukt der elektrischen Stromdichte und der magnetischen Induktion berechnet wird.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.1.3)$$

In der Energieerhaltungsgleichung wird die Widerstandserwärmung und die Strahlungsemission durch das Nettoemissionkoeffizientenmodell von Lowke [Low1974] berücksichtigt.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{j^2}{\sigma} - 4\pi \epsilon_{NEK} \quad (3.1.4)$$

Durch die Ladungsträgererhaltungsgleichung (3.1.5) wird die Verteilung des elektrischen Potentials und die elektrische Stromdichte berechnet.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (3.1.5)$$

Die magnetische Induktion wird auf Grundlage des magnetischen Vektorpotentials berechnet.

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \quad (3.1.6)$$

Eine detaillierte Beschreibung des MSG-Lichtbogenmodells inklusive der verwendeten Randbedingungen und Stoffdaten kann in [Her2012] gefunden werden.

In den in [Her2012] verwendeten Modellen wurde von einer zweikomponentigen Prozessgasmischung aus Argon und Eisen ausgegangen. Die Erweiterung der Modelle auf praxisrelevante Schutzgasmischungen, vor allem der häufig eingesetzten Ar-CO₂- und Ar-O₂-Mischungen, wurde bisher noch nicht vorgenommen und war ein wichtiger Bestandteil in diesem Vorhabens.

3.4 Berechnung thermophysikalischer Eigenschaften von Plasmen

Zur Lichtbogensimulation ist es notwendig, die thermophysikalischen Eigenschaften der Plasmen als Stoffrandbedingungen des Modells zu berücksichtigen. Diese umfassen die Dichte und die spezifische Wärmekapazität, die elektrische und thermische Leitfähigkeit und die Viskosität sowie die Strahlungsemission. Zur Berücksichtigung der Transportphänomene einzelner Gasmischkomponenten im betrachteten Prozessvolumen (Lichtbogenplasma und Gas-Ummantelung) sind weiterhin die Daten zu den Diffusionskoeffizienten erforderlich. Diese Eigenschaften haben eine ausgeprägte nichtlineare Abhängigkeit von der Temperatur, dem Druck, der chemischen Zusammensetzung des Schutzgases sowie vom Metaldampfgehalt. Stand der Technik ist es, diese Eigenschaften aus teilchenphysikalischen Modellen theoretisch herzuleiten. Hierbei wird durch das Lösen der Saha-Eggert-Gleichung auf die Dichte und spezifische Wärme geschlossen. Durch die Chapman-Enskog-Methode werden die thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die Viskosität bestimmt. Für die Abschätzung des Strahlungstransportes werden die Strahlungsemission und –absorption berechnet.

In der Literatur können die Eigenschaften bisher nur für Schutzgase aus Argon und mit maximal einer zusätzlichen Komponente (CO₂, O₂, H₂ und Helium) recherchiert werden. Um mit Hilfe der numerischen Lichtbogensimulation die Wirkung der Prozessgase zu modellieren, sind jedoch zusätzlich die Eigenschaften von weiteren zwei- und mehrkomponentigen Schutzgasen mit zusätzlichen Anteilen von Eisendampf notwendig. Entsprechende Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt.

4 Zielstellung und Methodischer Ansatz

Das Ziel des Vorhabens ist die Erweiterung der Entscheidungsbasis bei der Entwicklung und Auswahl von komplexen Schutzgasen, besonders von Mischgasen mit drei oder vier Komponenten. Durch das Vorhaben sollen die Anwender von MSG-Lichtbogenverfahren in die Lage versetzt werden, die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile dieser Schutzgase zu erkennen und gezielt zur Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit auszunutzen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden hierzu drei wesentliche Ziele verfolgt:

- I. **Theoretische Voraussetzungen:** Mit den neuartigen Methoden der Lichtbogen-simulation und der Lichtbogendiagnostik durch Spektroskopie wird der Einfluss der Prozessgase auf den Lichtbogen, den Werkstoffübergang und den Energieeintrag in das Werkstück beim MSG-Schweißen analysiert und visualisiert. Die Untersuchungen erweitern das Verständnis zur Wirkungsweise von Gaskomponenten und sind Grundlage für die Entwicklung und Auswahl spezieller mehrkomponentiger Mischgase.
- II. **Technologische Kennzahlen:** Für die Auswahl spezieller Mischgase durch KMU werden Kennzahlen für Werkstoffgruppen ermittelt, mit denen die erreichbare Schweißgeschwindigkeit, die Häufigkeit von Nahtimperfectionen und Spritzern als Ursache von Nacharbeit sowie den Einbrand und die WEZ in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung bewertet werden können. Diese Untersuchungen ermöglichen Anwendern eine umfassende quantitative Abschätzung wirtschaftlicher und technologischer Vorteile.
- III. **Nachweis:** Speziell für MSG- Sprüh- und Impulsprozesse werden, basierend auf den oben genannten angestrebten Ergebnissen, Schutzgase mit drei und mehr Komponenten erprobt und bewertet. Dadurch wird gleichzeitig der Nachweis der Praxisrelevanz der beabsichtigten Projektziele erbracht.

Auch wenn die Untersuchungen an Stahlwerkstoffen mit Sprüh- bzw. Langlichtbogen exemplarisch durchgeführt werden, zielen die Ergebnisse nicht auf einen besonderen Werkstoff oder eine einzelne Prozessvariante, sondern auf die Entwicklung und Auswahl von komplexeren Schutzgasen für den breiten Anwenderkreis des MSG-Schweißens.

Das primäre wissenschaftliche Ziel des Vorhabens ist ein verbessertes Verständnis der Beeinflussung des MSG-Prozesses durch die Schutzgase. Die Ergebnisse umfassen:

- I. **abgesicherte experimentelle Erkenntnisse** zur Temperatur- und Elementverteilung im MSG-Lichtbogen, zur Lichtbogengestalt und dem Lichtbogenansatz am Draht sowie zur Tropfengeometrie für die Schutzgase Argon, praxisrelevante Mischgase aus Argon und CO₂, O₂, He und H₂ sowie ausgewählte Gase mit drei und vier Komponenten (durch optische Emissionsspektroskopie),
- II. **Rekonstruktionen** weiterer **Lichtbogeneigenschaften**, wie z. B. der Druckwirkung und der Wärmeströme an den Elektroden (durch Anwendung der numerischen Lichtbogensimulation),
- III. ein **vertiefendes Verständnis**, welche thermophysikalischen Plasmaeigenschaften (Dichte, Wärmekapazität, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Viskosität sowie Strahlungsemission) einzelner Gaskomponenten die Lichtbogeneigenschaften und die bei der Tropfenablösung notwendigen Kräfte beeinflussen (durch Modellanalysen),
- IV. und die **Beschreibung der Wechselwirkung** verschiedener **Schutzgase** mit dem am Draht entstehenden **Metalldampf** (durch numerische und experimentelle Untersuchungen).

Im Speziellen soll auch untersucht werden, warum zum Teil marginale Zumischungen eines dritten oder vierten Gases einen sehr deutlichen Einfluss auf die Prozesseigenschaften bedingen.

Als sekundäres wissenschaftliches Ziel erfolgt die Weiterentwicklung der numerischen Schweißprozesssimulation von Lichtbogenverfahren in folgenden Schritten:

- I. Eine **Datenbank der thermophysikalischen Plasmaeigenschaften** der Schutzgase wird erstellt, die für die Simulation des MSG-Schweißens mit unterschiedlichen Schutzgasen benötigt wird. Hierin sind die Eigenschaften der Gasgemische mit zusätzlichem Metalldampf enthalten.
- II. Eine **Validierung der MSG-Lichtbogenmodelle** hinsichtlich ihres Aussagevermögens für die zu untersuchenden Gasgemische wird durchgeführt. Die Modelle werden gegebenenfalls angepasst und weiterentwickelt.

Durch die Untersuchungen wird somit die Anwendbarkeit der MSG-Lichtbogenprozesssimulation erweitert. Dadurch werden die bei allen Anwendern angestrebte Durchdringung der Fertigungsprozesse und die Entwicklung der Schweißsimulation vorangetrieben.

Die technischen Ergebnisse betreffen die **Quantifizierung von Vor- und Nachteilen**, die aus der Anwendung spezieller Gase resultieren. Die Untersuchungen umfassen zwei- und mehrkomponentige Gasgemische aus Ar, He, CO₂, O₂ und H₂. Hierbei wird insbesondere der Gaseinfluss hinsichtlich des Einbrandprofils, der Geometrie der WEZ und der Häufigkeit von Spritzern in Abhängigkeit der zugemischten Komponenten und deren Anteilen dargestellt.

Unmittelbar anwendbare technische Ergebnisse wurden für Sprüh- und Impulslichtbogenprozesse erarbeitet, die aufgrund des verbesserten Einbrandes gegenwärtig an Bedeutung gewinnen. Für diese Prozesse werden alternative Gaszusammensetzungen zum gegenwärtig fast ausschließlich angewendeten M21-ArC-18 ermittelt. An einem konkreten Praxisbeispiel (VW Querlenker) werden die Vorteile der Gasalternativen dargestellt.

5 Experimentelle Untersuchungen zur Wirkungsweise der Gase

5.1 Vorgehensweise

In Rahmen von Auftragschweißungen wurde der grundsätzliche Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf das MSG-Prozessverhalten untersucht. Alle Versuche wurden an einem Sprühlichtbogenprozess mit anodischer Drahtelektrodenpolung (DC EP), einer Abschmelzleistung von 13 m/min und einer mittleren Stromstärke von 350 A durchgeführt. Erst bei dieser, für einen Drahtdurchmesser von 1,2 mm verhältnismäßig hohen Stromstärke konnten bei allen untersuchten Gasen gleiche Drahtvorschübe und Stromstärken erreicht werden. In bisherigen Untersuchungen wurde oftmals nur einer dieser Faktoren konstant gehalten, so dass die Ergebnisse aus Sicht der Autoren nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Eine Zusammenfassung der Prozessparameter ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Angaben zum Schweißprozess

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,2 mm
Drahtvorschub	13 m/min
mittlere Stromstärke	350 A
Stickout	20 mm
Schweißgeschwindigkeit	1 m/min
Grundwerkstoff	S235
Schweißposition	PA
Naht	Auftragsnaht

Mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera, einem nicht-intrusiven Laserbeleuchtungssystem, einem Interferenzfilter und einem zeitsynchronen Messsystem wurden die Versuche dokumentiert. Weitere Angaben zum Versuchsaufbau sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Angaben zum Versuchsaufbau

Frequenz HG-Kamera	10 kHz
Frequenz Laserbeleuchtung	5 kHz
Messsystem	Dewetron
Schweißstromquelle	EWM 521 Phoenix
Schweißbrenner	Abicor Binzel MFS 5

Untersucht wurden zwei- bis vierkomponentige Schutzgase aus Argon mit Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff. Es ist bekannt, dass die Verwendung von Wasserstoffzumischungen im Schutzgas beim Schweißen von Baustahl zu einer erhöhten Porenbildung führen kann. Im Zuge einer grundlegenden Untersuchung der Schutzgaseigenschaften auf das MSG-Schweißen und der Möglichkeit einer entsprechenden Übertragbarkeit auf andere Werkstoff wurden Zumischungen von Wasserstoff jedoch ebenfalls untersucht. In Tabelle 5.3 ist eine Zusammenstellung aller verwendeten zweikomponentigen Schutzgase dargestellt.

Tabelle 5.3: Untersuchte zweikomponentige Schutzgasgemische

Gaskomponente	Zumischung zu Argon [%]
Kohlenstoffdioxid	0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 10 18 25
Sauerstoff	0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 8
Helium	30 50 70
Wasserstoff	2 5

Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen mit unterschiedlichen Schutzgaszusammensetzungen zu gewährleisten, wurde die Länge des freien Drahtendes und die daraus resultierende ohmsche Vorwärmung im Draht konstant eingestellt. In den Versuchen wurde dazu der Abstand zwischen der Werkstückoberfläche und der Schmelzgrenze am Draht näherungsweise konstant gehalten, vgl. Abbildung 5.1:.

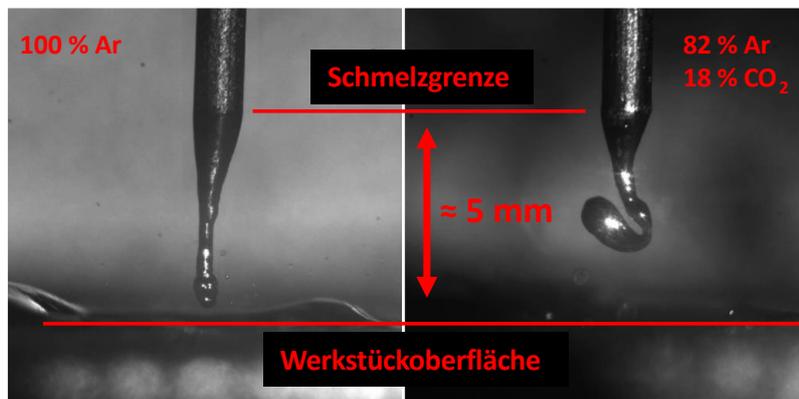


Abbildung 5.1: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Sprühlichtbogenprozesses mit einer Abschmelzleistung von 13 m/min bei einer mittleren Stromstärke von 350 A für verschiedene Schutzgaszusammensetzungen

Die Längenänderung des freien Drahtendes wurde durch Korrektur der Spannung vorgenommen. Abbildung 5.2 zeigt die Änderung der Spannung an der Stromquelle für Schutzga-

se aus reinem Argon bzw. zweikomponentige Schutzgase aus Argon mit Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium oder Wasserstoff.

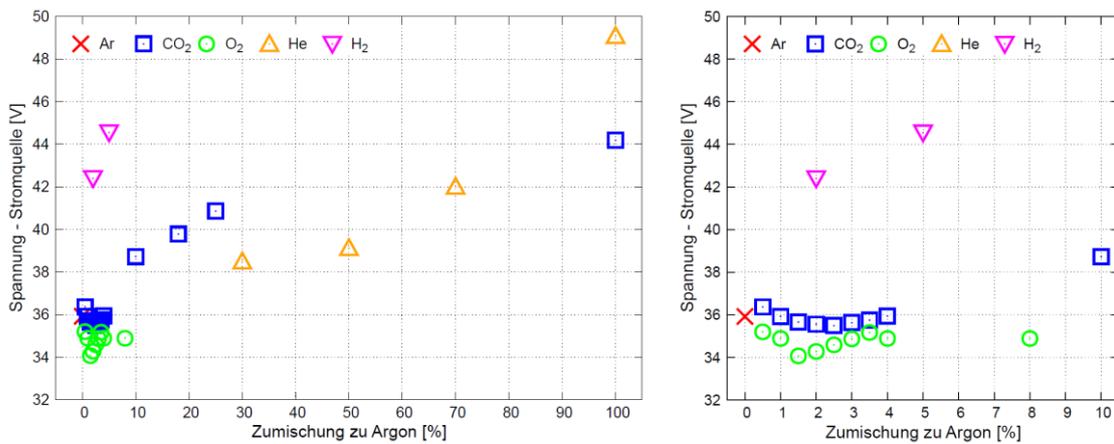


Abbildung 5.2: Variation der Spannung an der Stromquelle für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon (rechts: Detailansicht im geringen Zumischungsbereich)

Im Bereich geringer Zumischungen von Kohlenstoffdioxid (2,5 %) bzw. Sauerstoff (1,5 %) ergibt sich ein lokales Minimum in der Spannung. Bei größeren Zumischungen ergibt sich für Kohlenstoffdioxid, Helium und Wasserstoff eine Erhöhung der Spannung. Die Ursache des lokalen Spannungsminimums ist derzeit noch nicht vollständig geklärt. Aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde unter Annahme einer Rotationssymmetrie sowohl die zeitlich gemittelte Kontur des Undoloids als auch die Form des Metaldampfkerns ermittelt, siehe Abbildung 5.3.

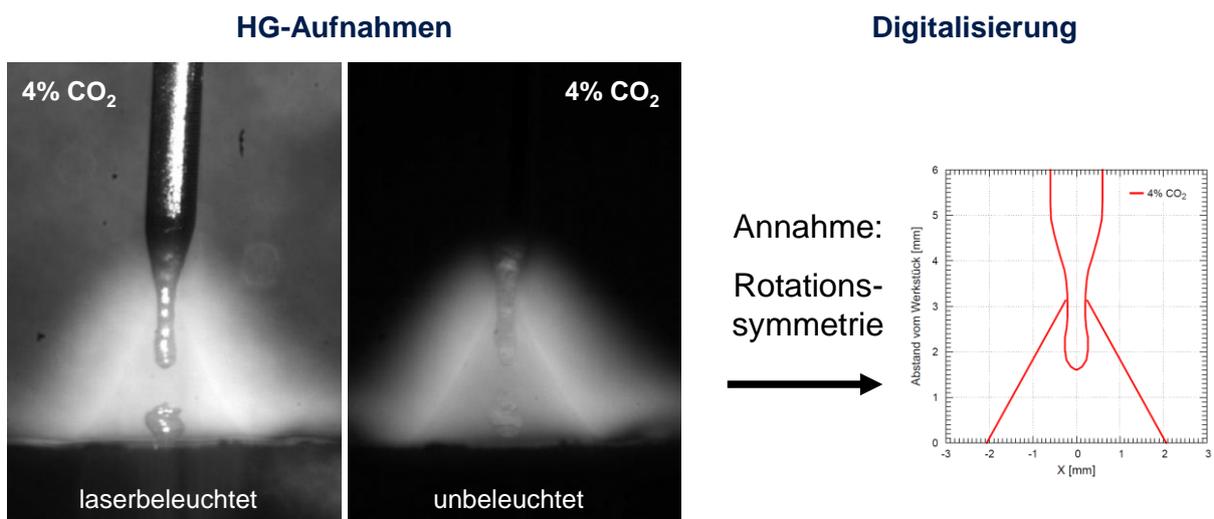


Abbildung 5.3: Vorgehensweise bei der Digitalisierung der Drahtkontur und des Metaldampfkerns aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Auswertung der Form des Metaldampfkerns erlaubt eine Abschätzung hinsichtlich der Einflussnahme des Schutzgases auf die Verdampfungsvorgänge an der Drahtelektrode und dem daraus resultierenden Metaldampfanteil im Lichtbogen.

Des Weiteren wurden Makroschliffe der Versuchsschweißungen ausgewertet, um den Einfluss der Schutzgase hinsichtlich des Einbrandverhaltens und der Wärmeeinbringung zu charakterisieren. Dabei wurde sowohl die Nahtkontur als auch die Form des Schweißgutes und der Wärmeeinflusszone bestimmt.

5.2 Einfluss der Schutzgase auf den Werkstoffübergang

Der MSG-Sprühlichtbogenprozess ist durch einen feintröpfigen und kurzschlussarmen Werkstoffübergang gekennzeichnet. In Abhängigkeit der Schutzgaszusammensetzung ändern sich das Abschmelzverhalten der Drahtelektrode und dadurch das Prozessverhalten hinsichtlich der Häufigkeit von Kurzschlüssen, Spritzern und Nahtimperfectionen und der Entstehung von Metaldämpfen. Der schmelzflüssige Teil der Drahtelektrode nimmt die Form von Unduloiden an [Con1959]. Für die Häufigkeit von Kurzschlüssen ist die Länge des Unduloiden maßgeblich. Je kleiner die Länge des Unduloiden, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit eines Kurzschlusses.

Da die mittlere Temperatur der sich bildenden Tropfen beim MSG-Schweißen deutlich höher als die mittlere Temperatur des Schmelzbades ist [Sie2013], besitzt die Art des Werkstoffübergangs neben der Bestimmung des Nahtaufbaus einen großen Einfluss auf die Energieeinbringung in das Bauteil. Daher wird davon ausgegangen, dass sowohl die mittlere Tropfentemperatur als auch der durchschnittliche Auftreffbereich des Tropfens in das Schmelzbad von großer Bedeutung für die Breite der Wärmeeinbringung ist.

Durch die Auswertung der HG-Aufnahmen wurde der Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Geometrie der Unduloiden analysiert. Des Weiteren wurde die Form des Metaldampfkerns ausgewertet. In Abbildung 5.4 sind die mittleren Formen des Unduloiden und des Metaldampfkerns für unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen dargestellt.

Während Zumischungen von Helium und Wasserstoff nur einen geringen Einfluss auf die mittlere Form der Unduloiden besitzen, ändert sich dessen mittlere Länge durch die Zumischung von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff erheblich. In den HG-Aufnahmen ist eine deutliche Reduzierung der Unduloidenlänge bei Zumischungen oberhalb von 2,5 % Kohlenstoffdioxid bzw. 1,5 % Sauerstoff zu beobachten. Diese Zumischungsanteile korrelieren mit dem beobachteten Spannungsminimum, vgl. Abbildung 5.2. Oberhalb der Zumischungen von 4 %

Kohlenstoffdioxid bzw. Sauerstoff ist keine weitere Verkürzung der Unduloidenlänge zu beobachten.

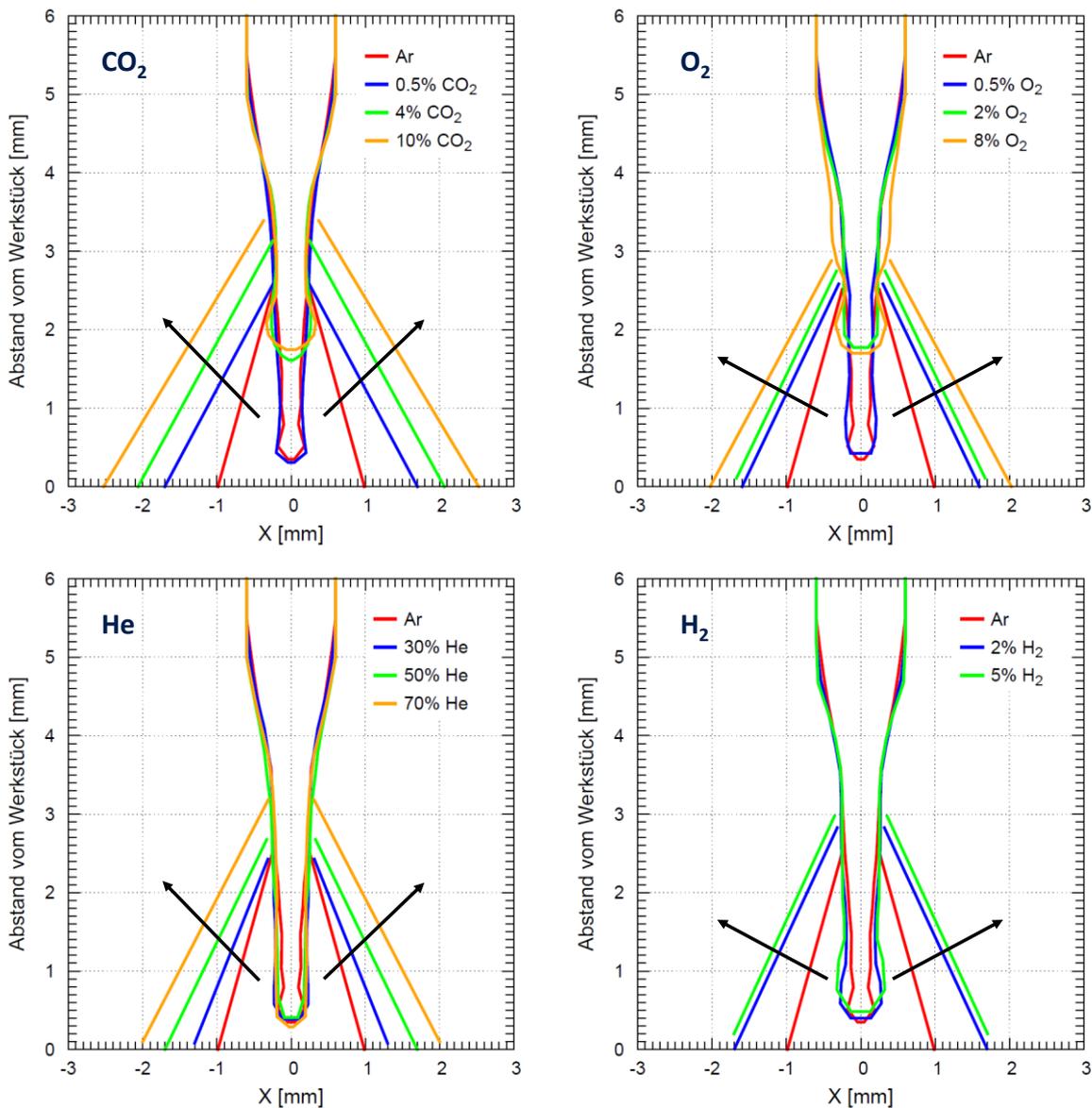


Abbildung 5.4: Variation der zeitlich gemittelten Form des Unduloids und des Metalldampf-kerns für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Eine weitere Änderung des Abschmelzverhaltens der Drahtelektrode ist bei höheren Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu beobachten. Während der Werkstoffübergang bei allen untersuchten Zumischungen von Sauerstoff, Helium und Wasserstoff und bei Zumischungen von Kohlenstoffdioxid unterhalb von 10 % näherungsweise symmetrisch zur Achse der Drahtelektrode erfolgt, wird die Tropfenablösung bei Zumischungen oberhalb von 10 % Koh-

lenstoffdioxid zunehmend unsymmetrisch. Dadurch ändern sich die Eintrittsfläche des Tropfens an der Schmelzbadoberfläche und damit die Wärmeeinbringung ins Bauteil, vgl. Abbildung 5.5.

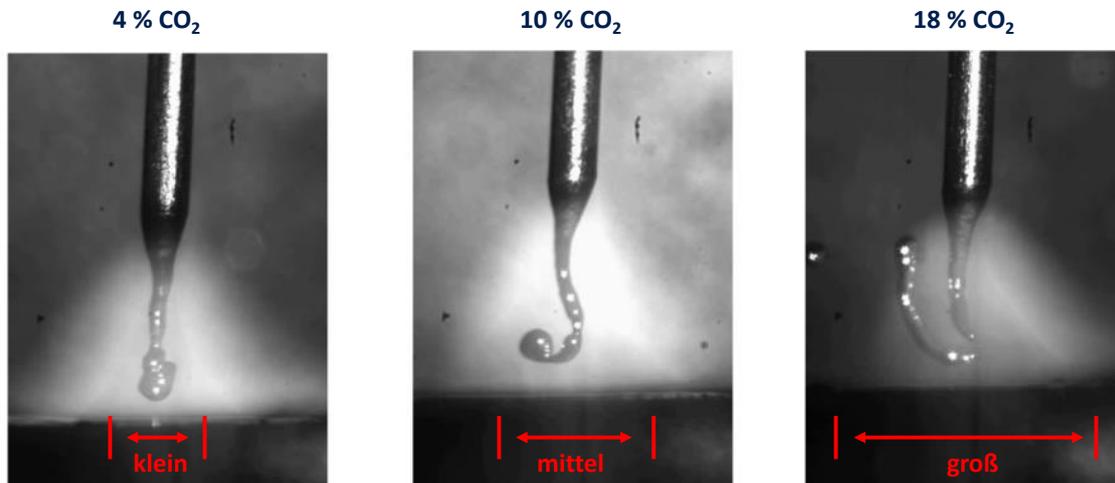


Abbildung 5.5: Variation der Eintrittsfläche der Tropfen in das Schmelzbad für unterschiedliche Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon

Die Auswertung der mittleren Form des Metalldampfkerns lässt Rückschlüsse auf die Verdampfungsvorgänge an der Drahtelektrode und damit auf den Temperaturhaushalt der Drahtelektrode zu, vgl. Abbildung 5.4. Unter Annahme einer idealen Verdampfung an der Drahtelektrode korreliert der Punkt am Draht, an dem die Metalldampfenstehung beginnt, (Oberseite des Metalldampfkegels) mit einer Temperatur von ca. 3000 K. Je größer die Metallverdampfung an der Drahtelektrode ist, desto mehr Volumen nimmt der Metalldampfkern im Lichtbogen ein, was wiederum in einer Verschiebung des Metalldampfkegels in Richtung Stromkontaktdüse und/oder einer Vergrößerung des Winkels des Metalldampfkegels resultiert.

Grundlegend führen alle untersuchten Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon zu einer Erhöhung der Metallverdampfung an der Drahtelektrode, vgl. Abbildung 5.4. Im Vergleich zu Sauerstoff bedingen gleiche Zumischungen zu Kohlenstoffdioxid eine größere Zunahme der Metallverdampfung. Wasserstoff bewirkt die drastischste Steigerung der Metallverdampfung für gleiche Zumischungsanteile.

Die Zunahme der Metallverdampfung lässt ebenfalls eine Zunahme der Schweißrauchemissionen des Prozesses vermuten. Die Schweißrauchemissionen wurden im Rahmen des Projektes nicht gemessen. Aus der Literatur sind diese Einflüsse jedoch bekannt und hinreichend dokumentiert [Eic1981] [Car2009] [Ros2010].

5.3 Bestimmung des Schutzgaseinflusses auf den MSG-Lichtbogen durch OES-Messungen

Eine weitere Diagnosemethode, um den Schutzgaseinfluss auf den Metaldampf durch seine Wirkung auf den Lichtbogen zu bestimmen, ist die OES. Diese wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera kombiniert, die bis zu 10.000 Bilder/s aufzeichnen kann. Die OES wurde mittels einer hochauflösenden Spektrometereinheit bestehend aus Monochromator (Prinston Instruments Acton SP2500), ICCD (Prinston Instruments PI-Max4) und optischen System aus Spiegeln und Blende realisiert. Abbildung 5.6 zeigt den schematischen Aufbau.

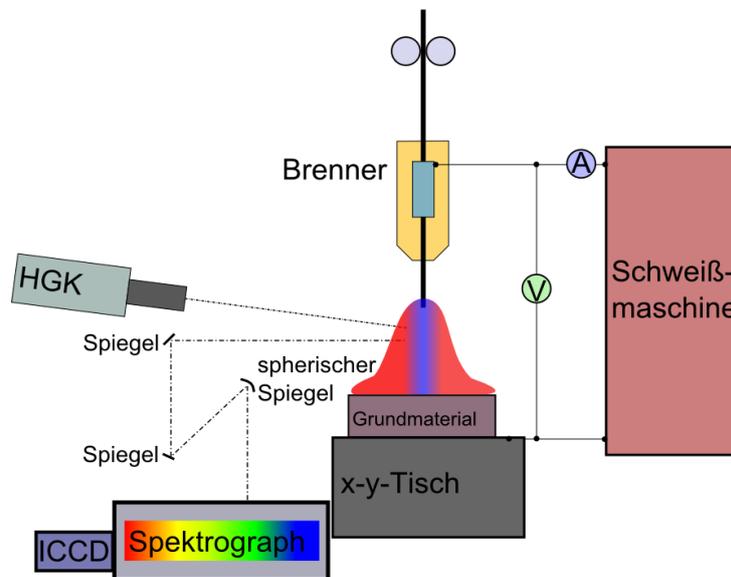


Abbildung 5.6: Versuchsaufbau mit Lichtbogen fixiert im Zentrum und ausgerichteter Diagnostik

Ein fest positionierter Brenner und eine Verschiebeinheit, die das Grundmaterial mit der gewünschten Schweißgeschwindigkeit bewegte, ermöglichten reproduzierbare Schweißversuche. Mit Hilfe dieses Aufbaus war es möglich unter einem kleinen Winkel sowohl HG-Aufnahmen als auch ortsaufgelöste Spektren aus der gleichen Richtung aufzunehmen. Dadurch konnten beide hinterher miteinander verglichen werden, was eine Verifizierung der Messergebnisse ermöglichte.

Zunächst wurde sich mit dem PbA auf die Randbedingungen der zu untersuchenden Parameter geeinigt. Hierbei ging es um die Einschränkung der Schweißparameter, die verwendeten Materialien und auch die Schutzgase.

Die Schweißparameter wurden auf den Bereich des Sprühlichtbogens eingeschränkt. Insbesondere mit einem über dem Blech liegenden Lichtbogen. Außerdem wurde für die verschie-

denen Gase, wie bereits oben erwähnt, auf einer in konstanter Höhe liegende Anschmelzgrenze des Drahtes geachtet. Die entsprechenden Parameter kamen aus den Versuchen der TU Dresden und wurden am INP mit einer baugleichen Schweißstromquelle EWM Phoenix 521 verwendet, siehe Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2.

Außerdem wurde darauf geachtet, dass sowohl an der TU Dresden, als auch am INP gleiche Chargen des Grundmaterials und Drahtes verwendet wurden, um möglichst ähnliche Bedingungen zu erzielen. Nur die Anzahl der verwendeten Gasmischungen wurde eingeschränkt, weil die Auswertung aller Mischungen nicht im zeitlichen Rahmen zu bewältigen war. In Tabelle 5.5 sind einmal die am INP untersuchten Zweiergemische zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Zweiergemische mit Gasanteilen in Vol%

Ar	CO ₂	O ₂	H ₂	He
100	0	0	0	0
99	0	1	0	0
97,5	2,5	0	0	0
94	0	0	6	0
92	0	8	0	0
82	18	0	0	0
50	0	0	0	50

5.3.1 Optische Emissionsspektroskopie am Lichtbogen in Zweiergemischen

Zunächst wurden die zweier Gasmische von Ar mit O₂ oder CO₂ verwendet. Über das optische System, das im 5.1 beschrieben wurde, ist der Lichtbogen auf dem Spektrometerspalt abgebildet worden. Das so gewonnene Spektrum enthielt somit eine Ortsauflösung, die für eine Entabelung notwendig ist, um letztlich ein Temperaturprofil über den Lichtbogen zu erstellen. Die Abbildung 5.7 zeigt den Lichtbogen im Vergleich mit dem daraus resultierenden Spektrum. Bereits hier kann man die Verteilung der Elemente im Bogen erkennen. Das Spektrum zeigt dominant die 696 nm-Linie des Ar-Atoms über den Mantelbereich und deutlich schwächer Fe-Linien und etwas Kontinuum im Zentrum des Bogens. Zu bedenken ist, dass hier das sideon Spektrum dargestellt ist. Das bedeutet, das Spektrum, was von der

Seite zu beobachten ist. Nach einer inversen Abeltransformation wird dieser Effekt noch deutlicher.

Für die Temperaturberechnungen waren Zusammensetzungsrechnungen und weitere Transportdaten notwendig. Diese wurden durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter am INP bereitgestellt.

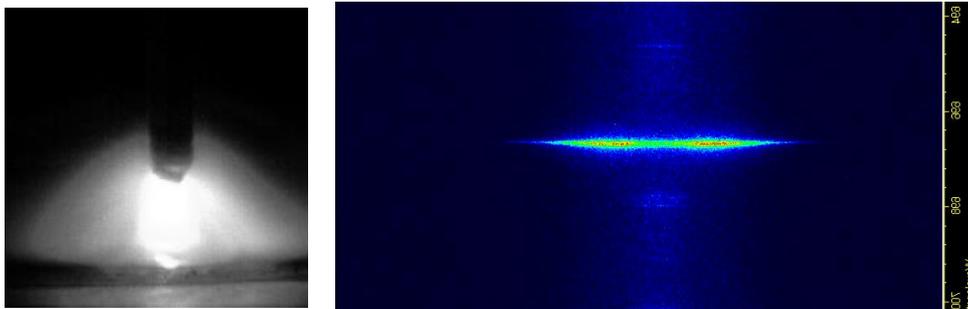


Abbildung 5.7: Beispielhafte Gegenüberstellung von HG-Bild und orts aufgelöstem Spektrum

In Abbildung 5.8 sind die Verläufe der Temperaturprofile für fünf verschiedenen Gasgemische dargestellt. Es wird das Profil von reinem Ar jeweils mit den Profilen der Zumischung aus O_2 und CO_2 verglichen. Dabei fällt auf, dass der Unterschied hervorgerufen durch die beiden O_2 -Zumischungen nicht so groß ist wie der durch die CO_2 -Zumischungen.

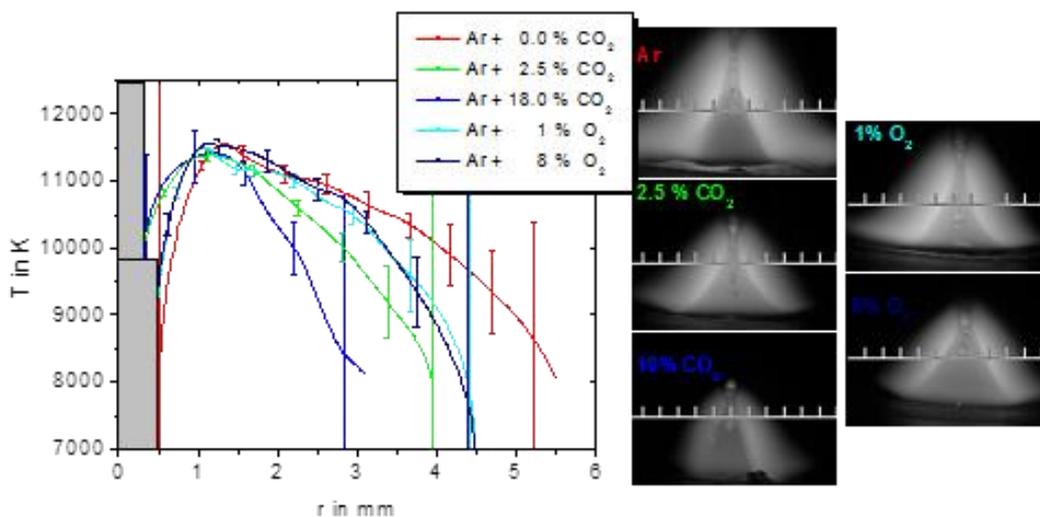


Abbildung 5.8: Temperaturprofile und entsprechende HG-Bilder für verschiedene Gasgemische

Die Bestimmung solcher Temperaturprofile ist zeitaufwendig, was die Analyse von vielen Gasgemischen schwierig macht. Es wurde der Vorschlag von Seiten des INP eingebracht ein Tool zu entwickeln, dass in kürzerer Zeit mehr Temperaturprofile erstellen kann. Dieses

hat den Vorteil schneller 2D-Temperaturprofile in hoher zeitlicher Folge zu erstellen. Dadurch sind Metaldampfverteilungen und Bogenansatz zu erkennen.

5.3.2 Verfahren zur Bestimmung von 2D-T-Profilen mittels HG-Aufnahmen

Die spektroskopischen Aufnahmen ermöglichen die sehr genaue Bestimmung von Temperaturprofilen in einer festgelegten Höhe im Lichtbogen. Diese eignen sich für die Validierung der Simulationen. Im Laufe des Projektes stellte sich jedoch heraus, dass die radiale Struktur des zentralen Bereichs des Lichtbogens für den Materialtransfer von untergeordneter Bedeutung ist. In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigte sich, dass die Bogenstruktur insbesondere im Ansatz am Draht deutlich von der Schutzgaswahl abhängt. Um eine genauere Einschätzung der Struktur des Lichtbogenansatzes am Draht zu ermöglichen, wären viele spektroskopische Profilmessungen in unterschiedlichen Höhen notwendig. Das würde viel Zeit kosten. Ein zusätzliches Problem stellt die Dynamik eines realitätsnahen Sprühlichtbogens dar, da spektroskopische Messungen auf einer Lichtbogenebene jeweils nur mit größerem zeitlichem Versatz möglich sind. Deshalb wurde ein schnelleres Verfahren gewählt. Im Rahmen paralleler Arbeiten in einem Grundlagenprojekt entstand am INP die Idee, spektral selektive HG-Aufnahmen für eine Bestimmung von 2D-Temperaturprofilen zu qualifizieren. Ein solches Verfahren bietet eine Reihe von Vorteilen für die Zielstellung des Projektes:

- a) Zweidimensionale Temperaturprofile erlauben eine geometrische Analyse des Bogenansatzes und der Bogenlänge, da sie Aufschluss über die Bereiche hoher Stromdichte und damit des Strompfads geben.
- b) Da die zweidimensionalen Profile jeweils aus einem Bild rekonstruiert werden, wird das Problem der Reproduzierbarkeit des Bogens umgangen.
- c) Zeitabhängige Analysen erlauben die Einschätzung der Bogendynamik und der Variation des Bogenansatzes.
- d) Bei Nutzung einer entsprechenden Auswertungssoftware ist eine wesentlich effizientere Datenanalyse möglich im Vergleich zur Auswertung der spektroskopischen Messungen.

Voraussetzung der Anwendung dieser Methode war jedoch die Adaption auf den betrachteten Sprühlichtbogenprozess, die Validierung der Methode durch Vergleich mit den spektroskopischen Analysen sowie die Erstellung der Auswertungssoftware. Vorarbeiten und erste Ergebnisse der erfolgreichen Überprüfung der Methode wurden dem PbA vorgestellt. Da das

Verfahren eine effizientere Auswertung und damit auch die Betrachtung einer größeren Parametervariation in der Lichtbogenanalyse erlaubt, wurden zusammen mit dem PbA eine Änderung des Projektplans beschlossen.

Damit dieses Verfahren möglich ist muss aber der günstigste Spektralbereich ausgewählt werden, um eine Temperatur zu bestimmen. Es müssen dafür mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen sollten in dem Spektralbereich nur die Linien einer Spezies zu finden sein, in diesem Fall die des Ar-Atoms. Zu diesen Linien müssen dann auch die wichtigen Daten bekannt sein, wie zum Beispiel das obere Energieniveau und statistische Gewicht oder die Übergangswahrscheinlichkeit. Außerdem sollte kein oder wenig störendes Kontinuum vorhanden sein und die Linien sollten eine verhältnismäßig hohe Intensität haben, damit auch bei geringerem Ar-Anteil genug Intensität gemessen werden kann. Im Übersichtsspektrum der Abbildung 5.9 sind mal die verschiedenen Bereiche und deren Spektrallinien markiert. Aus diesen ist dann ein günstiger Bereich ausgewählt worden. Die beiden Linienpaare mit der höchsten Intensität sind die bei 763 nm und 811 nm.

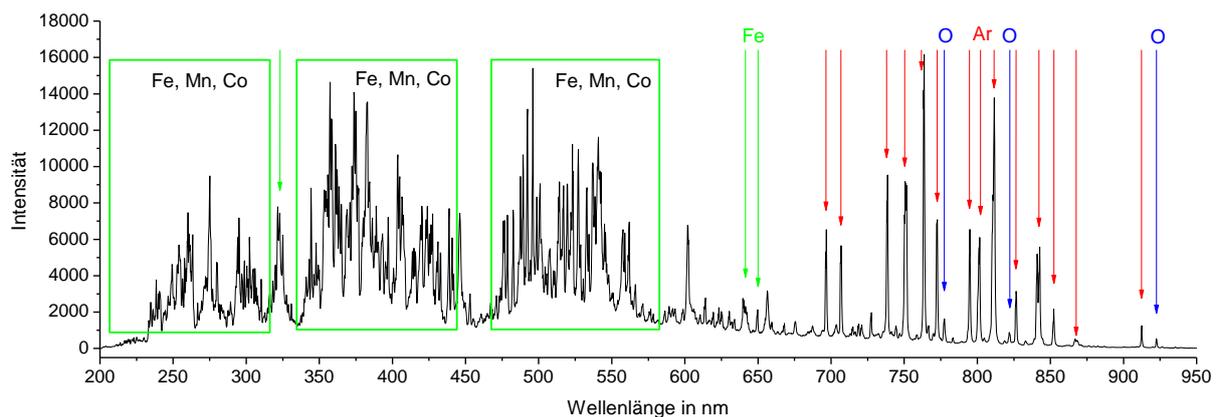


Abbildung 5.9: Übersichtsspektrum über einen Sprühlichtbogen

Daher wurde ein MIF für den Wellenlängenbereich von 811 nm bestellt. Aufgrund von Variationen in der Herstellung kann es zu Abweichungen kommen, daher muss jeder Filter vor Benutzung genau vermessen werden. Abbildung 5.10 zeigt die Filtertransmissionskurve zusammen mit den Positionen der beiden Ar-Linien.

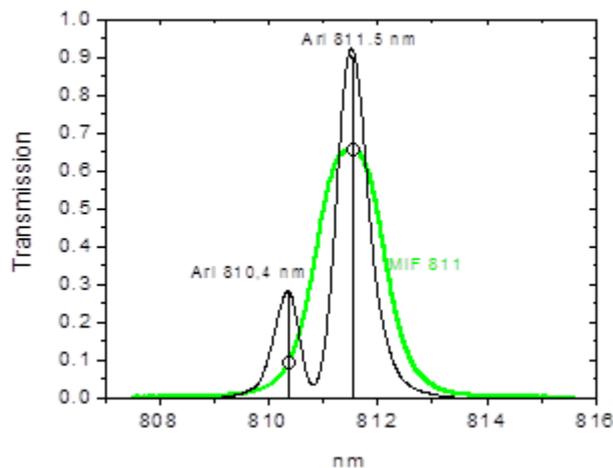


Abbildung 5.10: Übersichtsspektrum über einen Sprühlichtbogen

Dieser Filter bewirkt, dass sämtliche Strahlung, die von Fe-Linien und andern Elementen stammt ausgeblendet wird. Die Abbildung 5.7 zeigt die ungefilterte Aufnahme eines Lichtbogens. Dort sind der helle Kern und der schwächer leuchtende glockenförmige Teil des Lichtbogens deutlich zu erkennen. In Abbildung 5.11 ist hingegen eine gefilterte Aufnahme gezeigt, in der der helle Lichtbogenkern fehlt und nur noch der glockenförmige Teil zu sehen ist. Das liegt daran, dass, wie schon in Abbildung 5.7 gezeigt, im Kern überwiegend Metallampf strahlt, der jetzt jedoch geblockt wird. Es ist nur noch Ar I-Strahlung der beiden Linien bei 810 und 811 nm zu sehen, die überwiegend im äußeren glockenförmigen Teil zu finden ist.



Abbildung 5.11: Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit Metalinterferenzfilter bei 811 nm

Durch Kalibration der Kamera-Objektiv-Filter-Kombination kann die Absolutintensität der Ar I-Strahlung gemessen werden. Das bedeutet, dass jeder Pixel der CCD ein Sensor ist, der ein

über einen bekannten Spektralbereich integriertes Signal misst. Von diesem Signal kann unter Annahme von Zylindersymmetrie des Lichtbogens der Emissionskoeffizient für jeden Ort im Lichtbogen berechnet werden. Aus diesem lässt sich wiederum unter Nutzung der Temperaturabhängigkeit des Emissionskoeffizienten die Temperatur bestimmen. Auf diese Weise erhält man ein 2D-Bild der Temperaturverteilung (siehe Abbildung 5.12 rechts).

All diese Schritte sind aufwändig können aber mittels Computertechnik automatisiert werden. Das im Projekt entwickelte Tool übernimmt die Glättung, Kalibrierung, Abel-Inversion und Umrechnung in die Temperatur. Dies erfolgt nicht nur für einzelne Bilder, sondern kann auf ganze Sequenzen angewendet werden.

Zusammen mit den schon bestimmten Temperaturprofilen aus der OES konnte die Richtigkeit des Tools für einzelne Gasgemische überprüft werden. Dieses Verfahren wurde auf die schon vermessenen Gasgemische mit CO₂ und O₂ angewendet und auf weitere mit He und H₂ erweitert. Die Auswertung zu den Messungen folgt im nächsten Kapitel.

5.3.3 Auswertungen zu den 2D-Temperatur-Profilen

Zur Veranschaulichung soll zunächst einmal ein solches Temperaturbild neben dem zugrundeliegenden HG-Bild dargestellt werden (Abbildung 5.12). Durch die Entabelung sind der Anodenansatz am Draht und die Bogenstruktur selbst besser zu erkennen. Dadurch ist in Verbindung mit Abbildung 5.8 auch der Strompfad vorstellbar, da die Leitfähigkeit direkt mit der Temperatur verknüpft ist.

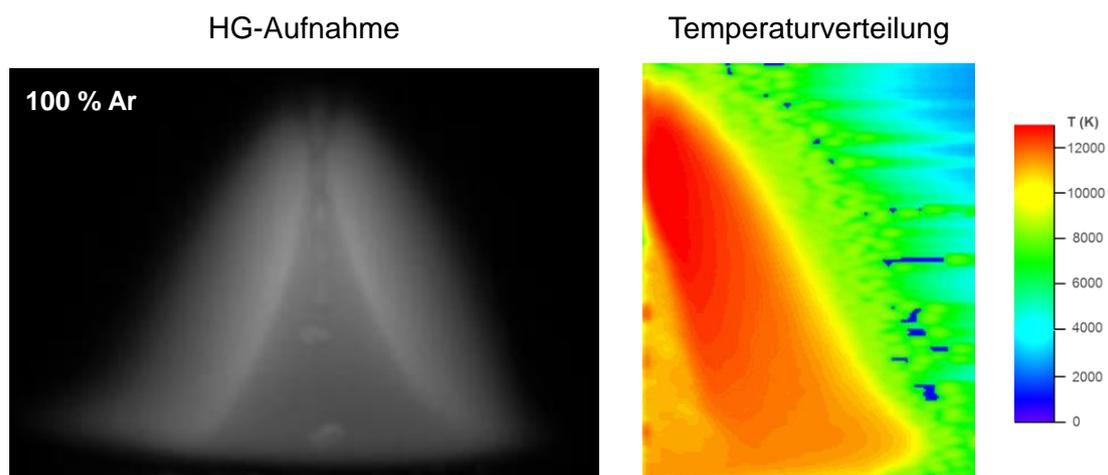


Abbildung 5.12: HG-Aufnahme und resultierendes Temperaturbild

Zur weiteren Auswertung der Bilder wurde eine Auswerteprozedur erdacht, um die Ansatzlänge am Draht und die Lichtbogenlänge zu bestimmen ohne dass durch den Auswertenden ein bevorzugtes Ergebnis vordefiniert wird. Diese Prozedur musste unabhängig von den Gasen die gleiche sein, damit ein Vergleich untereinander möglich war. Dazu wurde über einen für alle Bilder gleichen Schwellenwert eine Einhüllende des Lichtbogens erzeugt. An der oberen Seite des Lichtbogens wurde im Winkel der im HG-Bild sichtbaren Drahtflanke eine Gerade gezeichnet, die jeweils an der Einhüllenden endete. Diese Strecke ergab die Ansatzlänge. Dann wurde der Fußpunkt des Lichtbogens bestimmt (in Abbildung 5.13 gestrichelt). Der liegt auf der Höhe wo die äußere Kurve der Einhüllenden ihren maximalen Abstand vom Zentrum hat und wurde ebenfalls von der Einhüllenden begrenzt. Nun wurde zwischen der Mitte der Fußpunktlinie und der Mitte der Ansatzlinie eine weitere Gerade gezeichnet. Diese bildete die Lichtbogenlänge.

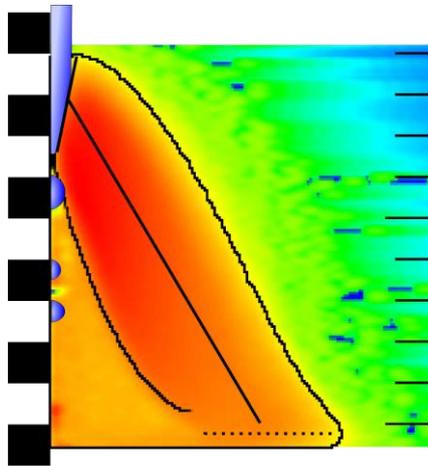


Abbildung 5.13: HG-Aufnahme und resultierendes Temperaturbild

Der Vergleich der Lichtbogen- und Ansatzlänge für die untersuchten Gase ist in Abbildung 5.14 zu finden. Hier sind die grafisch bestimmten Längen in Abhängigkeit von dem prozentualen Anteil an Molekülgas im Argon dargestellt. Auffallend in beiden Diagrammen ist der gleichmäßig fallende Verlauf für O_2 und CO_2 . Nur bei der Lichtbogenlänge bildet H_2 eine Ausnahme. Das He als Nicht-Molekülgas zeigt erst bei deutlich höheren Konzentrationen als 50 % eine Wirkung ist aber hier der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

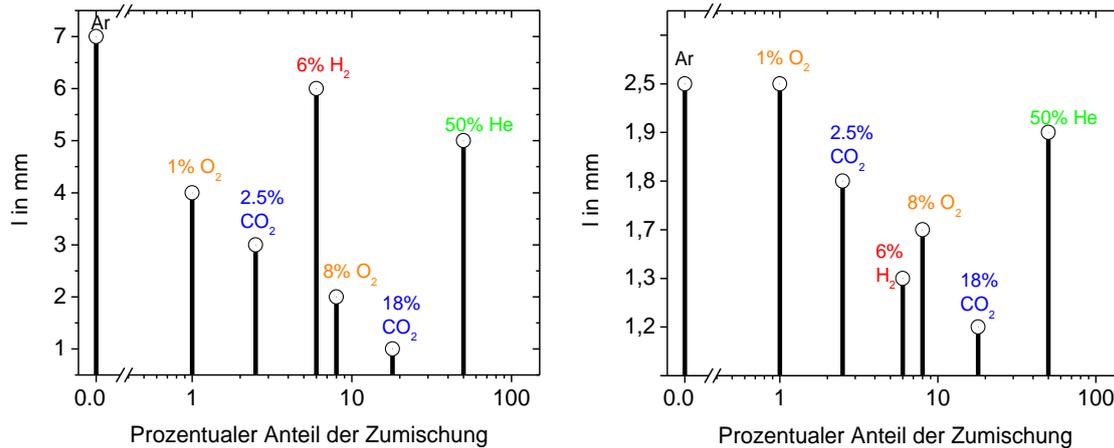


Abbildung 5.14: Lichtbogenlänge (links) und Ansatzlänge (rechts)

Aus dieser Darstellung lässt sich ableiten, dass der Elektrodenansatz einen größeren Einfluss auf das Schmelzbad und damit die Naht hat als der Lichtbogenfuß, also der Ansatz an der unteren Elektrode. Das liegt hauptsächlich an der Wirkungsweise des am Draht auf den Materialtransfer. Durch einen geringeren Molekülgasanteil ist dieser Lichtbogenansatzes breit und hoch am Draht. Der Strom tritt durch die geringere Leitfähigkeit des Metaldampfes hier aus und bewirkt die Einschnürung des schmelzflüssigen Drahtes, dem Unduloiden bis hin zur Ablösung einzelner feiner Tropfen. Steigt der Molekülgasanteil, so wandert der Ansatz am Draht in Richtung Werkstück und verkürzt sich damit. Die Einschnürung findet in einem immer kürzer werdenden Bereich statt und die Ablösung wird grobtropfiger.

Auch findet der Übergang nicht mehr konzentriert im Zentrum statt, sondern die Tropfen treffen in einem größeren Bereich auf das Schmelzbad. Das lässt sich durch eine weitere Auswertemöglichkeit der Hochgeschwindigkeits-2D-Profile zeigen. Dies soll im Folgenden näher beschrieben werden.

5.3.4 Stabilitätsabschätzung

Da es sich bei der Auswertung um ganze Sequenzen von 2D-Temperaturprofilen handelt, lassen sich aus den zeitlichen Abfolgen die Mittelwerte \bar{x} und die Standardabweichungen s für jeden Punkt in der entsprechenden 2D-Matrix erstellen. In Abbildung 5.15 sind dazu beispielhaft ein 2D-T-Profil zusammen mit dem dazugehörigen Mittelwert und der Standardabweichung für eine einsekündige Sequenz dargestellt.

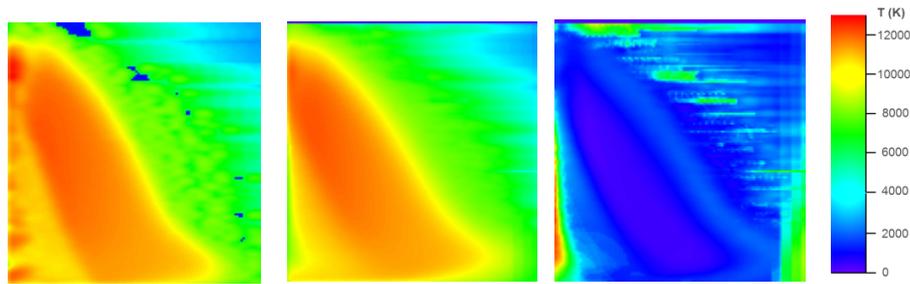


Abbildung 5.15: einzelnes 2D-T-Profil aus HG-Aufnahme (links), Mittelwert (Mitte) und Standardabweichung (rechts) aus Sequenz

Es wurde für eine Sequenz von einer Sekunde der Mittelwert für jeden Bildpunkt bestimmt und mit folgender Gleichung die Standardabweichung ebenfalls für jeden Bildpunkt bestimmt:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.3.1)$$

Die Standardabweichungen sind in Abbildung 5.16 für die Gasgemische von Ar mit 1 % O₂, 2,5 % CO₂, 8 % O₂ und 18 % CO₂ dargestellt. Bei geringen Konzentrationen von unter 3 % Zumischung sind Abweichungen vom entsprechenden Mittelwert nur im Zentrum zu finden, aber bei den höheren Konzentrationen ist diese Abweichung in einem deutlich breiteren Gebiet zu erkennen (roter Bereich im Zentrum). Dies ist ein Indiz dafür, dass sich der Materialtransfer mit geringerem Molekülgasanteil auf ein schmales Gebiet im Zentrum konzentriert, wohingegen ein wachsender Anteil das Gegenteil bewirkt.

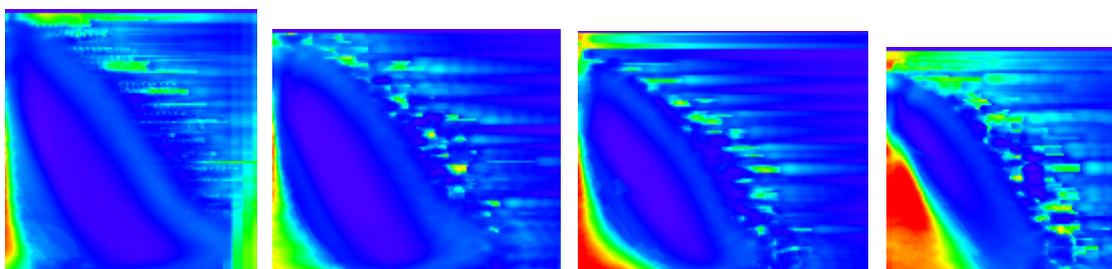


Abbildung 5.16: Standardabweichung für die Mischungen Ar mit Molekülgasanteil: von links 1 % O₂, 2,5 % CO₂, 8 % O₂ und 18 % CO₂

In Abstimmung mit dem PbA sind die Messungen am Sprühlichtbogen mit den sechs Zweiergemischen 1 % O₂, 2,5 % CO₂, 6 % H₂, 8 % O₂, 18 % CO₂, 50 % He (jeweils Rest Ar) und

auch mit dem reinen Gas 100 % Ar durchgeführt worden. Das Gleiche wurde für den Kurzlichtbogen wiederholt und zusätzlich zu den Zweiergemischen mit dem Dreiergemisch 10 % CO₂, 30 % He und dem Vierergemisch 2 % CO₂, 3 % O₂, 18 % He (jeweils Rest Ar) untersucht.

5.3.5 Untersuchung von Schutzgasen mit bis zu vier Komponenten im Kurzlichtbogen

In Absprache mit dem PbA wurden die Untersuchungen zu Mehrkomponentengasen und zur Erprobung der Mischungsregeln auf den Kurzlichtbogen konzentriert.

Es wurden im Gegensatz zum Sprühlichtbogen für alle Gasmischungen die gleichen Schweißparameter verwendet. Im Folgenden sind die Wichtigsten zusammengetragen. Es wurden Blindnähte auf 2 mm dicken Blechen aufgebracht. Der Kontaktrahabstand betrug 15 mm mit einem Brenner in 10° stechender Position. Als Drahtwerkstoff wurde G3Si1 mit 1,2 mm Durchmesser und 4,5 m/min Drahtvorschub verwendet. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 0,3 m/min. Für alle Gase wurde eine Spannungskorrektur von -1 V und ein Volumenstrom von 15 l/min eingestellt.

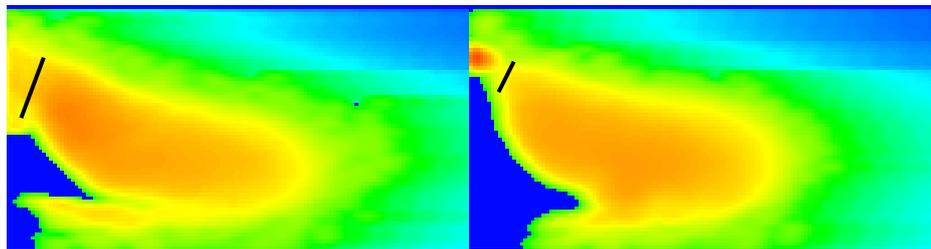


Abbildung 5.17: Vergleich zweier kurz aufeinander folgender 2D-T-Profile

Im Falle des Kurzlichtbogens konnte die Ansatzlänge am Draht nicht mehr so bestimmt werden wie beim Sprühlichtbogen, weil der Kurzlichtbogen deutlich dynamischer ist (siehe Abbildung 5.17). Auch die Lichtbogenlänge und deren Mittelwert sind nicht ohne weiteres zu bestimmen. Daher wurde zur weiteren Auswertung in der Routine zur Mittelwertbestimmung eine Funktion eingefügt, die Kurzschlüsse erkannte und automatisch aussortiert. Dann konnten am kurzschlussfreien Mittelwertbild eine mittlere Lichtbogenlänge und der Verschiebungsbereich des Ansatzes bestimmt werden, so wie es in Abbildung 5.18 gekennzeichnet ist.

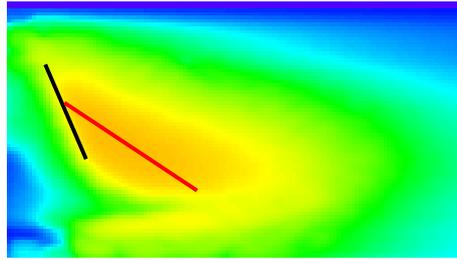


Abbildung 5.18: Vergleich zweier kurz aufeinander folgender 2D-T-Profile

Die resultierenden Längen können jetzt auf unterschiedliche Weise dargestellt werden. Sortiert man die Dreier- und Vierergemische entsprechend ihrem Fremdanteil im Ar, dann reiht sich das Dreiergemisch mit seiner mittleren Lichtbogenlängen gut im Diagramm auf Abbildung 5.19 ein. Das Vierergemisch hingegen weicht deutlich von den anderen Mischungen ab. Da die vorhergehenden Untersuchungen gezeigt haben, dass der Einfluss von He erst bei höheren Konzentrationen signifikant wird, kann man diesen Anteil in der Mischung auch vernachlässigen und stattdessen nur nach dem Molekülgasanteil im Ar sortieren. Dann weichen die Dreier und noch mehr das Vierergemisch ab.

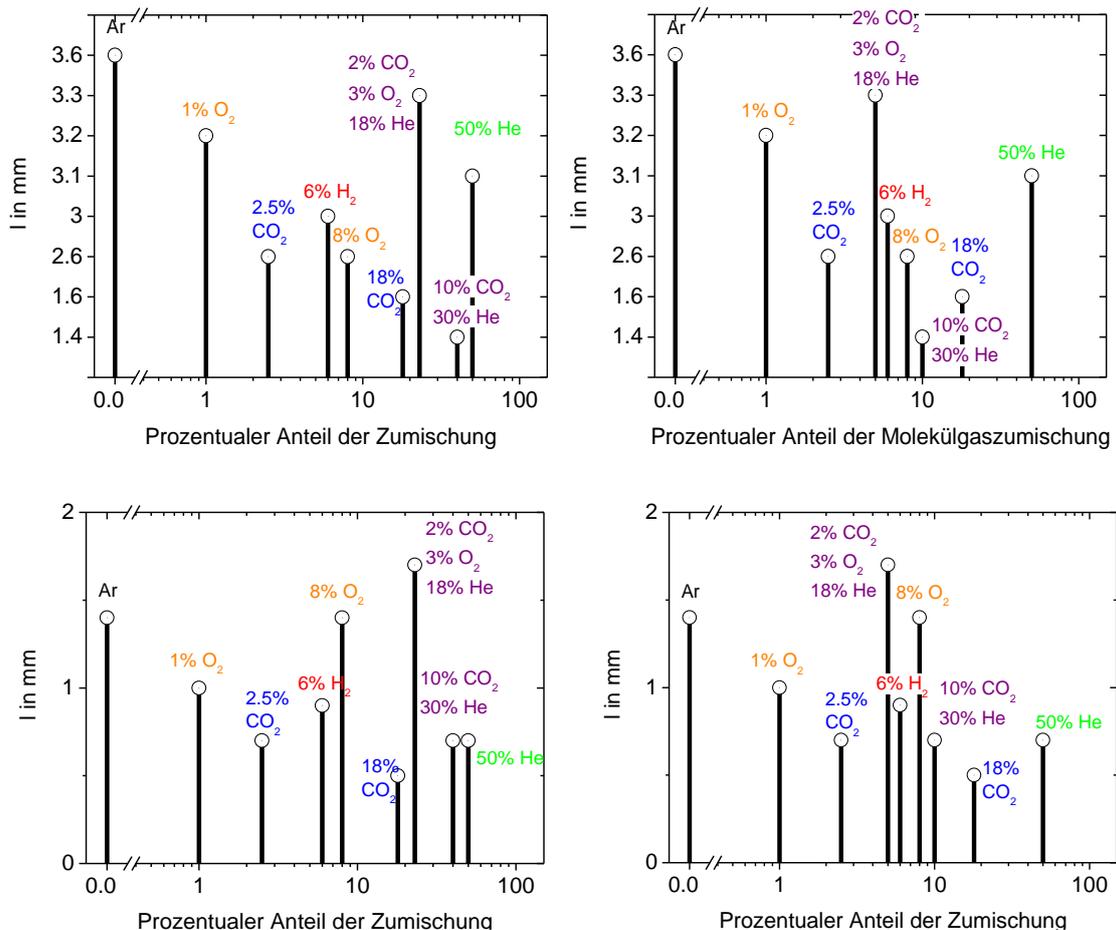


Abbildung 5.19: Mittlere Lichtbogenlänge für den Kurzlichtbogen

5.3.6 Schlussfolgerungen

Folgende Erkenntnisse aus den optischen Diagnostiken können zusammengefasst werden:

a) Bogenansatz am Draht:

- Ansatz fokussiert mit steigendem Molekülgasanteil und wandert Richtung Drahtspitze
- Metaldampfkern kegelförmig von konkav zu konvex
- deutlich schmaler werdender Strompfad bei Zumischung
- heißerer Bogen bei He-Zumischung

b) Bogenansatz am Werkstück

- analog zum Bogenprofil Fokussierung des Energieeintrages auf $\sim 1/4$ der Fläche bei steigendem Molekülgasanteil (nicht für das Schmelzbad relevant, korreliert nicht mit Naht und Wärmeeinflusszone!)
- H₂ und He bewirken Auslenkung des Bogens und Energieeintrag am vorderen Teil des Schmelzbades (Ausbeulungen im Falle von H₂)

Tabelle 5.5: Effekte bei verschiedenen Gasmische am Sprühlichtbogen

Schutzgas	Prozess	Tendenz bei Zunahme der zweiten Komponente		
		LB-Länge	LB-Ansatz am Draht	LB-Stabilität
Ar + CO ₂	Sprüh-LB	Abnahme	Abnahme	Abnahme
	Kurz-LB	Abnahme	Abnahme	~ gleich
Ar + O ₂	Sprüh-LB	Abnahme	Abnahme	Abnahme
	Kurz-LB	Abnahme	~ gleich	~ gleich
Ar + H ₂	Sprüh-LB	~ gleich	Abnahme	Abnahme
	Kurz-LB	Abnahme	~ gleich	Abnahme
Ar + He	Sprüh-LB	~ gleich	~ gleich	Zunahme
	Kurz-LB	~ gleich	~ gleich	Abnahme

5.3.7 Berechnete 2D-Temperaturverteilungen in MSG-Sprühlichtbögen

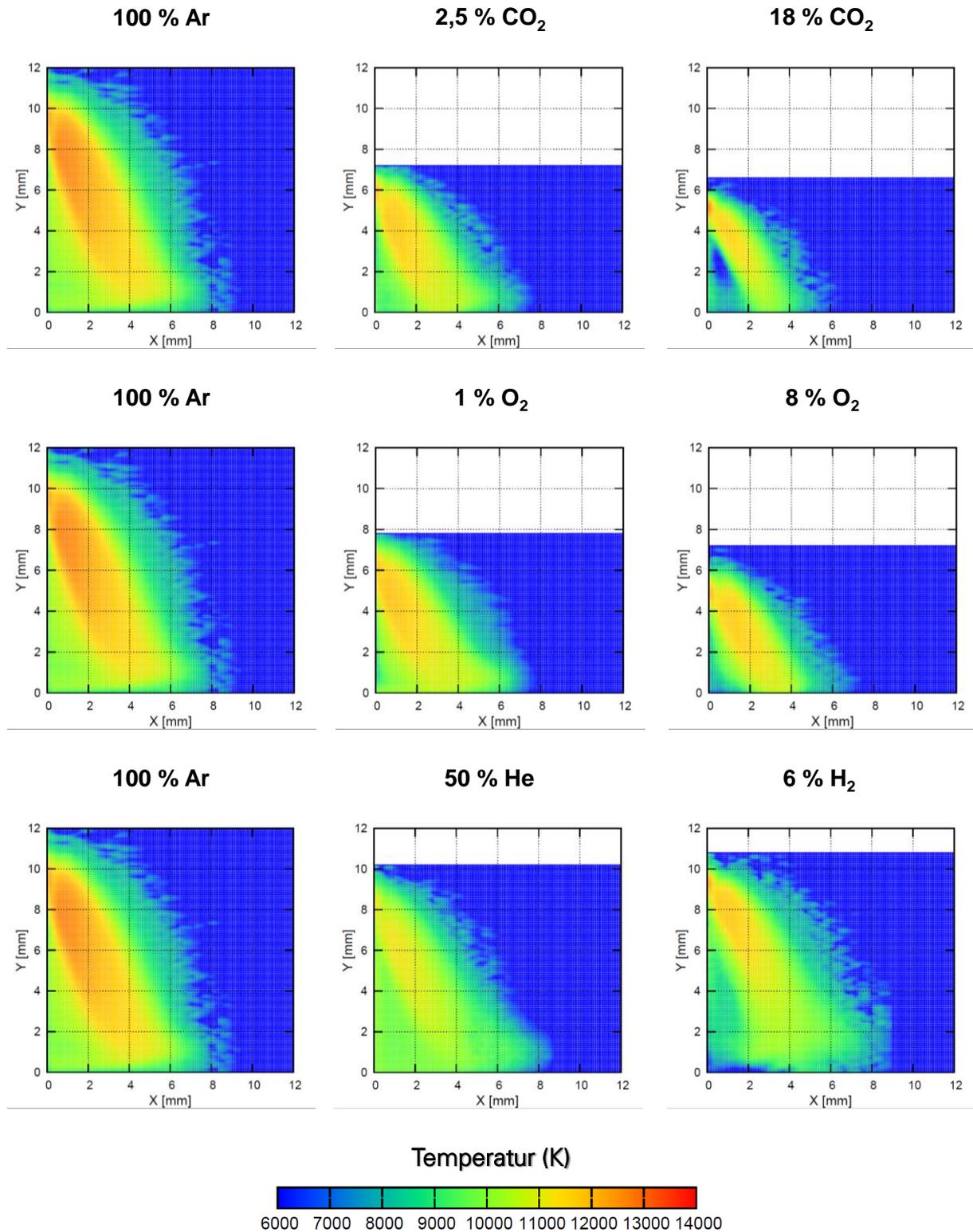


Abbildung 5.20: 2D-Temperaturverteilung im MSG-Lichtbogen für unterschiedliche Zumi- schungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

5.4 Einfluss der Schutzgase auf das Schweißergebnis

Die prinzipielle Wirkung der Schutzgaszusammensetzung auf das Schweißergebnis ist bekannt [Dil2006]. Eine eindeutige Beschreibung der Ursache-Wirkungszusammenhänge ist jedoch bisher nur bedingt möglich, da die Bewertung des Schutzgaseinflusses durch die Überlagerung verschiedener physikalischer Einflussfaktoren erschwert wird. Im Folgenden soll der Einfluss daher speziell im Hinblick auf die bereits beschriebenen Erkenntnisse zum Werkstofftransfer und zu den Lichtbogeneigenschaften diskutiert werden. Zu diesem Zweck wurden für alle Schweißproben die Nahtkontur, die Schmelzlinie als auch die Form der Wärmeeinflusszone digitalisiert, vgl. Abbildung 5.21.

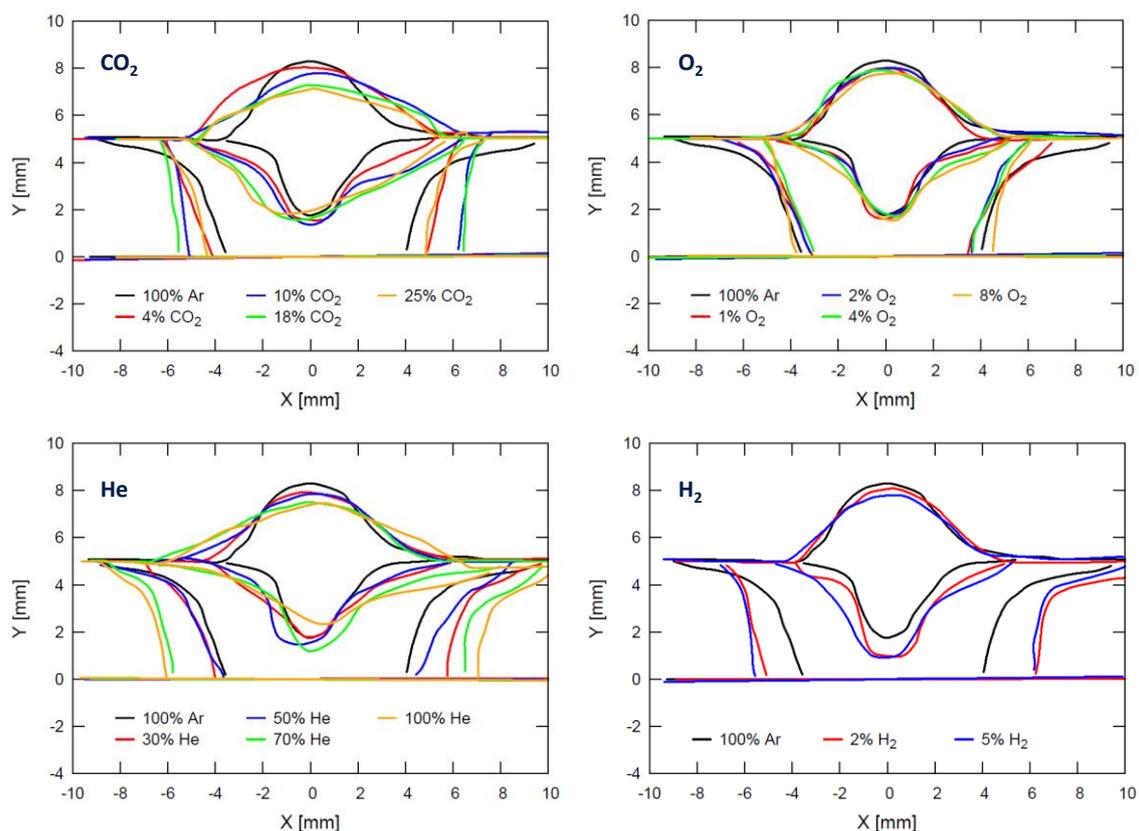


Abbildung 5.21: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Zur Beurteilung der Wärmeeinbringung in das Werkstück kann die Breite der Wärmeeinflusszone an der Werkstückoberfläche herangezogen werden. Wesentliche Änderungen in der Breite der Wärmeeinbringung ergeben sich durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Helium. Während Zumischungen von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff zu

einer Konzentration der Wärmeeinbringung führen, ist bei Zumischungen von Helium eine kontinuierliche Verbreiterung der Wärmeeinbringung zu beobachten, vgl. Abbildung 5.22.

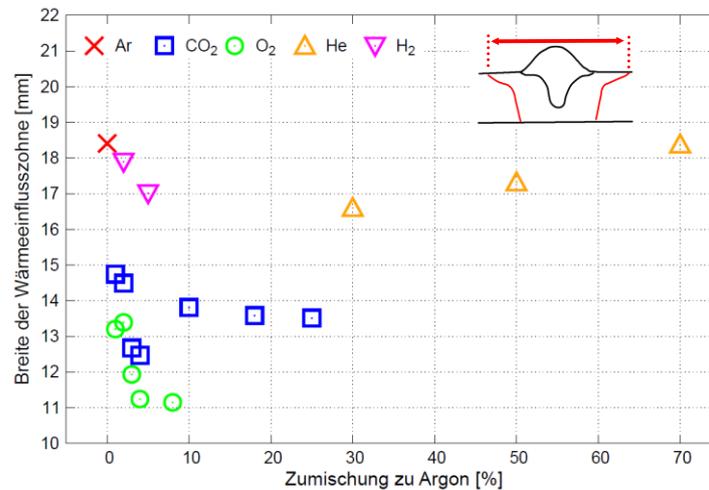


Abbildung 5.22: Breite der Wärmeeinflusszone für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Diese Beobachtungen korrelieren mit der Fokussierung des Lichtbogenansatzes am Werkstück durch Kohlenstoffdioxid- und Sauerstoffzumischungen sowie mit der Defokussierung des Lichtbogenansatzes durch Heliumzumischungen. In HG-Aufnahmen unter Verwendung einer Laserbeleuchtung kann die Fokussierung des Lichtbogens dokumentiert werden, vgl. Abbildung 5.23. Dabei zeigt sich, dass bereits bei vergleichsweise geringen Zumischungen von Kohlenstoffdioxid von 4 % eine Fokussierung des Lichtbogenansatzes am Werkstück erreicht werden kann.

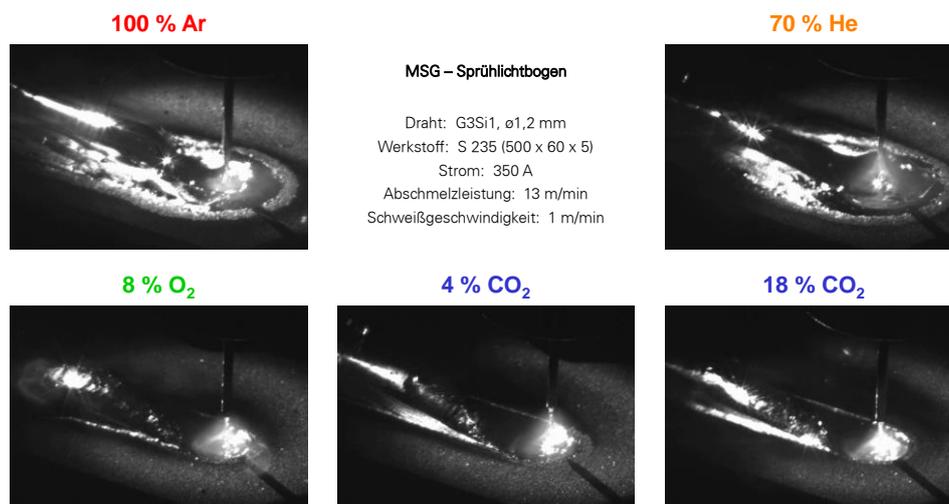


Abbildung 5.23: HG-Aufnahmen des Nahtaufbaus für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Ein weiterer Einfluss des Schutzgases betrifft die Einbrandform. Bei allen untersuchten Zumischungen von Sauerstoff und Wasserstoff als auch bei Zumischungen von Kohlenstoffdioxid unterhalb von 18 % ergibt sich der sogenannte Argonfinger, ein Einbrandprofil dessen Tiefe in der Mitte der Schweißnaht deutlich größer ist als im Randbereich. Erst bei höheren Zumischungen von Kohlenstoffdioxid (größer 10 %) bzw. einem Schutzgas aus 100 % Helium ändert sich die Einbrandform grundsätzlich. Die Einbrandtiefe in der Mitte der Schweißnaht nimmt ab und es ergibt sich ein linsenförmiges Einbrandprofil, vgl. Abbildung 5.24.

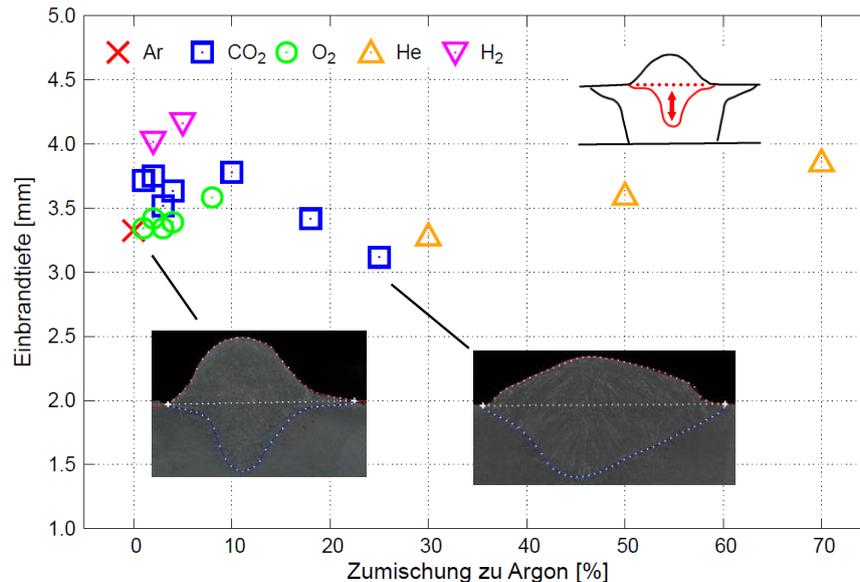


Abbildung 5.24: Einbrandtiefe für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Dieser Effekt lässt sich mit der Veränderung des Werkstoffübergangs erklären. Während der Werkstoffübergang bei allen untersuchten Zumischungen von Sauerstoff, Helium und Wasserstoff sowie bei Zumischungen von Kohlenstoffdioxid unterhalb von 10 % näherungsweise symmetrisch zur Achse der Drahtelektrode stattfindet, wird die Tropfenablösung bei Zumischungen oberhalb von 10 % Kohlenstoffdioxid mehr und mehr unsymmetrisch.

Der Argonfinger wird demnach durch einen symmetrischen Werkstoffübergang und der daraus resultierenden geringen Eintrittsfläche der Tropfen am Schmelzbad bedingt und kann durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oberhalb von 10 % vermieden werden.

Bezüglich der Nahtform fällt vor allem die Verringerung der Nahthöhe und Verbreiterung der Naht durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid und Helium auf, vgl. Abbildung 5.25. Im Falle der Heliumzumischung wird dieser Effekt durch die Verbreiterung der Wärmeeinbrin-

gung in das Werkstück und der daraus resultierenden verbesserten Benetzung verstärkt. Des Weiteren führt der unsymmetrische Werkstoffübergang zu einer Verbreiterung der Naht.

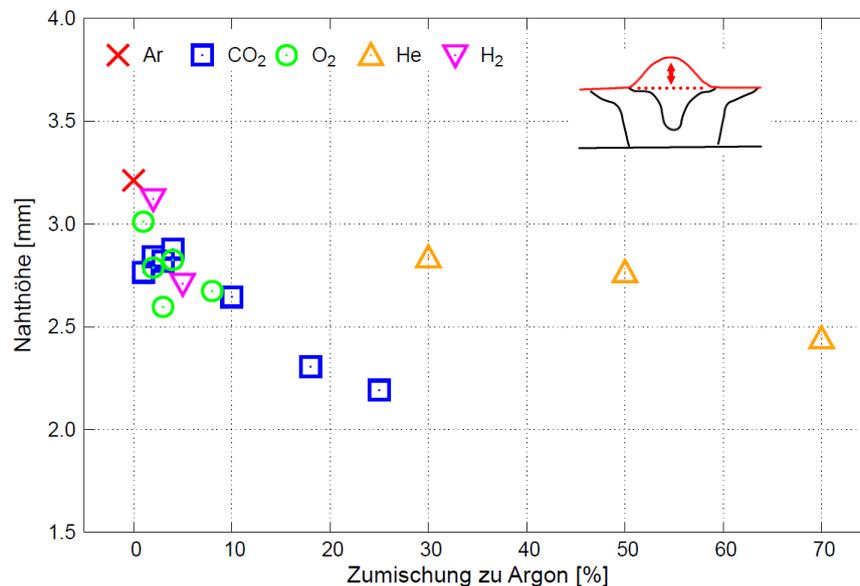


Abbildung 5.25: Nahthöhe für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Der Einfluss der Schutzgase auf die Wärmeeinbringung in das Werkstück (verursacht sowohl durch den Werkstoffübergang als auch durch den Lichtbogen) lässt sich durch die Bilanzierung der aufgeschmolzenen Fläche des Grundwerkstoffs bewerten, vgl. Abbildung 5.26 oben. Dabei ist festzustellen, dass bereits durch geringe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Wasserstoff zu Argon eine drastische Steigerung des Aufschmelzgrades erreicht werden kann. Bei Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oberhalb von 18 % nimmt die Schmelzfläche des Grundwerkstoffs wieder ab.

In Abhängigkeit der Schutzgaszusammensetzung ändern sich ebenfalls der Wirkungsgrad des Lichtbogens bzw. die Effektivität der Energieeinbringung. In Bezug auf die notwendige elektrische Energie des Schweißprozesses und die aufgeschmolzene Querschnittsfläche ergibt sich für eine Zumischung von ca. 18 % Kohlenstoffdioxid die geringste spezifische Aufschmelzleistung für die untersuchten Zumischungen, vgl. Abbildung 5.26 unten. Der Wirkungsgrad des Lichtbogens ist folglich am größten. Durch geringe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Wasserstoff kann die spezifische Aufschmelzleistung maßgeblich verringert werden.

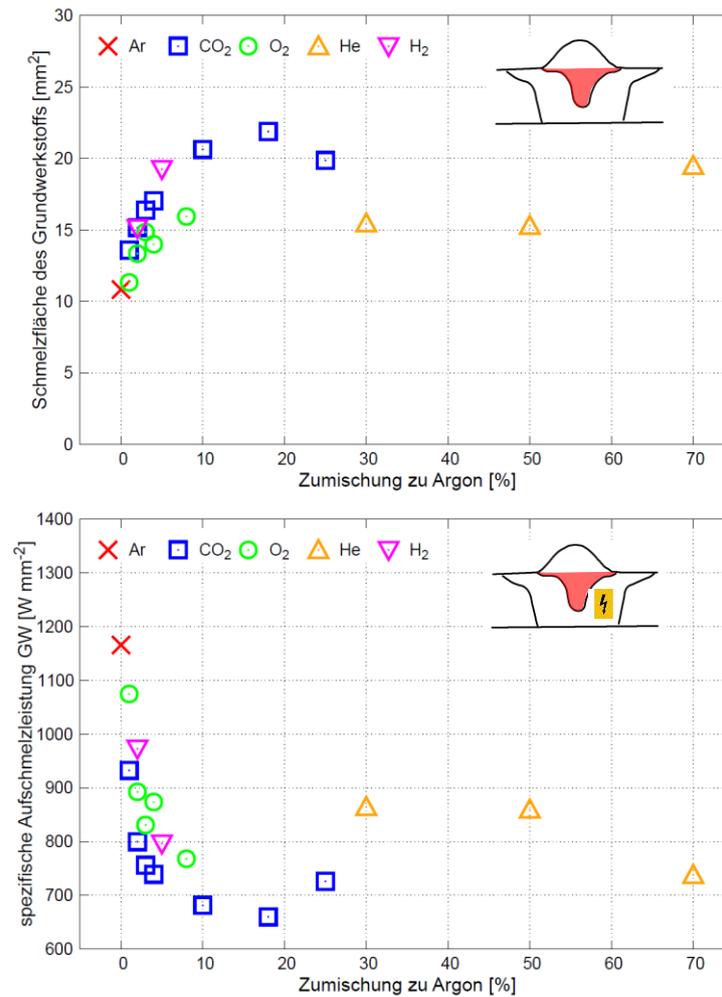


Abbildung 5.26: Aufgeschmolzene Fläche des Grundwerkstoffs (oben) und elektrische Leistung bezogen auf die aufgeschmolzene Fläche des Grundwerkstoffs (unten) für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Die Ergebnisse verdeutlichen den dominanten Einfluss von Kohlenstoffdioxid im Schutzgas. Dieser Effekt wird auch bei der Bewertung der dreikomponentigen Schutzgasmischungen deutlich. In Analogie zu den Aussagen bezüglich der Symmetrie des Werkstoffübergangs ist auch hier eine Verbreiterung der Einbrandprofils oberhalb einer Zumischung von 10 % Kohlenstoffdioxid zu beobachten, vgl. Abbildung 5.27. Bei der Beurteilung der Breite der Wärmeeinflusszone ist eine deutliche Verringerung durch zusätzliche Beimischungen von Sauerstoff zu Argon und Kohlenstoffdioxid zu beobachten, vgl. Abbildung 5.27 links.

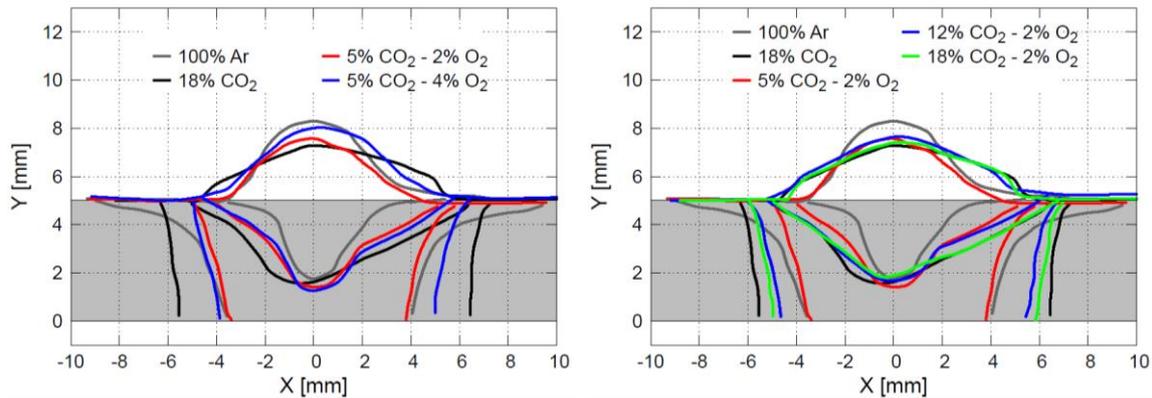


Abbildung 5.27: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für dreikomponentige Schutzgase aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Argon im Vergleich zu ein- und zweikomponentigen Schutzgasmischungen aus Argon und Kohlenstoffdioxid

Zumischungen von Helium zu Argon-Kohlenstoffdioxid-Schutzgasmischungen führen wiederum zu einer Verbreiterung der Wärmeeinflusszone und demnach zu einer Defokussierung des Lichtbogenansatzes am Werkstück, vgl. Abbildung 5.28.

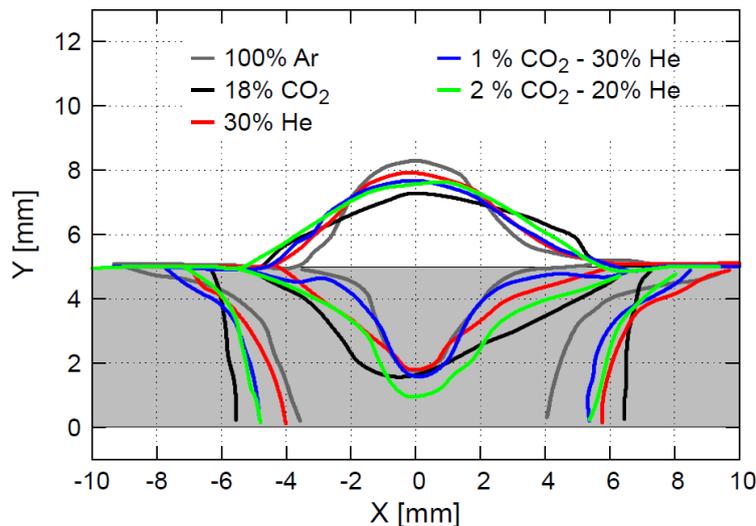


Abbildung 5.28: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für dreikomponentige Schutzgase aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Argon im Vergleich zu ein- und zweikomponentigen Schutzgasmischungen aus Argon O und Kohlenstoffdioxid

6 Numerische Untersuchungen zur Wirkungsweise der Gase

6.1 Verwendetes Modell des MSG-Lichtbogens

Neben der Auswertung der HG-Aufnahmen und der Makroschliffe wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Schutzgaskomponenten auf die Eigenschaften des Lichtbogens zu bestimmen. Speziell die Ursache-Wirkungszusammenhänge einzelner Schutzgaskomponenten sowie die Wärme- und Kraftwirkung des Lichtbogens auf die Elektroden wurde analysiert. Analog zu den experimentellen Untersuchungen wurden Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon untersucht. Zur Erhöhung der Aussagefähigkeit des numerischen Modells wurden Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der mittleren Form der Drahtelektrode und des Metaldampfkerns genutzt.

Grundlage der numerischen Untersuchungen bildet ein rotationssymmetrisches Lichtbogenmodell, in welchem neben dem Strömungsraum die Drahtelektrode, die Schutzgasdüse als auch das Werkstück als Festkörper abgebildet werden, vgl. Abbildung 6.1. In dem verwendeten stationären Modell wird der Werkstoffübergang vernachlässigt und zeitlich konstante Elektrodenformen angenommen, was bei stabilen Sprühlichtbogenprozessen gerechtfertigt ist. Die sich bildenden Tropfen werden ebenfalls vernachlässigt. Die Form der Drahtelektrode wurde in Abhängigkeit der betrachteten Schutzgaszusammensetzung und unter der Annahme einer Rotationsymmetrie aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen rekonstruiert, vgl. Abbildung 5.4. Das Werkstück wurde vereinfachend als eben angenommen.

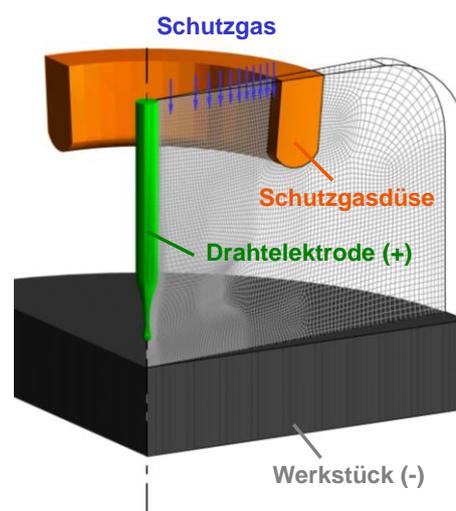


Abbildung 6.1: Berechnungsgebiet des numerischen Lichtbogenmodells

Aus früheren numerischen Untersuchungen ist bekannt, dass die erhöhte Strahlungsemission des Metaldampfes im MSG-Lichtbogen einen dominanten Einfluss auf die Lichtbogeneigenschaften besitzt [Sch2009]. Metaldampf entsteht beim MSG-Schweißen im Wesentlichen an der schmelzflüssigen Drahtelektrode infolge der Wärmewirkung des Lichtbogens. In Abhängigkeit der Schweißdrahtzusammensetzung und der Drahttemperatur können verschiedene Metaldämpfe, bei Baustahl insbesondere Eisen, Mangan und Silizium, entstehen. Aufgrund des verwendeten niedrig legierten Zusatzwerkstoffs G3Si1 wird im Modell vereinfachend angenommen, dass ausschließlich Eisen an der Drahtelektrode entsteht. Die thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase wurden unter der Annahme des lokalen thermodynamischen Gleichgewichts berechnet. Die Eigenschaften sind sowohl von der Temperatur als auch vom Anteil des Eisendampfes im Schutzgas abhängig, vgl. Kapitel 6.2.

Durch das stationäre Modell kann die für die Verdampfung maßgebliche Temperaturverteilung der Drahtoberfläche nicht berechnet werden. Aus diesem Grund wurde die Temperaturverteilung analytisch vorgegeben und iterativ solange angepasst, bis die numerisch berechnete Form des Eisendampfkerns mit den experimentellen Beobachtungen des hell leuchtenden Metaldampfkerns übereinstimmte. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist unter anderem in [Sch2009] und [Her2012] zu finden.

6.2 Thermophysikalische Eigenschaften der MSG-Schutzgase

Es wurden Plasmazusammensetzungsrechnungen zur freien Energie in Abhängigkeit von den möglichen Zuständen der Spezies, sowie den möglichen Stoßprozessen und Minimierungen durchgeführt. Die thermophysikalischen Größen wie Dichten der Spezies und die spezifische Wärme, sowie Transportkoeffizienten wie Viskosität, thermische und elektrische Leitfähigkeit wurden in Abhängigkeit von Druck und Temperatur berechnet. Notwendig waren des Weiteren die Lösung der kinetischen Gleichungen für die Geschwindigkeitsverteilung, Störung der Gleichgewichtsverteilung, Entwicklung der Stoßintegrale und Ableitung von Diffusionsgeschwindigkeiten und Diffusionskoeffizienten.

Für die Mischgase kommt hinzu, dass zwar die Transporteigenschaften für einkomponentige Gase bekannt sind, aber Daten erforderlich sind, die die Gasmischung mit Metaldampfanteil berücksichtigen. Die Anwendung von Mischungsregeln hat nur begrenzte Gültigkeit für physikalisch ähnliche Komponenten. Deshalb wurden am INP die oben genannten Neuberechnungen durchgeführt. Dies wurde für insgesamt 450 Mischungen getan.

Diese umfassen Gasgemische aus Ar, He, CO₂, O₂ und H₂ mit variierendem Eisenanteil. Die Transporteigenschaften für einkomponentige Gase zeigen eine gute Übereinstimmung mit

den aus der Literatur bekannten Daten. Für die Mehrkomponenten-Gasgemische wurden die physikalischen Eigenschaften der Schweißprozessgase für den Temperaturbereich bis zu 30 000 K und in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung und dem Eisengehalt notwendigen Daten der Stoßwechselwirkungen zwischen den Atomen, Molekülen, Ionen und Elektronen mit Hilfe von entsprechenden Berechnungsroutinen – Minimierung der freien Energie zur Bestimmung der Zusammensetzungen und der spezifischen Wärmekapazität sowie Chapman-Enskog-Methode zur Berechnung der Transporteigenschaften, Murphy-Formalismus für Diffusionskoeffiziente in mehrkomponentigen Gasgemischen – gewonnen.

Die Berechnungen wurden für folgende Mischungen durchgeführt:

- Ar+ x% CO₂ + y% Fe (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 10, 18, 100)
- Ar+ x% O₂ + y% Fe (x=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 8)
- Ar+ x% H₂ + y% Fe (x=1, 2, 5)
- Ar+ x% He + y% Fe (x=30, 50, 70, 100)
- Ar+30%He +10%CO₂ +y%Fe,
- Ar+26,5%He +8%CO₂ +0.5%O₂ +y%Fe

y=0, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99, 100

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen aus direkten Berechnungen und den Abschätzungen der Mischgaseigenschaften (thermophysikalischen Daten und Transportparameter) aus den molaren bzw. massebezogenen Anteilen der Komponenten zeigt deutliche Abweichungen in den Datensätzen. Insbesondere für physikalisch ähnliche Komponenten ist die Gültigkeit der Mischregeln stark begrenzt.

In Abbildung 6.2 sind die thermischen und elektrischen Leitfähigkeiten für Ar-CO₂-Fe-Gemische dargestellt. Die Daten zeigen im untersuchten Temperatur bis 30000 K eine stärkere Sensitivität der Leitfähigkeiten bei Variation des Metalldampfes als bei Variation des CO₂-Anteils.

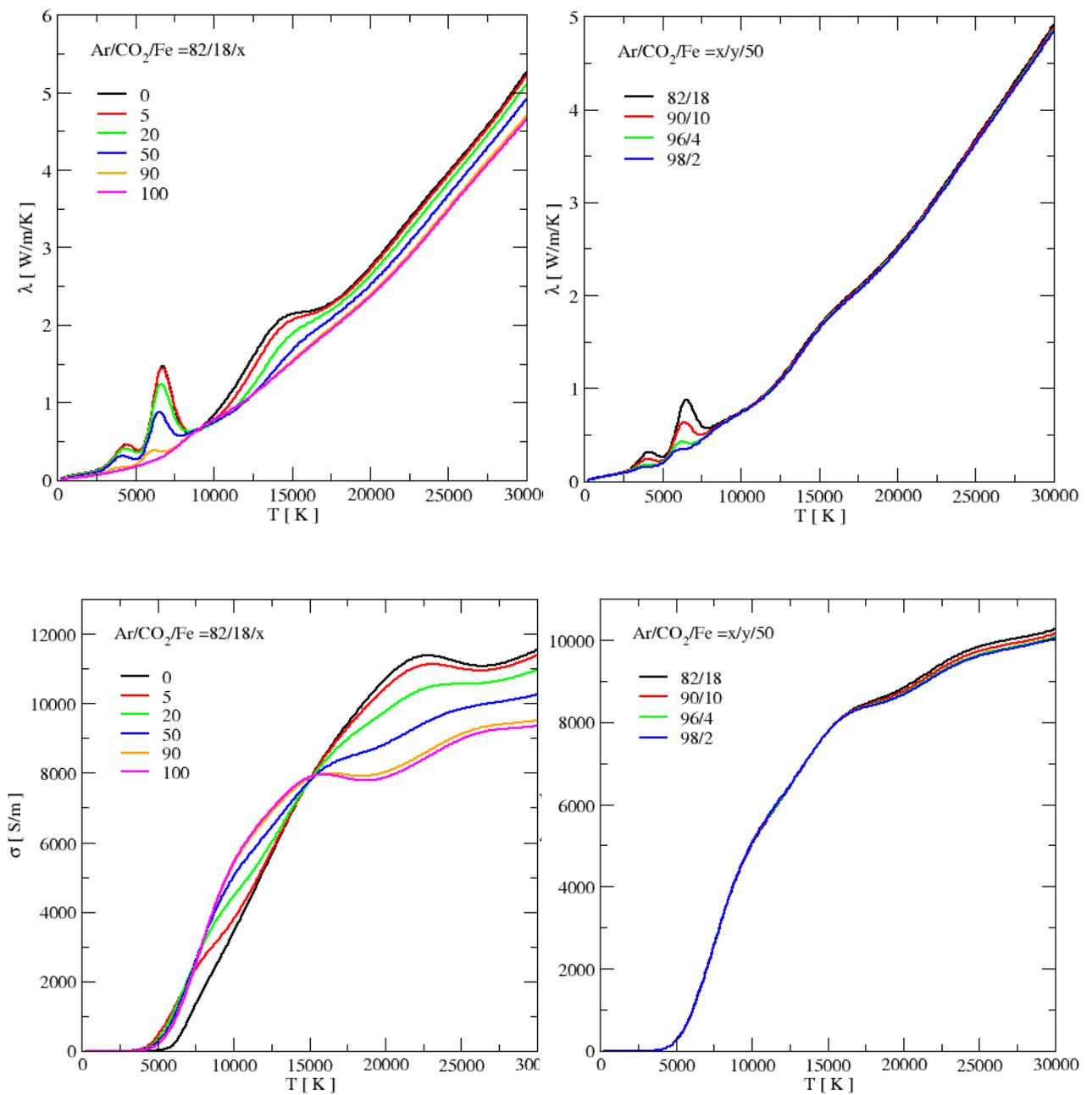


Abbildung 6.2: Temperaturabhängige thermische (oben) und elektrische (unten) Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des Metaldampfanteils (links) und des CO_2 -Anteils (rechts)

6.3 Validierung des MSG-Lichtbogenmodells und Einfluss von CO₂

Das verwendete MSG-Lichtbogenmodell wurde bereits im Rahmen des DFG / AiF Forschungsclusters Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug durch Schnick [Schn2010] an Sprühlichtbögen und durch Hertel [Her2012] an Impulslichtbögen in der Hochstromphase validiert. Für diesen Zweck wurden berechnete radiale Temperatur- und Eisenprofile mit entsprechenden OES-Messungen an identischen Prozessen von Rouffet [Rou2010] und Zielińska [Zie2007] verglichen. Es zeigten sich sehr gute Übereinstimmungen. Speziell das lokale Minimum in der radialen Temperaturverteilung in der Bogenachse kann durch die Berücksichtigung des Metaldampfes im Modells nachvollzogen werden.

In diesen vorangegangenen Validierungen des MSG-Lichtbogenmodells wurde jedoch stets von einem Schutzgas aus 100 % Argon ausgegangen. Im Rahmen des Projekts wurde die Datenbasis des MSG-Lichtbogenmodells hinsichtlich der zugrundeliegenden Schutzgase erweitert. Aus diesem Grund wurde die Aussagefähigkeit des Modells erneut überprüft. Als Vergleichsbasis wurden verschiedene OES-Messungen am INP Greifswald mit unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen durchgeführt.

Die durch OES-Messungen bestimmten Temperaturprofile zeigen, dass Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu einer Kontraktion des Lichtbogens führen. Deutlich wird dieser Effekt an der Kontraktion der Temperaturprofile, vgl. Abbildung 6.3 rechts. Durch das MSG-Lichtbogenmodell kann dieser Effekt ebenfalls abgebildet werden. Der Vergleich mit den berechneten Temperaturprofilen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

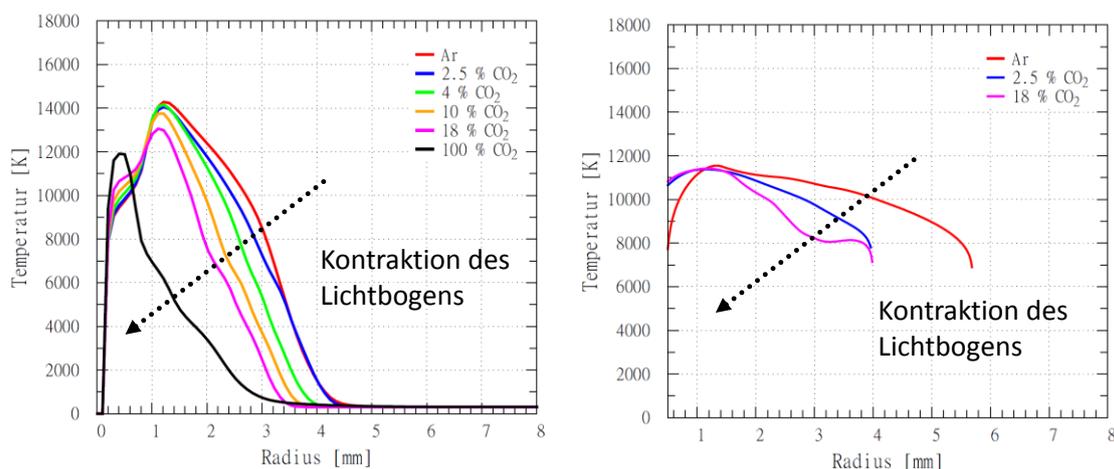


Abbildung 6.3: Durch numerische Simulation berechnete (links) und durch OES-Messungen bestimmte (rechts) radiale Temperaturprofile 3 mm oberhalb des Werkstücks für unterschiedliche Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon

Um den Einfluss der Lichtbogenkontraktion durch Kohlenstoffdioxid-Zumischungen nachzuvollziehen, wurden numerische Sensitivanalysen durchgeführt. Durch das Modell können die Auswirkungen einzelner thermophysikalischer Eigenschaften der Schutzgaskomponenten nachvollzogen werden.

Abbildung 6.4 zeigt exemplarisch den Einfluss der inneren Energie und der thermischen Leitfähigkeit von Kohlenstoffdioxid auf die Struktur und die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens. Im Modell wurden aus diesem Grund fiktive Schutzgasgemische definiert, welche ausschließlich die innere Energie bzw. die thermische Leitfähigkeit des Kohlenstoffdioxids berücksichtigen. Alle weiteren Eigenschaften wurden vom Basisgas Argon übernommen.

Es zeigt sich, dass insbesondere die erhöhte inneren Energie des Kohlenstoffdioxids gegenüber Argon infolge der Dissoziationsvorgänge maßgeblich verantwortlich für die Kontraktion des Lichtbogens an der Drahtelektrode ist.

Die erhöhte thermische Leitfähigkeit des Kohlenstoffdioxids, welche häufig in der Literatur als Grund für die Fokussierung des Lichtbogens benannt wird, bewirkt den gegenteiligen Effekt: eine Defokussierung des Lichtbogens.

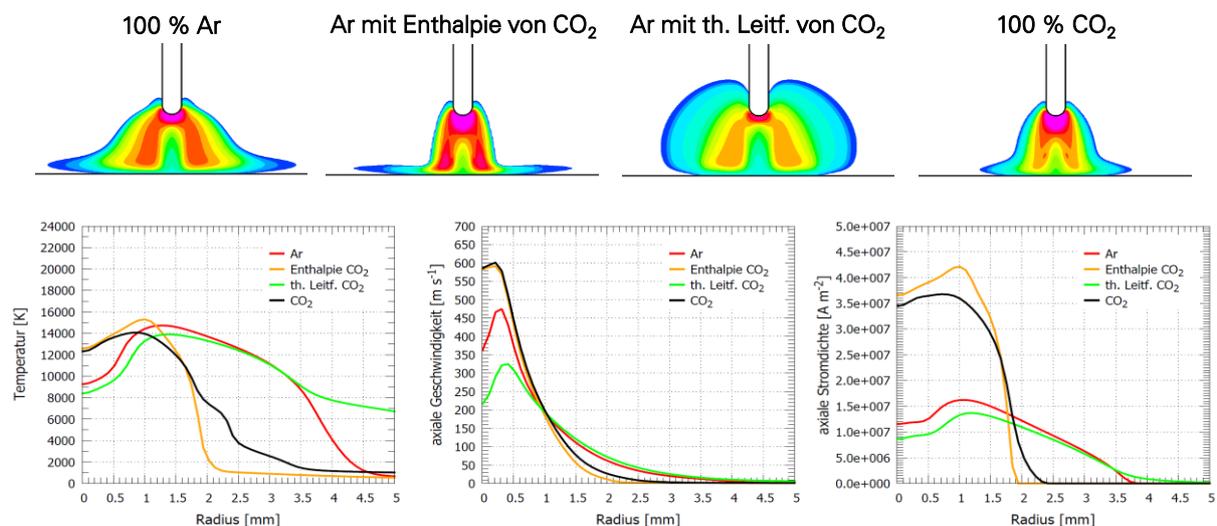


Abbildung 6.4: Einfluss von Kohlenstoffdioxid im Schutzgas auf die Struktur und die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens

6.4 Struktur des MSG-Sprühlichtbogens

Bevor im Folgenden näher auf die Einflussnahme der Schutzgase eingegangen wird, ist es sinnvoll, die Struktur des MSG-Lichtbogens an einem Beispiel im Detail zu diskutieren. Für

diesen Zweck wird eine typische Drahtgeometrie im numerischen Modell verwendet, wie sie in Schweißversuchen unter einem Schutzgas aus 100 % Argon beobachtet werden kann. Die Prozessrandbedingungen entsprechen dabei den in Tabelle 5.1 angegebenen Prozessparametern. Das Temperaturprofil in der Drahtelektrode wird analytisch vorgegeben und setzt sich aus einem konstanten Anteil im Bereich der Drahtspitze mit einer Temperatur von 3000 K und einem variablen Anteil oberhalb der Drahtspitze mit einem linearen Abfall der Temperatur auf 300 K zusammen. In Abbildung 6.5 sind die berechneten Verteilungen der Plasmatemperatur, des molaren Eisenanteils, der Strömungsgeschwindigkeit und der Druckverteilung im Sprühlichtbogen dargestellt. Im Hintergrund ist die berechnete Strahlungsemission des Lichtbogens in einer Grauschattierung dargestellt.

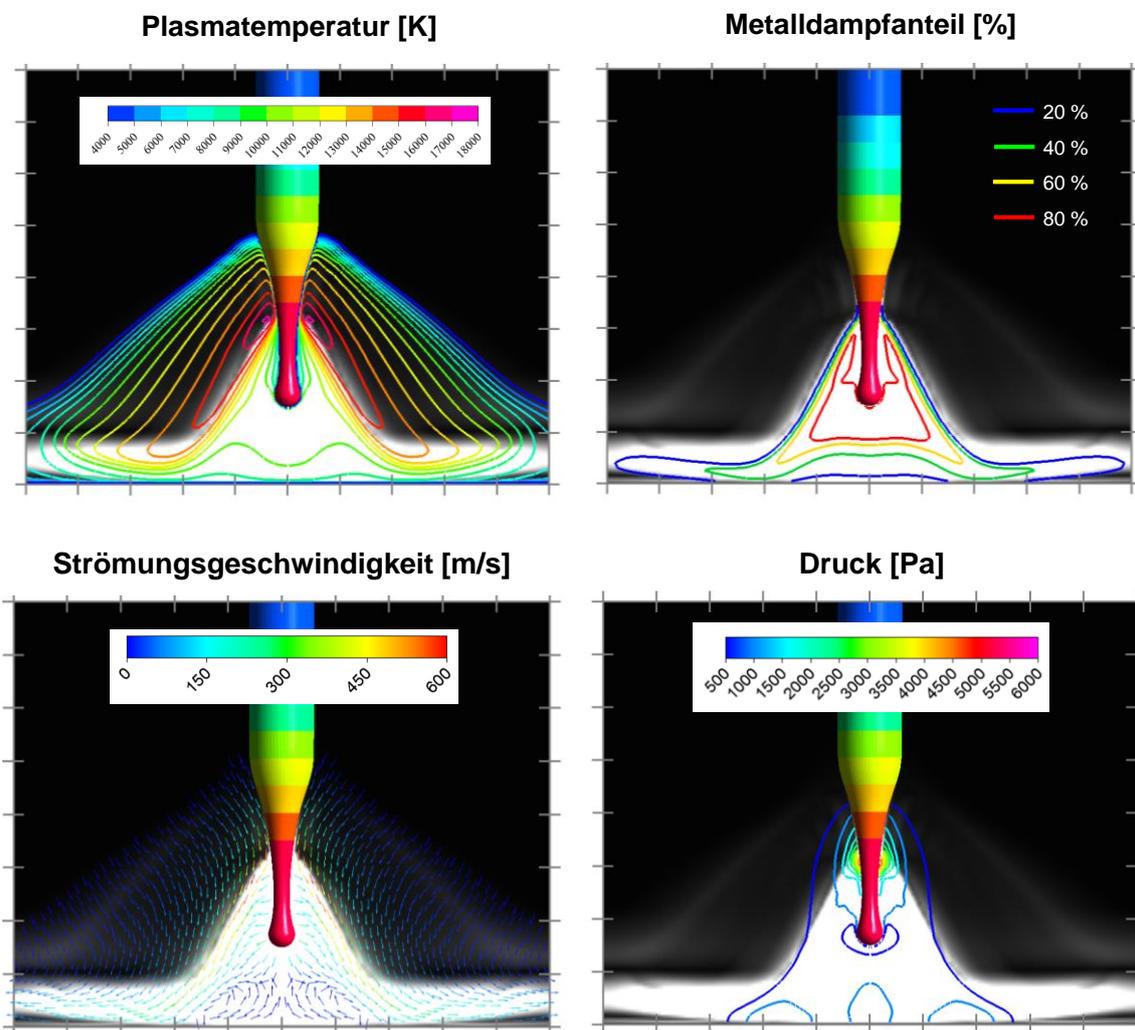


Abbildung 6.5: Berechnete Verteilungen der Plasmatemperatur (links oben), des molaren Eisenanteils (rechts oben), der Strömungsgeschwindigkeit (links unten) und der Druckverteilung (rechts unten) im Sprühlichtbogen, Hintergrund: Grauschattierung in Abhängigkeit der Strahlungsemission

Die Berechnungen verdeutlichen, dass die Strahlungsemission bereits bei geringen Anteilen von Eisen drastisch erhöht wird und aufgrund des hohen Energieverlustes im metaldampfdominierten Lichtbogenkern zur Ausbildung eines radialen Temperaturminimums in der Bogenachse führt. Die starke Abgrenzung des Eisenkerns resultiert aus den Entmischungsvorgänge innerhalb des Plasmas, in welchen leichter ionisierbare Teilchen (in diesem Falle Eisen) das Bestreben haben, sich in Bereichen mit niedrigeren Temperaturen anzureichern [Fri1963].

Durch die hohen Strahlungsverluste im Lichtbogenkern verändert sich der Stromfluss im Lichtbogen maßgeblich. Der größte Teil des Stroms fließt über den von Argon dominierten Randbereich des Lichtbogens, da dieser aufgrund der höheren Plasmatemperatur eine höhere elektrische Leitfähigkeit aufweist (siehe nachfolgenden Gliederungspunkt). Aus diesem Grund sind die elektromagnetischen Kräfte und die daraus resultierenden Geschwindigkeiten im Randbereich größer. Im Kern des Lichtbogens führt die verminderte elektromagnetische Kraft zur Ausbildung einer Rückströmung.

Besonders interessant ist die Druckverteilung an den Elektroden. Die größte Druckwirkung wird nicht in der Achse des Lichtbogens berechnet, wie es z. B. bei einem WIG-Lichtbogen der Fall ist [Füs2010], sondern an dem Punkt am Umfang der Drahtelektrode, an dem die Verdampfung einsetzt. Die resultierende Kraftwirkung führt im Falle einer ungleichförmigen Verdampfung über den Drahtumfang zur Auslenkung des Unduloids und kann in HG-Aufnahmen beobachtet werden. Zusätzlich ergibt sich eine Kraftwirkung an der Unterseite der Drahtelektrode, welche wesentlich vom Ansatz des Lichtbogens am Draht bestimmt wird und zur Deformation des Unduloids führt.

Je konzentrierter der Lichtbogen an der Drahtelektrode ansetzt, desto größer ist die Kraftwirkung an der Unterseite der Drahtelektrode und folglich die Deformation.

6.5 Unmittelbare und mittelbare Einflüsse der Schutzgase auf die Lichtbogeneigenschaften

Die Bilanzierung der direkten Einflussnahme der Schutzgase auf die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens wird durch die starke Verkettung der unterschiedlichen Prozesseinflussgrößen erschwert. Die Schutzgaskomponenten besitzen dabei einen unmittelbaren und einen mittelbaren Einfluss auf die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens. Während unmittelbare Einflüsse auf den Prozess direkt aus den thermophysikalischen Eigenschaften des Schutzgasmischunges resultieren, lassen sich mittelbare Einflüsse nur indirekt auf einzelne Eigenschaften des Schutzgases zurückführen.

Beispiele für unmittelbare Einflüsse des Schutzgases auf die Lichtbogeneigenschaften sind die Erhöhung der Wärmeeinbringung infolge der erhöhten thermischen Leitfähigkeit des Schutzgases, bspw. durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid bzw. Helium, oder die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit im Lichtbogen durch die erhöhte dynamische Viskosität des Schutzgases infolge der Zumischung von Helium.

Ein Beispiel für einen mittelbaren Einfluss ergibt sich durch die vom Schutzgas beeinflusste Metallverdampfung und dem daraus resultierenden Metalldampfanteil im Lichtbogen. Durch die erhöhte thermische Leitfähigkeit an den Elektrodenoberflächen von Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Helium gegenüber Argon steigt die Wärmeeinbringung in die Drahtelektrode und damit die Metallverdampfung an. Durch die Erhöhung des Metalldampfanteils im Lichtbogen ändern sich die Lichtbogeneigenschaften, wie z. B. der Strompfad oder die Strömungsgeschwindigkeit, drastisch. Die Änderung der Lichtbogeneigenschaften wird aber nicht durch die thermophysikalischen Eigenschaften des Schutzgases, sondern durch die Eigenschaften des Metalldampfes bestimmt. Unter Umständen kann der mittelbare Einfluss durch Metalldampf größer sein als der unmittelbare Einfluss durch die thermophysikalischen Eigenschaften des Schutzgases.

Um die unmittelbaren und mittelbaren Einflüsse der Schutzgase auf den MSG-Prozess besser zu verstehen, ist es sinnvoll, die unterschiedlichen Prozesseinflussgrößen getrennt voneinander zu untersuchen. So wird der Strompfad im Lichtbogen zum einen durch die Form der Drahtelektrode und zum anderen durch die thermophysikalischen Eigenschaften des Metalldampf-Schutzgas-Gemisches bestimmt. Die Trennung dieser Effekte ist durch die Anwendung der numerischen Simulation möglich. Die numerischen Untersuchungen wurden aus diesem Grund in drei Schritten vorgenommen:

- I. Einfluss der thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase (unterschiedliche Schutzgaszusammensetzung, gleiche Temperaturverteilung in der Drahtelektrode, konstante Form der Elektroden)
- II. Einfluss der Verdampfungsrate an der Drahtelektrode (unterschiedliche Schutzgaszusammensetzung, unterschiedliche Temperaturverteilung in der Drahtelektrode, konstante Form der Elektroden)
- III. Berücksichtigung der thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase und der veränderten Verdampfungsrate und Elektrodenformen (unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen, Abschätzung der Temperaturverteilung in der Drahtelektrode durch Abgleich des Metalldampfkerne, Verwendung der Elektrodenformen aus den experimentellen Untersuchungen)

Durch diese Vorgehensweise können die Einflüsse der thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase, die Auswirkungen der veränderlichen Metallverdampfung und Elektrodenformung getrennt voneinander untersucht werden.

I. Einfluss der thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase

Durch die Zumischung von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon werden die thermophysikalischen Eigenschaften des Schutzgasgemisches verändert. Während die thermische Leitfähigkeit wesentlich die Wärmeeinbringung in die Elektroden bestimmt, wird der Strompfad im Lichtbogen, der Lichtbogenansatz und damit die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Kraftwirkung auf die Elektroden durch die elektrische Leitfähigkeit beeinflusst. Neben dem unmittelbaren Einfluss durch die gezielte Mischung des Schutzgases existiert jedoch auch ein mittelbarer Einfluss durch den Metaldampf im Lichtbogen. Die thermische und elektrische Leitfähigkeit von 100 % Argon im Vergleich zu 100 % Eisen und typischen binären Mischungen aus Argon und Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff sind in Abbildung 6.6 im für den MSG-Lichtbogen relevanten Temperaturbereich bis 15 000 K dargestellt. Es wird deutlich, dass im Gegensatz zur häufig benannten These, dass die thermische und elektrische Leitfähigkeit ähnliche Verhältnisse aufweisen, ein deutlicher Unterschied in den Verläufen zu erkennen ist.

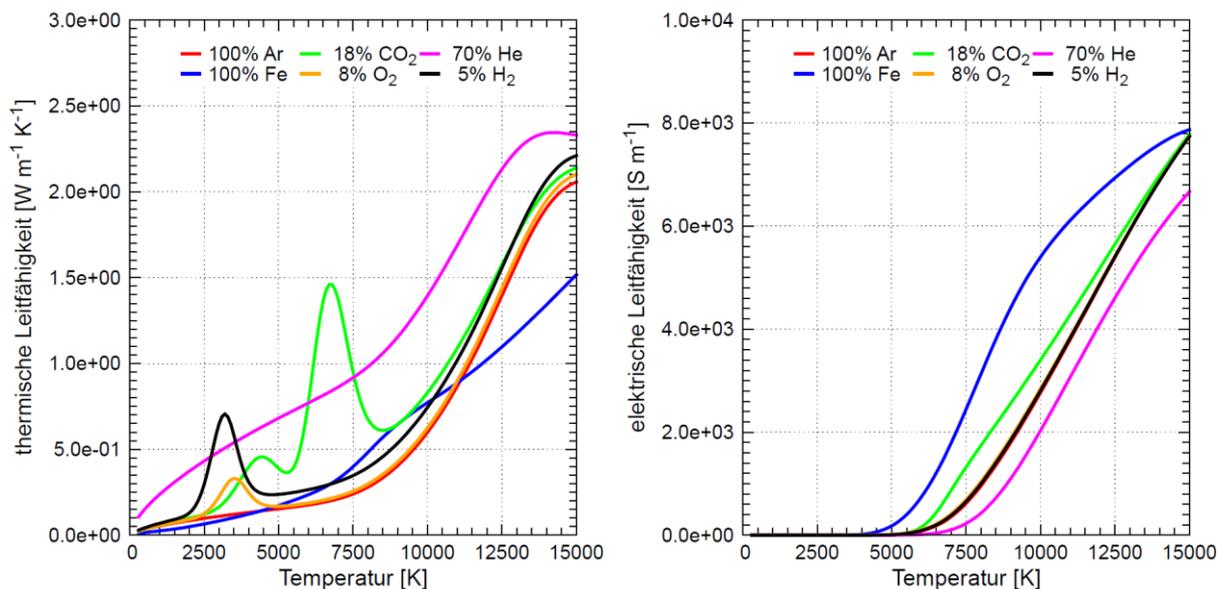


Abbildung 6.6: Thermische und elektrische Leitfähigkeit von 100 % Argon und 100 % Eisen im Vergleich zu binären Mischungen aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Für die thermische Leitfähigkeit sind zwei Temperaturbereiche besonders interessant - zum einen der niedrige Temperaturbereich zwischen 2000 K und 3000 K, der in den elektrodennahen Gebieten vorherrscht und maßgeblich die Wärmeeinbringung in die Elektroden bestimmt. Die thermische Leitfähigkeit in diesen Bereichen kann durch die Zumischung von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff maßgeblich gesteigert werden. Zum anderen der Temperaturbereich zwischen 8000 K und 15 000 K, welcher dem Lichtbogenrandbereich zuzuordnen ist und maßgeblich die Wärmeleitung aus dem Lichtbogen in die elektrodennahen Schichten bestimmt. Eine wesentliche Steigerung der thermischen Leitfähigkeit in diesem Bereich ist ausschließlich durch die Zumischung von Helium möglich.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit fällt vor allem die erhöhte Leitfähigkeit des Eisens gegenüber allen Schutzgaskomponenten auf. Jedoch muss bei diesem Vergleich beachtet werden, dass in den Bereichen des Lichtbogen mit hoher Eisenkonzentration aufgrund des hohen Strahlungsverlustes des Eisen meist deutlich geringere Temperaturen (ca. 8000 K) vorherrschen. Dadurch ist der Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit zwischen dem Eisenkern und dem schutzgasdominierten Randbereich nur noch gering und nicht maßgeblich.

Besonders interessant für den Vergleich der unterschiedlichen Schutzgaszusammensetzungen ist sowohl die Wärmeeinbringung in die Elektroden, vgl. Abbildung 6.7 oben, als auch die Kraftwirkung auf die Elektrodenoberflächen (Lichtbogendruck), vgl. Abbildung 6.7 unten. Zur Darstellung des unmittelbaren Schutzgaseinflusses wurden in den numerischen Sensitivanalysen sowohl die Form der Elektroden als auch das Temperaturprofil in der Drahtelektrode konstant gehalten.

Im Hinblick auf die Wärmeeinbringung in die Elektroden sind gegenläufige Tendenzen für die Drahtelektrode und das Werkstück zu erkennen. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen dem Lichtbogen und den Elektroden und zum anderen an der Tatsache, dass an der Drahtelektrode die Verdampfung eine wesentliche Rolle spielt.

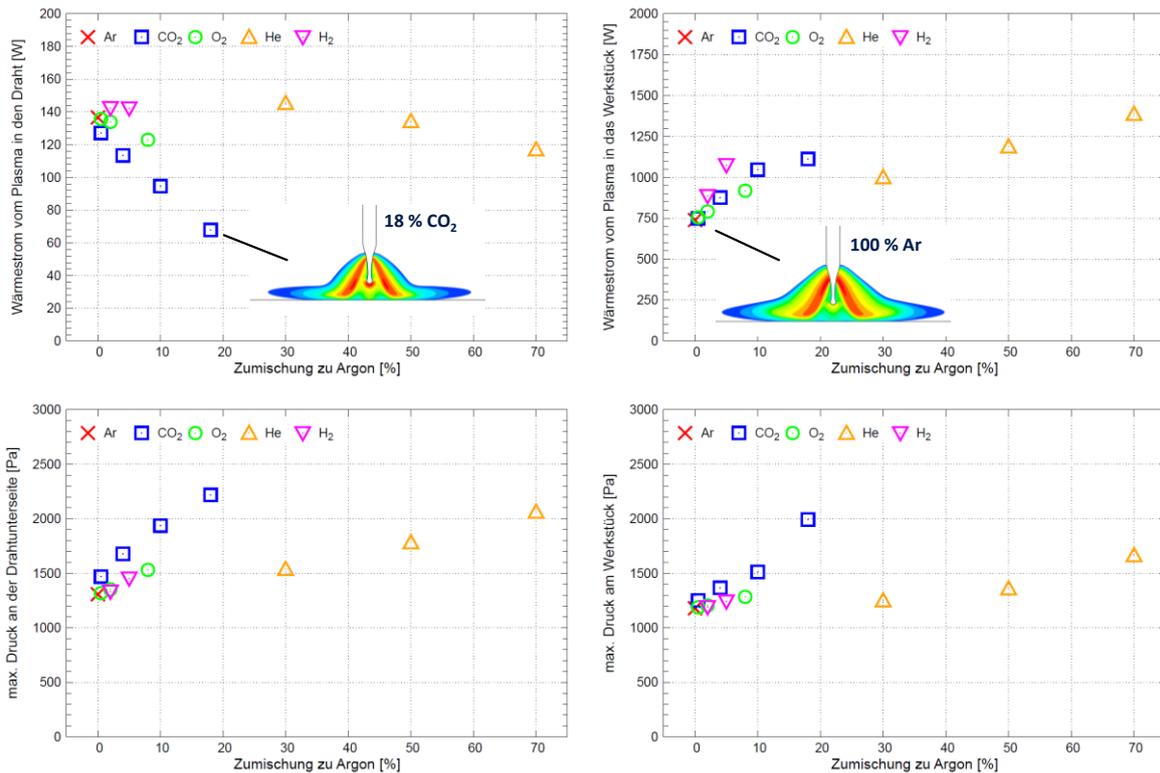


Abbildung 6.7: Berechneter Wärmestrom in die Drahtelektrode und in das Werkstück (oben) und maximaler Lichtbogendruck an der Drahtunterseite und auf der Werkstückoberfläche (unten) für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon

Abschließend wurde eine Bilanzierung des MSG-Prozesses hinsichtlich der umgesetzten Leistung durchgeführt, siehe Tabelle 6.1. Es wird deutlich, dass das Schutzgas nur einen sehr geringen unmittelbaren Einfluss der thermischen Leitfähigkeit auf die Wärmeeinbringung in den Draht bzw. die Abschmelzleistung ausübt (ca. 5 % der Gesamtleistung). Bezogen auf den Wärmeeintrag ins Bauteil ist mit 12 % des Gesamtumsatzes dagegen ein mittlerer unmittelbarer Einfluss festzustellen.

Tabelle 6.1: Energiebilanzen für die Drahtelektrode und das Werkstück für einen MSG-Sprühlichtbogenprozess mit 350 A unter 100 % Argon

Wärmestrom	Drahtelektrode	Werkstück
Fallgebietserwärmung	1575 W (70 %)	3950 W (76 %)
Wärmeleitung vom Lichtbogen	513 W (23 %)	641 W (12 %)
Wärmestrahlung vom Lichtbogen	100 W (5 %)	578 W (11 %)
Widerstandserwärmung	48 W (2 %)	2 W (0 %)
Gesamt	2236 W (100 %)	5171 W (100 %)

In der Abbildung 6.7 rechts oben wird deutlich, dass sich durch die Zumischung von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff vor allem die Wärmeeinbringung in das Werkstück steigern lässt. Die Wärmeeinbringung in die Drahtelektrode wird durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid sogar kleiner, da die Kontaktfläche zwischen Lichtbogen und Drahtelektrode infolge der Kontraktion des Lichtbogens kleiner wird.

Des Weiteren ist eine deutliche Steigerung der Kraftwirkung auf die Elektroden durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid und Helium zu beobachten. Da im Allgemeinen die Zumischungen von Helium im Schutzgas deutlich geringer sind, muss hier vor allem Kohlenstoffdioxid als wirksame Schutzgaskomponente zur Steigerung der Kraftwirkung des Lichtbogens benannt werden. Numerische Sensitivanalysen haben ergeben, dass hierfür die höhere innere Energie des Kohlenstoffdioxids verantwortlich ist und nicht, wie oft in der Literatur angegeben, die höhere thermische Leitfähigkeit des Kohlenstoffdioxids.

II. Einfluss der Verdampfungsrate an der Drahtelektrode

Wie in Abbildung 5.4 gezeigt, führen Zumischungen aller untersuchten Schutzgaskomponenten zu einer Erhöhung der Verdampfung und damit zu einer Zunahme des Metaldampfanteils im Lichtbogen. Durch numerische Sensitivanalysen wurde der Einfluss der Drahtverdampfung auf die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens analysiert, indem das Temperaturprofil in der Drahtelektrode verändert wurde. Die Form der Drahtelektrode wurde dabei nicht verändert. Die Verdampfung steigt maßgeblich mit der maximalen Temperatur in der Drahtspitze an. Besonders deutlich wird der Einfluss des Metaldampfes unter Verwendung von Drahtformen, wie sie z.B. bei hohen Anteilen von Kohlenstoffdioxid auftreten, da in diesen Fällen der Lichtbogen konzentriert an der Drahtunterseite ansetzt.

Hier wird deutlich, dass der mittelbare Einfluss des Schutzgases (Erhöhung der Verdampfung) den unmittelbaren Einfluss des Schutzgases (Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften) weit übersteigt, vgl. Temperaturverteilung im Lichtbogen in Abbildung 6.8. D. h. durch die veränderten Metaldampfanteile im Lichtbogen werden die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens stärker beeinflusst als durch die thermophysikalischen Eigenschaften des Schutzgasgemisches.

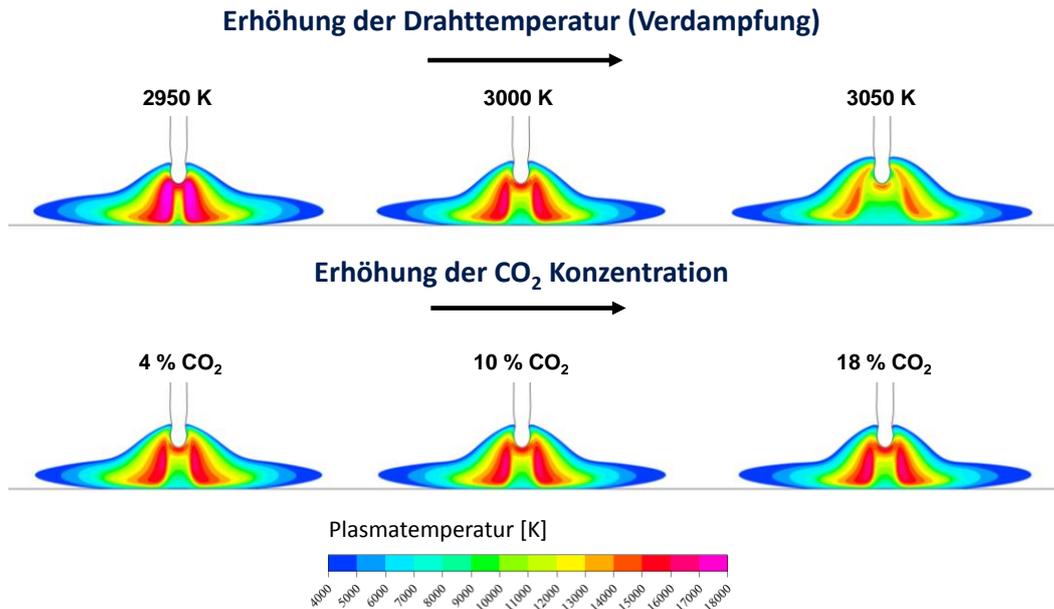


Abbildung 6.8: Einfluss der Verdampfung gegenüber den thermophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Temperaturverteilung im Lichtbogen für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon

III. Berücksichtigung der thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase und der veränderten Verdampfungsrate und Elektrodenformen

Im letzten Schritt der numerischen Untersuchungen wurden neben den veränderten thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase auch die veränderten Formen der Drahtelektroden und die veränderte Metallverdampfungsrate beachtet. Dadurch werden sowohl die unmittelbaren als auch mittelbaren Einflüsse der Schutzgase berücksichtigt.

In Analogie zu den Aussagen in II. wird der dominante Einfluss der veränderlichen Metallverdampfung gegenüber den veränderten thermophysikalischen Eigenschaften der Schutzgase deutlich. D. h. für die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens ist vor allem die Form des Metaldampfkerns maßgeblich. Des Weiteren bestimmt die Verdampfung an der Drahtelektrode den Lichtbogenansatz. Höhere Verdampfungsraten führen zu einer Verschiebung des Lichtbogenansatzes in Richtung Stromkontaktrohr und damit zu einer Verringerung der Kraftwirkung des Lichtbogens auf die Werkstückoberfläche.

Eine Ausnahme ergibt sich bei Zumischung von Kohlenstoffdioxid oberhalb von 10 %. Hier führt die hohe volumetrische Enthalpie des Kohlenstoffdioxids zu einer Fokussierung des Lichtbogens, welche der Defokussierung des Metaldampfes entgegenwirkt. Die Wärmeeinbringung in das Werkstück findet dadurch wesentlich konzentrierter statt.

Zumischungen von Helium führen zu einer deutlichen Steigerung der Wärmeeinbringung in den Randbereichen des Lichtbogens. Dieser Effekt wird durch die erhöhte thermische Leitfähigkeit von Helium vor allem im hohen Temperaturbereich bedingt. D. h. neben der Erhöhung der Wärmeeinbringung an den Elektrodenoberflächen (niedriger Temperaturbereich) wird die Wärmeleitung vom Lichtbogen an die Elektrodenoberflächen und in die Randbereiche des Lichtbogens (mittlerer bis hoher Temperaturbereich) unterstützt. Die Wärmeeinbringung in das Werkstück findet dadurch im Gegensatz zu Kohlenstoffdioxid-Zumischungen auf einer größeren Fläche statt.

7 Zusammenfassung zur Wirkungsweise der Gase

Am Beispiel eines Sprühlichtbogenprozesses mit einer mittleren Stromstärke von 350 A und einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 13 m/min wurden die Einflüsse unterschiedlicher Schutzgaszusammensetzungen untersucht. Diskutiert wurde der Einfluss von zwei- und dreikomponentigen Schutzgasen aus Argon mit Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff. Durch die Kombination experimenteller und numerischer Methoden konnte der Gaseinfluss hinsichtlich des Werkstoffübergangs, der Wärme- und Kraftwirkung des Lichtbogens und des Schweißergebnisses quantifiziert werden.

Wesentliche Einflüsse der Schutzgase auf den Werkstoffübergang ergeben sich sowohl durch Kohlenstoffdioxid als auch durch Sauerstoff wobei eine minimale Zumischung beachtet werden muss, vgl. Abbildung 7.1. Geringe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid (> 2,5 %) und Sauerstoff (> 1,5 %) führen zu einer Verkürzung der Undoloidenlänge und damit zu einer Reduzierung von Kurzschlüssen. Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oberhalb von 10 % bedingen einen unsymmetrischen Werkstoffübergang der durch die veränderte Wärmeeinbringung zu einer Vermeidung des fingerförmigen Einbrandprofils führt, wie er bei Argon typisch ist.

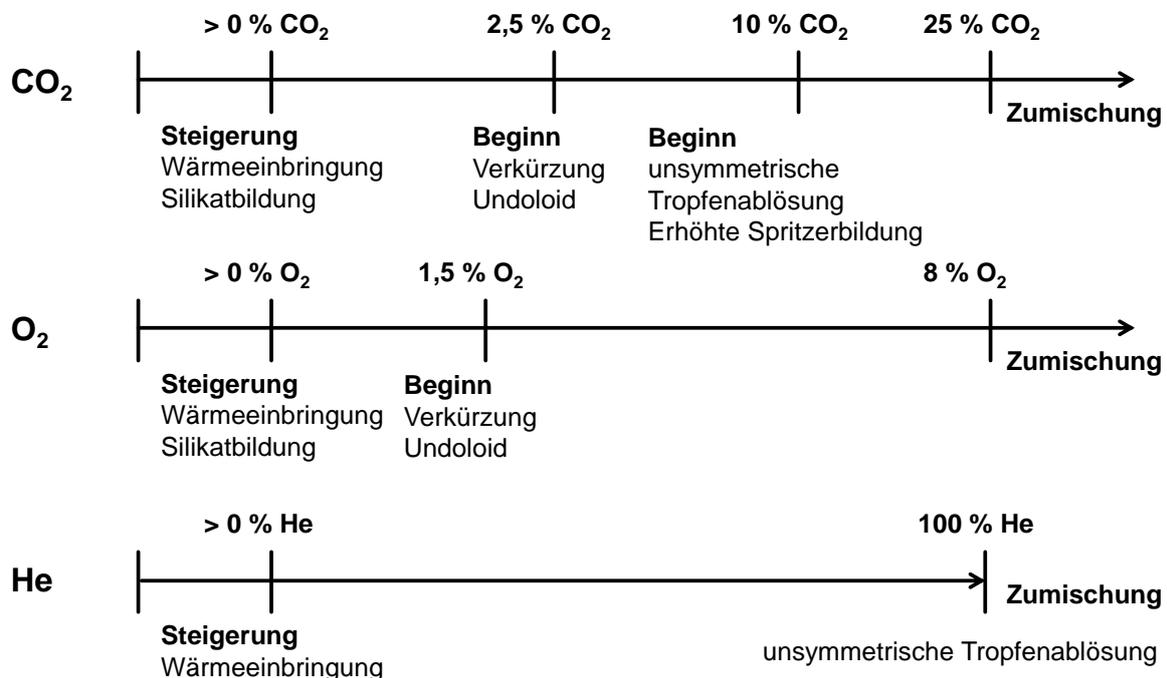


Abbildung 7.1: Einfluss unterschiedlicher Schutzgaszusammensetzungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Helium zu Argon in Abhängigkeit der Zumischung

Der Einfluss der Schutzgase auf die Eigenschaften des Lichtbogens wurde durch zahlreiche Sensitivuntersuchungen mit einem numerischen Lichtbogenmodell bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass der Metaldampf im Lichtbogen in den meisten Fällen einen größeren Einfluss auf die Lichtbogeneigenschaften besitzt als die thermophysikalischen Eigenschaften der jeweiligen Schutzgaszumischungen. Alle untersuchten Zumischungen zu Argon führen zu einer Erhöhung der Verdampfung an der Drahtelektrode und dadurch zu einer Erhöhung des Metaldampfanteils im Zentrum des Lichtbogens. Dadurch wird der Lichtbogen defokussiert und der Ansatz des Lichtbogens in Richtung Stromkontaktdüse verschoben. Ein gegenläufiger Trend ist bei Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu beobachten. Durch die hohe volumetrische Enthalpie wird der Lichtbogen fokussiert und die Kraftwirkung des Lichtbogens auf die Elektroden steigt maßgeblich an. Dieser Effekt führt zum unsymmetrischen Werkstoffübergang, da die Kraft auf die Unterseite des Undoloiden stark ansteigt. Heliumzumischungen führen zu einer Verbreiterung des Lichtbogens und dadurch zu einer Verbreiterung des Wärmeeintragsprofils am Werkstück.

Aus diesem Verständnis zur Wirkungsweise der Schutzgase lassen sich gezielte Anpassungen des Schweißprozesses durch das Schutzgas vornehmen. Da die Anforderungen an den Schweißprozess von Anwender zu Anwender verschieden sind, können aber keine allgemeingültige Aussage und universell anwendbare Empfehlungen zu optimalen Schutzgaszusammensetzungen getroffen werden. Deshalb soll die Entscheidungsfindung anhand der folgenden Szenarien kurz erläutert werden.

Eine **Steigerung der Toleranz des Schweißprozesses gegenüber Kantenversatz** kann sowohl durch den Werkstoffübergang als auch durch die Lichtbogeneigenschaften gezielt gesteuert werden. Eine Verbesserung des Flankeneinbrandes kann zum einen durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid von mehr als 10 % erreicht werden, da dadurch der Werkstoffübergang unsymmetrisch wird und die Eintrittsfläche der Tropfen ins Schmelzbad vergrößert wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Zumischung von Helium, da dadurch der Lichtbogenansatz und die Wärmeeinbringung ins Werkstück verbreitert werden. Bei Heliumzumischung sollten allerdings auch geringe Anteile von Sauerstoff oder Kohlenstoffdioxid im Schutzgas enthalten sein, um durch die Reduzierung der Oberflächenspannung das Fließverhalten der Schmelze zu verbessern.

Zur **Verringerung der Metallverdampfung** sollten nur geringe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon verwendet werden, da dadurch die Wärmeeinbringung in den Draht verringert wird. Bezogen auf den prozentualen Anteil der Zumischung ergibt sich die größte Steigerung durch Wasserstoff, gefolgt von Kohlenstoffdioxid, während Sauerstoff und Helium nur vergleichsweise geringere Steigerungen der Verdampfungsrate bedingen.

Zur **Steigerung der Wärmeeinbringung in das Werkstück** bzw. zur **Steigerung der Schweißgeschwindigkeit** sollte die Wärmeleitung an den Elektrodenoberflächen erhöht werden. Bezogen auf den prozentualen Anteil der Zumischung ergibt sich die größte Steigerung der Wärmeleitung wiederum durch Wasserstoff gefolgt von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Helium. Zumischungen von Helium nehmen dabei eine Sonderstellung ein, da die hohe thermische Leitfähigkeit von Helium im gesamten Temperaturbereich auch zu einer Verbreiterung des Lichtbogens und damit zu einer Defokussierung des Lichtbogens führt. Im Falle einer hohen Zumischung von Helium kann deswegen eine weitere Zumischung von Kohlenstoffdioxid sinnvoll sein da diese zu einer Fokussierung des Lichtbogens bzw. zu einer Kompensation des Heliumeinflusses auf den Lichtbogenansatz führt. Solche dreikomponentigen Gase aus Argon, Kohlenstoffdioxid und Helium werden bereits im Dickblechbereich eingesetzt.

Die **Verringerung von Spritzern** kann sowohl durch den Werkstoffübergang als auch durch die Lichtbogeneigenschaften beeinflusst werden. Geringe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oberhalb von 2,5 % bzw. Sauerstoff oberhalb von 1,5 % führen zu einer Verkürzung des Unduloids und damit zu einer Verringerung der Kurzschlussfrequenz bei gleicher Stickoutlänge. Spritzer entstehen jedoch nicht nur durch Kurzschlüsse, sondern sind oft Folge unsymmetrischer Tropfenablösungen. In diesem Fall ist es sinnvoll, Zumischungen von Kohlenstoffdioxid unterhalb von 10 % zu verwenden, da dadurch die Kraftwirkung des Lichtbogens auf die Drahtelektrode wesentlich verringert werden kann.

8 Übertragbarkeit der Aussagen auf andere MSG-Prozesse

In Absprache mit dem PbA wurden die Übertragbarkeit der Aussagen zum Gaseinfluss für jeweils eine Dick- und eine Dünoblechanwendung überprüft.

In der Dünoblechanwendung wurden 2 mm dicke Bleche mit einem Kurzlichtbogenprozess mit einer Abschmelzleistung von 4,5 m/min und einer mittleren Stromstärke von 160 A an einer Kehlnaht im Überlappstoß geschweißt. Von besonderem Interesse war der Einfluss des Schutzgases auf die mögliche Tolerierbarkeit des Prozesses gegenüber Kantenversatz. Für diesen Zweck wurde der Kantenversatz beim Schweißen kontinuierlich gesteigert und die maximal mögliche Auslenkung bestimmt bei der die Anbindung des Oberbleches noch gewährleistet werden konnte. Die entsprechenden Angaben zum Schweißprozess sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

In der Dickblechanwendung wurden 5 mm dicke Bleche mit einem Sprühlichtbogenprozess mit einer Abschmelzleistung von 13 m/min und einer mittleren Stromstärke von 350 A an einer Kehlnaht im T-Stoß geschweißt. Die entsprechenden Angaben zum Schweißprozess sind in Tabelle 8.2 angegeben. Von besonderem Interesse war die Bewertung des Schweißprozesses hinsichtlich dem erreichbaren A-Maß und dem resultierenden Einbrandprofil.

Tabelle 8.1: Angaben zum Schweißprozess der Dünoblechanwendung

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,2 mm
Drahtvorschub	4,5 m/min
mittlere Stromstärke	160 A
Stickout	15 mm
Schweißgeschwindigkeit	0,6 m/min
Grundwerkstoff	S420MC
Schweißposition	PB
Naht	Kehlnaht
Stoßart	Überlappstoß

Tabelle 8.2: Angaben zum Schweißprozess der Dickblechanwendung

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,2 mm
Drahtvorschub	13 m/min
mittlere Stromstärke	350 A
Stickout	20 mm
Schweißgeschwindigkeit	0,5 m/min
Grundwerkstoff	S235
Schweißposition	PB
Naht	Kehlnaht
Stoßart	T-Stoß

8.1 Dünoblechanwendung

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die Tolerierbarkeit des Prozesses gegenüber Kantenversatz maßgeblich durch das verwendete Schutzgas beeinflusst werden kann. In Analo-

gie zu den Aussagen in Kapitel 7 kann die Tolerierbarkeit des Prozesses gegenüber Kantenversatz einerseits durch den Lichtbogen (Heliumzumischung) und andererseits durch den Werkstoffübergang (Kohlenstoffdioxidzumischung) beeinflusst werden, vgl. Abbildung 8.1.

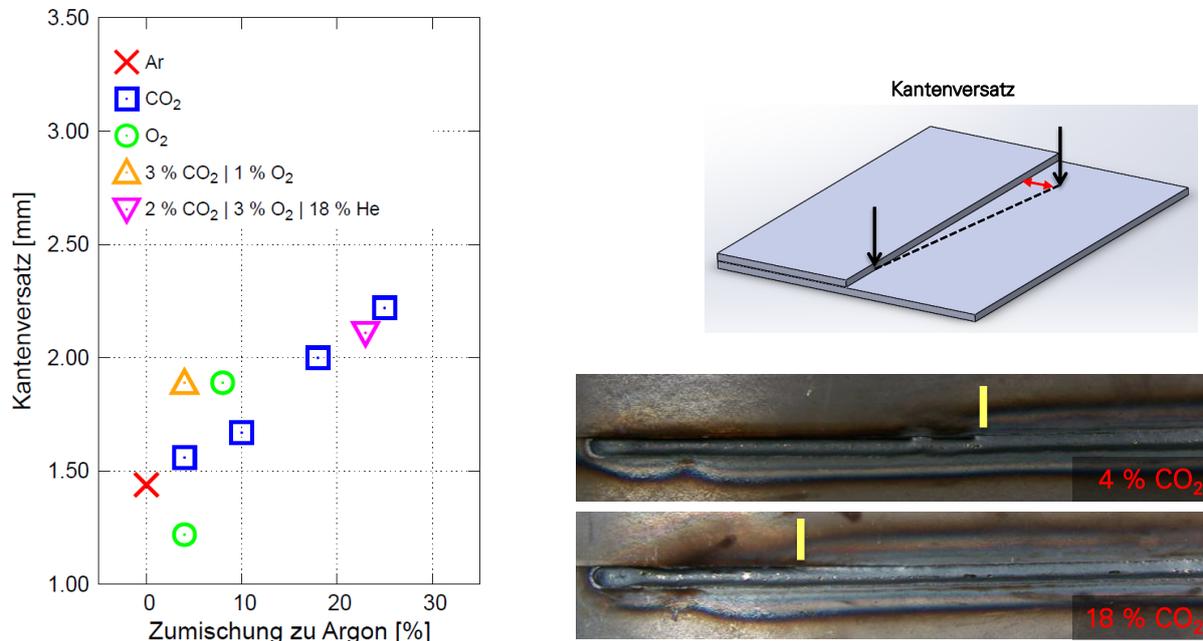


Abbildung 8.1: Kantenversatz (links), Ausrichtung des Schweißprozesses und Nahtaussehen für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dünoblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.1)

Zumischungen von Helium zu Argon führen zu einer Defokussierung des Lichtbogens und damit zu einer Verbesserung der Wärmeeinbringung in das Oberblech. Durch die zusätzlichen Zumischungen von Kohlenstoffdioxid bzw. Sauerstoff wird die Oberflächenspannung der Schmelze und damit das Fließverhalten verbessert.

Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon beeinflussen einerseits das Fließverhalten der Schmelze andererseits aber auch den Werkstoffübergang nach dem Auflösen der Kurzschlussbrücke. Hohe Zumischungen von Kohlenstoffdioxid bewirken wiederum eine Fokussierung des Lichtbogens und dadurch eine Steigerung der Kraftwirkung auf die Drahtelektrode. Je größer die Zumischung von Kohlenstoffdioxid in Argon ist, desto größer wird die Kraftwirkung und desto breiter wird der Werkstoff unmittelbar nach der Kurzschlussauflösung auf den Blechen verteilt. In Abbildung 8.2 ist die Fokussierung des Kurzlichtbogens durch Zumischungen von Kohlenstoffdioxid an der Breite der Wirkzone des Lichtbogenansatzes auf dem Werkstück ersichtlich. Des Weiteren gibt die Deformation der Schmelzbadoberfläche Aufschluss über die Kraftwirkung des Lichtbogens welche im Falle der Kohlenstoffdioxidzumischung deutlich größer ist.

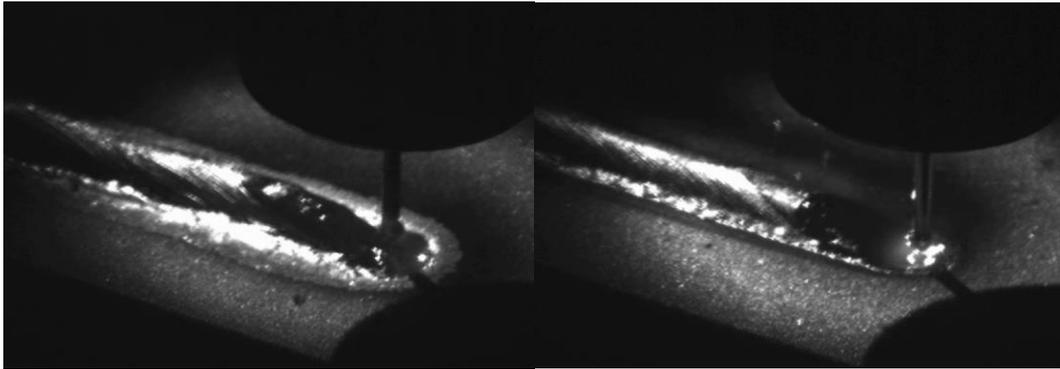


Abbildung 8.2: HG-Aufnahmen des Nahtaufbaus für ein Schutzgas aus 100 % Argon (links) und einem Schutzgas aus 18 % Kohlenstoffdioxid und 82 % Argon (rechts)

8.2 Dickblechanwendung

Durch die Zumischung von Kohlenstoffdioxid zu Argon wird das A-Maß kontinuierlich verkleinert, da die Kraftwirkung des Lichtbogens sowohl auf die Drahtelektrode als auch auf das Werkstück stark ansteigt und dadurch der Werkstoffübergang ungleichmäßig wird, vgl. Abbildung 8.3. Dieser Einfluss ist in Analogie der Aussagen in Kapitel 7 ab einem Zumischungsgrad über 10 % besonders stark ausgeprägt. Durch die Zumischung von Helium kann wiederum eine verbesserte Anbindung der Schmelze in den Randbereichen erreicht werden, wenn das Schutzgas außerdem geringe Mengen an Kohlenstoffdioxid und/oder Sauerstoff enthält, um das Fließverhalten der Schmelze zu verbessern.

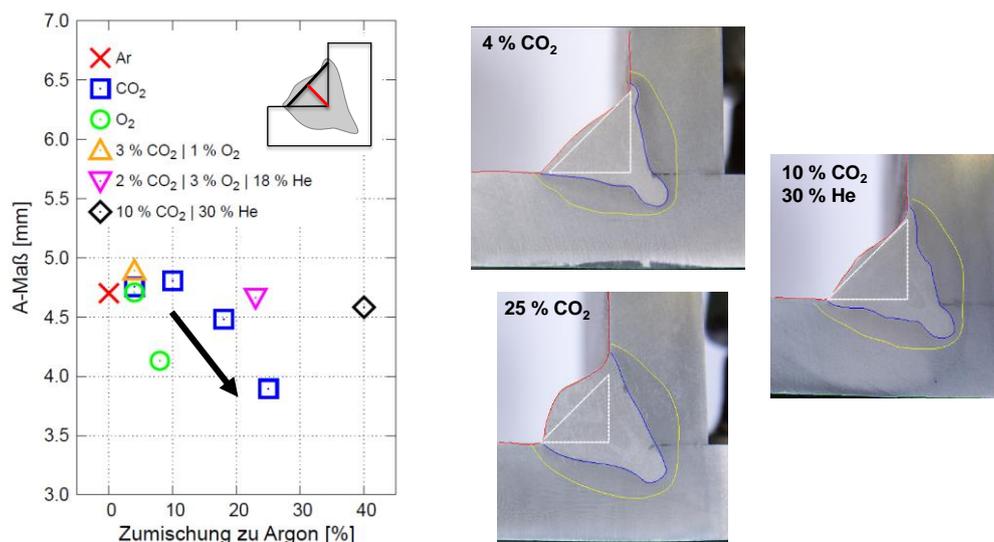


Abbildung 8.3: A-Maß (links) und Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone (rechts) für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dickblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.2)

In Analogie der Aussagen in Kapitel 5.4 verringern Zumischungen von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff die spezifische Aufschmelzleistung. Im T-Stoß ist dieser Effekt jedoch geringer ausgeprägt.

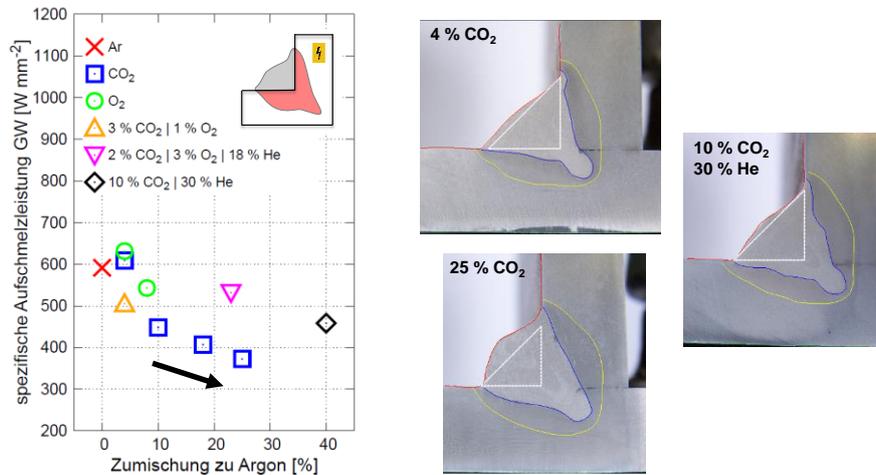


Abbildung 8.4: Spezifische Aufschmelzleistung (links) und Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone (rechts) für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dickblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.2)

In Abbildung 8.5 ist der Einfluss von Kohlenstoffdioxidzumischungen zu Argon auf das Einbrandprofil im Vergleich zum Einfluss der Spannungskorrektur dargestellt. Während das Einbrandprofil ab einem Zumischungsgrad von Kohlenstoffdioxid von 10 % näherungsweise konstant bleibt, wird das Einbrandprofil für hohe Spannungskorrekturen deutlich breiter. Dieser Vergleich verdeutlicht, dass die Länge des freien Drahtendes und die daraus resultierenden Stickoutvorwärmung möglichst konstant gehalten werden, da unter Umständen dieser Effekte den Einfluss der Gase überdecken und somit die Untersuchungen verfälschen kann.

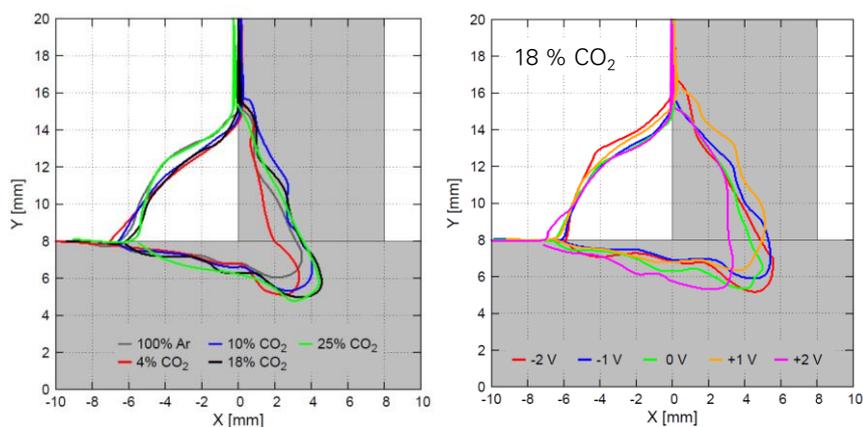


Abbildung 8.5: Einfluss der Beimischung von Kohlenstoffdioxid zu Argon (links) und der Spannungskorrektur (rechts) auf das Einbrandprofil

9 Praxisbeispiel

Abschließend wurden die Erkenntnisse bezüglich der Wirkungsweise der Gase auf ein Praxisbeispiel angewendet. In Abstimmung mit dem PbA wurde die Schweißung einer Mehrlenker-Hinterachse PQ35 der Volkswagen AG ausgewählt. Die Schweißgruppe besteht aus 3 Einzelteilen: Der Buchse, dem Schließblech und der Federlenkerschale. Diese werden in der Fertigung mit insgesamt vier Nähten durch MAG-Schweißprozesse gefügt. Im Praxisbeispiel wurde die Schweißung zwischen dem Schließblech und der Federlenkerschale ausgewählt, welche sowohl mit unterschiedlichen Schutzgasen als auch mit unterschiedliche MSG-Prozessen gefügt werden kann, vgl. Abbildung 9.1.



Abbildung 9.1: Mehrlenker-Hinterachse PQ35 der Volkswagen AG, Quelle Originalbild: Volkswagen Aktiengesellschaft

Untersucht wurde die Anwendbarkeit für drei unterschiedliche Prozesse:

- Übergangslichtbogen
- Sprühlichtbogen
- Impulslichtbogen

9.1 Übergangslichtbogen

Aufgrund der hohen Toleranzkompensation des Schweißprozesses gegenüber Kantenversatz und des mittleren Abschmelzleistungsbereichs, wird in der Praxis häufig der Übergangslichtbogen eingesetzt. In den Versuchen wurden die in Tabelle 9.1 angegebenen Prozessparameter verwendet. Als Zielvorgabe wurde eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Einhaltung einer minimalen Einbrandtiefe von 0,5 mm definiert. Außerdem wurde eine Reduzierung von Spritzern und Silikaten auf der Naht angestrebt.

Tabelle 9.1: Prozessparameter des Übergangslichtbogens

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,2 mm
Drahtvorschub	6,4 m/min
mittlere Stromstärke	240 A
Stickout	15 mm
Grundwerkstoff	HD680C
Schweißposition	PB
Naht	Kehlnaht
Stoßart	Überlappstoß

Im Vergleich zu der Standardanwendung mit einem Schutzgas aus 18 % CO₂ und 82 % Ar (siehe Abbildung 9.2 links oben) und den in Tabelle 9.1 angegebenen Standardparametern konnte die Schweißgeschwindigkeit auch für geringere Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oder Sauerstoff in Argon gehalten bzw. noch gesteigert werden (siehe Beschriftungen der Bilder in Abbildung 9.2). Für alle Schutzgase war jedoch eine Anpassung der Spannungskorrektur notwendig, um den Prozess an das Schutzgas anzupassen. Durch die Zugabe von 20 % Helium konnte die Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu einem Schutzgas aus 4 % O₂ und 96 % Ar nicht weiter gesteigert werden.

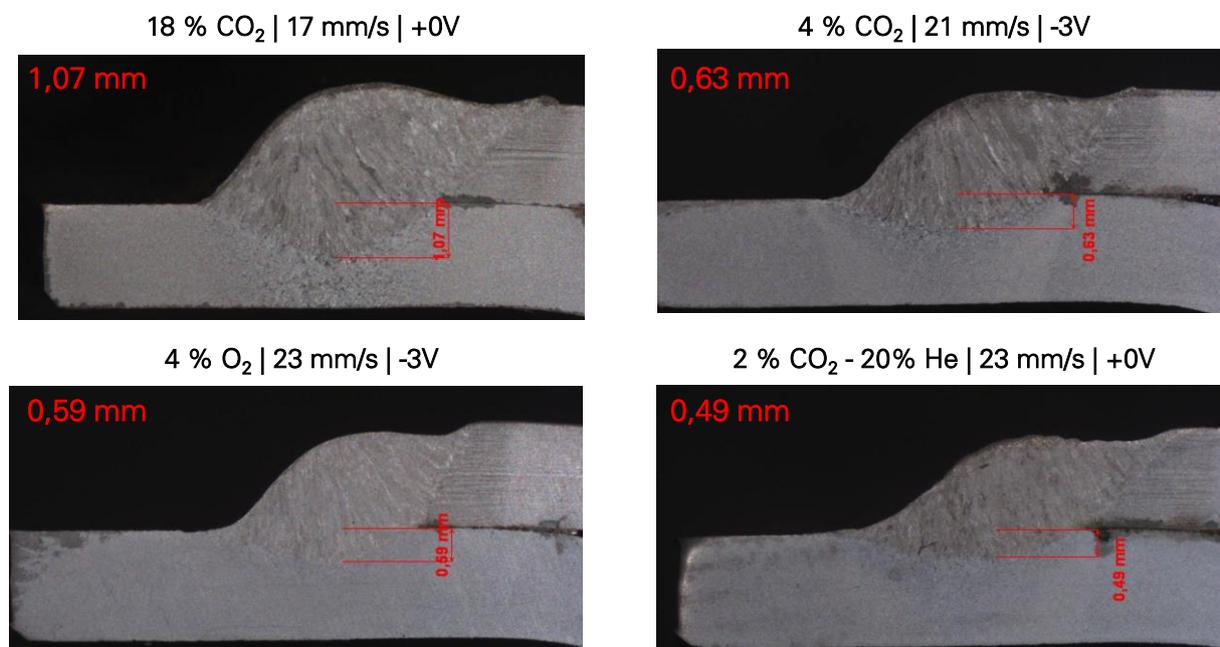


Abbildung 9.2: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Übergangs- bzw. Langlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase bei der jeweils maximalen Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zur Standardanwendung (links oben)

Neben der Steigerung der Schweißgeschwindigkeit konnte die Silikatbildung durch die Verwendung von Schutzgasen mit weniger Aktivgaskomponenten deutlich verringert werden, vgl. Abbildung 9.3. Durch eine HG-Kamera wurde die Spritzerbildung während der Schweißungen abgeschätzt. Auch hier zeigt sich eine deutliche Verringerung der Spritzerbildung bei Verwendung von geringen Aktivgasanteilen. Die geringste Spritzerbildung wurde bei einem Schutzgas aus 4 % O₂ und 96 % Ar beobachtet.

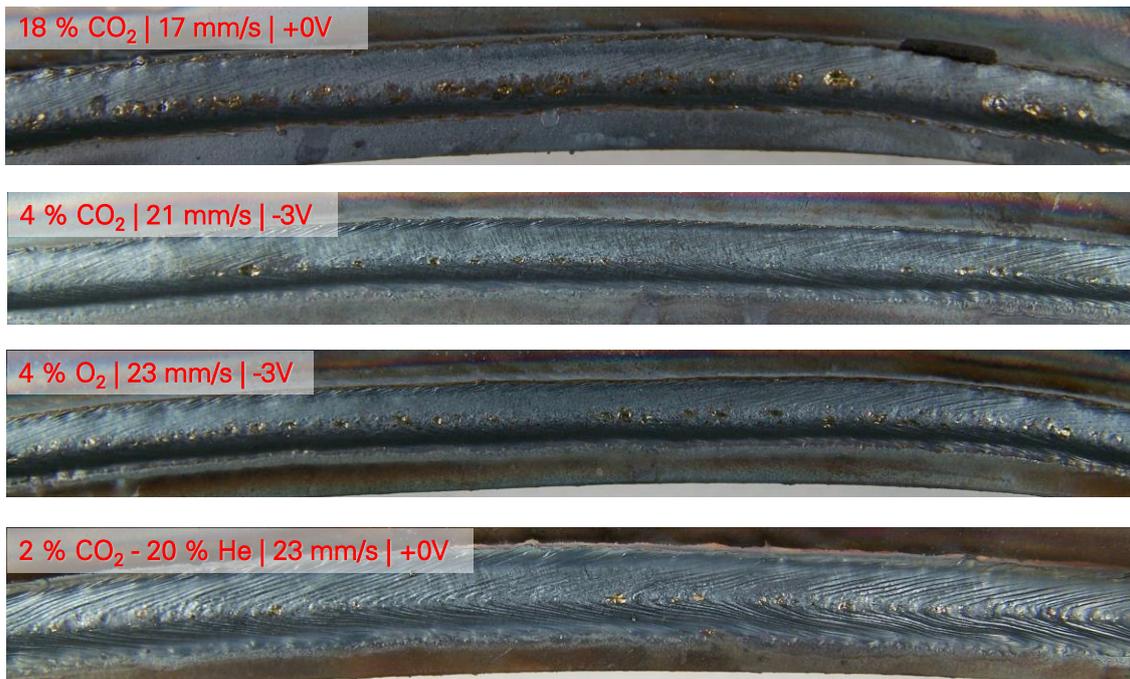


Abbildung 9.3: Nahtaussehen der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Übergangs- bzw. Langlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase

9.2 Sprühlichtbogen

Aufgrund der hohen Energieeinbringung des Prozesses wird der Sprühlichtbogen häufig eingesetzt. In den Versuchen wurden die Prozessparameter aus Tabelle 9.2 verwendet.

Im Vergleich zur Anwendung mit einem Schutzgas aus 18 % CO₂ und 82 % Ar (siehe Abbildung 9.2 links oben) und den in Tabelle 9.2 angegebenen Parametern konnte die Schweißgeschwindigkeit auch bei geringeren Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oder Sauerstoff in Argon gehalten werden (siehe Beschriftungen der Bilder in Abbildung 9.4). Eine weitere Steigerung der Schweißgeschwindigkeit war nicht möglich. Ausschließlich für das Schutzgas mit 4 % CO₂ und 96 % Ar war eine geringfügige Anpassung der Spannungskorrektur notwendig um den Prozess an das Schutzgas anzupassen. Des weiteren zeigt sich für dieses

Schutzgas ein fingerförmiger Einbrand. Durch die Zumischung sowohl von Kohlenstoffdioxid als auch von Sauerstoff konnte der fingerförmige Einbrand vermieden werden.

Tabelle 9.2: Prozessparameter des Sprühlichtbogens

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,0 mm
Drahtvorschub	10 m/min
mittlere Stromstärke	225 A
Stickout	15 mm
Schweißgeschwindigkeit	24 mm/s
Grundwerkstoff	HD680C
Schweißposition	PB
Naht	Kehlnaht
Stoßart	Überlappstoß

Im Vergleich zur Anwendung des Übergangslichtbogens zeigt sich eine deutlich geringere Toleranzkompensation des Sprühlichtbogenprozesses gegenüber Kantenversatz bzw. eine geringere Spaltüberbrückbarkeit. Des Weiteren wird das Einbrandprofil deutlich stärker vom Schutzgas beeinflusst. Diese Tatsache spricht wiederum dafür, dass das Einbrandprofil bzw. der Fingereinbrand wesentlich vom feintröpfigen Werkstoffübergang des Sprühlichtbogens geprägt wird. Beim Übergangslichtbogen wird der Werkstoff nach der Kurzschlussauflösung wesentlich breiter in der Schmelze verteilt als beim Sprühlichtbogen.

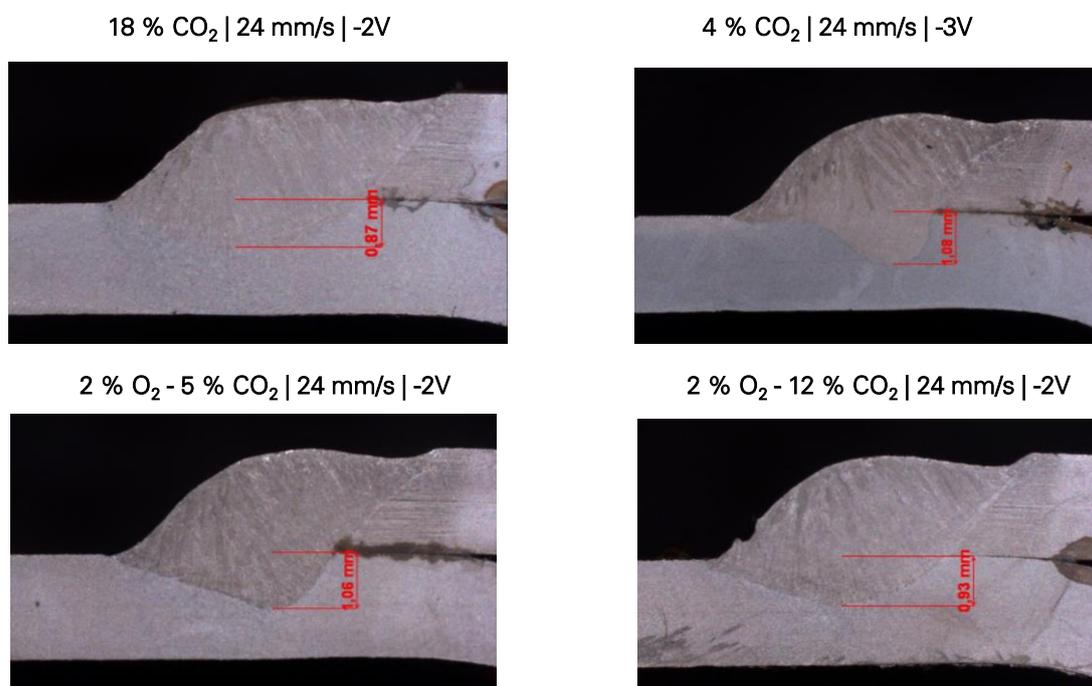


Abbildung 9.4: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Sprühlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase

9.3 Impulslichtbogen

Aufgrund der geringen Spritzerbildung und der geringen Schweißrauchemissionen wird der Impulslichtbogen zunehmend eingesetzt. Nachteilig ist jedoch der hohe Energieeintrag vor allem im Dünnblechbereich. In den Versuchen wurden die in Tabelle 9.3 angegebenen Prozessparameter verwendet.

Tabelle 9.3: Prozessparameter des Impulslichtbogens

Drahtwerkstoff	G3Si1
Drahtdurchmesser	1,0 mm
Drahtvorschub	11 m/min
Pulsstromstärke	350 A
Grundstromstärke	80 A
Frequenz	206 Hz
Stickout	15 mm
Schweißgeschwindigkeit	24 mm/s
Grundwerkstoff	HD680C
Schweißposition	PB
Naht	Kehlnaht
Stoßart	Überlappstoß

Im Vergleich zur Anwendung mit einem Schutzgas aus 10 % CO₂ und 90 % Ar (siehe Abbildung 9.5 links oben) und den in Tabelle 9.3 angegebenen Parametern konnte die Schweißgeschwindigkeit auch bei geringeren Zumischungen von Kohlenstoffdioxid oder Sauerstoff in Argon gehalten werden (siehe Beschriftungen der Bilder in Abbildung 9.5).

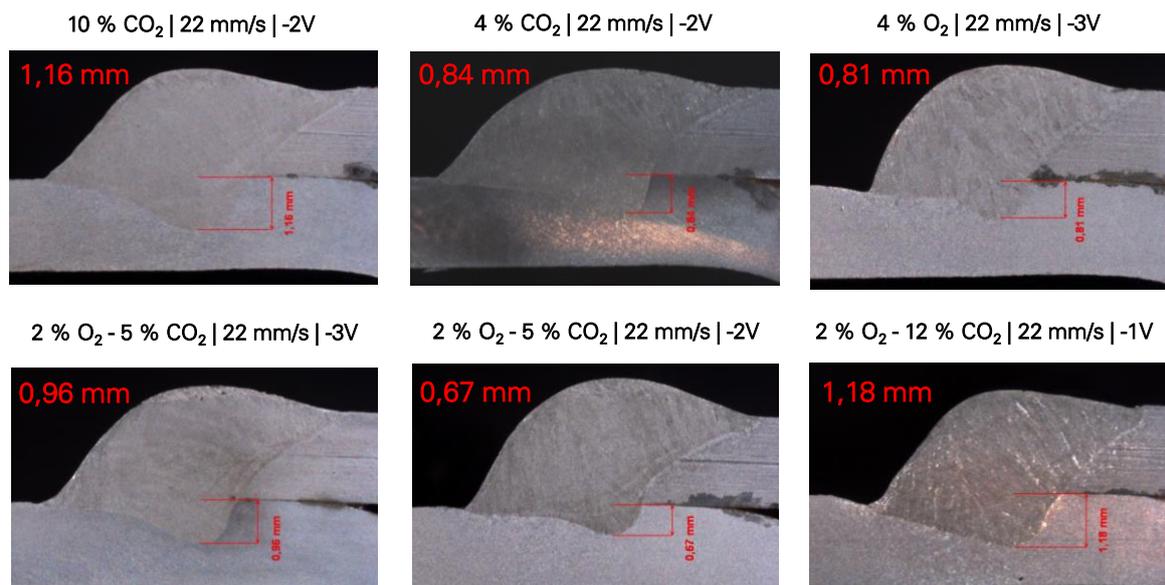


Abbildung 9.5: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Impulslichtbogen für unterschiedliche Schutzgase

Eine weitere Steigerung der Schweißgeschwindigkeit wäre möglich gewesen, wurde jedoch in den Untersuchungen zum Impulslichtbogen jedoch nicht weiter verfolgt. Generell zeigte sich eine geringe Spritzerbildung im Vergleich zu den beiden anderen Lichtbogenarten.

Bei der Betrachtung des Einbrandprofils wird wiederum deutlich, dass der Werkstoffübergang einen wesentlichen Einfluss auf die Form des Einbrandes besitzt. Aufgrund der Tatsache, dass im Impulsprozess nach der Hochstromphase immer eine ähnliche Menge des Werkstoffes abgelöst wird, ist das Einbrandprofil für unterschiedliche Schutzgase relativ ähnlich. Folglich ist die Beeinflussbarkeit des Impulslichtbogens durch unterschiedliche Schutzgase als relativ gering einzuschätzen.

10 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU

10.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projekts stellen einen neuartigen Ansatz für die Weiterentwicklung und die gezielte Anwendung von Schutzgasen beim MSG-Schweißen dar. Durch die Kombination der numerischen und experimentellen Analysemethoden konnte das Verständnis zu den Einflussmöglichkeiten durch Schutzgase bei MSG-Prozessen erhöht werden.

Wichtige Voraussetzung hierfür war, dass ein Schweißparametersatz mit gleicher Stromstärke und gleicher Abschmelzleistung bei gleichem Stick-out für alle Schutzgase erarbeitet wurde. Damit ist die bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt und den experimentellen Aufwand bei der Beurteilung der Wirkungsweise von Schutzgasen, insbesondere mit mehreren Komponenten, zu begrenzen. Durch die experimentelle Beobachtung des MSG-Prozesses mit und ohne Laserbeleuchtung ist es dabei gelungen, die Form des Drahtende, des Metaldampfkegels und des Lichtbogenansatzes nahezu zeitgleich zu erfassen und deren Wechselwirkungen darzustellen. Die statistische Auswertung der HG-Aufnahmen stellt hierzu zum einen sicher, dass die großen Datenmengen aus Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen überhaupt sinnvoll genutzt werden, und zum anderen, dass die Ergebnisse zuverlässig über einen langen Zeitraum erfasst werden. Die Erkenntnisse wurden in einem übersichtlichen Schaubild zusammengefasst, welches die wesentlichen Zumischungsanteile der jeweiligen Schutzgaskomponenten und deren Auswirkung auf den Prozess charakterisiert. Dies hilft bei der Interpretation experimenteller Ergebnisse.

Wesentlich für die Beschreibung der komplexen Wirkungszusammenhänge in MSG-Lichtbögen ist das im Rahmen des Projektes entwickelte Simulationsmodell. Dieses ist in der Lage, den Lichtbogenprozess mit unterschiedlichen Schutzgasgemischen, Stromstärken, Elektrodenformen und Verdampfungen abzubilden. Hierzu wurde eine Datenbasis, u. a. mit Transportgleichungen, aus 450 Mischungen von Schutzgas und Eisen berechnet, die für eine exakte Beschreibung von MSG-Lichtbögen zwingend notwendig ist.

Mit dem neuen Modell wurden Sensitivanalysen durchgeführt, die das Verhalten des Lichtbogens in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung physikalisch erklären können. Die Sensitivanalysen ermöglichen dabei im Gegensatz zu experimentellen Beobachtungen die Separierung von unmittelbaren und mittelbaren Einflüssen der Schutzgase. Als wichtigster mittelbarer Einfluss und als prozessbestimmend wurde der Metaldampf erkannt. Die Verdampfung am Drahtende stellt die Metaldampfquelle für den MSG-Lichtbogen dar und wird

durch die Schutzgase maßgeblich beeinflusst. Innerhalb des Lichtbogens sind diese Eisenanteile deutlich sensitiver als unterschiedliche Schutzgaseigenschaften.

Hieraus ist ersichtlich, dass für die Beurteilung von Schutzgasen nicht nur die verschiedenen thermo-physikalischen Eigenschaften zu untersuchen sind, sondern vor allem die Wechselwirkungen mit den Festkörpern beim MSG-Schweißen. Dies macht dabei zum einen deutlich, dass eine allgemeingültige Empfehlung von Schutzgasen aus den Schutzgaseigenschaften nicht möglich ist, und zum anderen, dass der im Projekt beschriebene Weg einer kombinierten experimentellen und numerischen Untersuchung des MSG-Prozesses sinnvoll und zielführend ist.

10.1 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Aufgrund der geringen Investitionskosten und der hohen Verfügbarkeit sind MSG-Verfahren besonders in KMU ein existenzielles Fertigungsverfahren. Alternative Schweißverfahren, wie Laser- oder Laserhybridverfahren, werden in KMU dagegen selten verwendet.

Die Anwender werden durch die Ergebnisse in die Lage versetzt, MSG-Schweißprozesse durch eine zielgerichtete Auswahl von Schutzgasmischungen auf werkstofftechnische Randbedingungen und konstruktive Anforderungen anzupassen. Hierzu ist Prozessverständnis zu den Wirkungsweisen der Schutzgase notwendig, dass durch das Vorhaben deutlich gesteigert werden konnten.

Auch die Gasehersteller profitieren durch die neuen und umfassenden diagnostischen und numerischen Methoden, die es erlauben, auch mehrkomponentige Gasgemische prinzipiell auszulegen und diese zielgerichtet mit vergleichbaren Randbedingungen zu testen. Das verbesserte Prozessverständnis führt zu einer Verringerung des Versuchsaufwandes und bedingt damit eine flexible und kosteneffiziente Anwendung des MSG-Verfahrens.

Damit erscheint es möglich, dass zukünftig die anwendungsgerechte Auslegung von Gase leichter, preisgünstiger und damit KMU-gerechter möglich ist. Ein wichtiger Ansatz hierbei stellt die Betrachtung des spezifischen Wirkungsgrades dar. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schmelzwirkungsgrad (aufgeschmolzener Grundwerkstoff pro eingebrachter Leistung) bei verschiedenen Schutzgasen im mehr als 50 % differieren kann. Damit ist die Erschließung erheblichen Einsparpotentials z. B. durch die Anpassung der Schweißgeschwindigkeit möglich. Wirtschaftlich ist dies auch für KMU von Interesse, da die Gaskosten in den meisten Fällen nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten ausmachen.

Ähnliche Effekte sind aufgrund der Spritzerneigung von MSG-Prozessen unter verschiedenen Schutzgasen zu erwarten. Die damit verbundenen Nacharbeiten sind teuer, da sie fast

immer manuell erfolgen müssen. Durch die gezielte Auswahl von Schutzgasen ist es möglich, die Spritzerneigung zu reduzieren.

Die damit verbundenen Vorteile können in allen automatisierten und mechanisierten Schweißfertigung, z. B. im Stahl- und Behälterbau, den Geräte- und Anlagenbau und den Fahrzeugbau eingesetzt werden. Wichtig hierzu ist das geschaffene Prozessverständnis.

Durch dieses profitieren außerdem die Hersteller von Zusatzwerkstoffen, da das Vorhaben deutlich zeigt, dass die Verdampfungen des Zusatzwerkstoffs den Prozess zum Teil stärker beeinflussen als die Schutzgase. Auch die zum Großteil mittelständische Hersteller von Lichtbogenschweißanlagen und –brennern profitieren vom erhöhten Prozessverständnis und dem entwickelten Modell des MSG-Lichtbogens, da mit diesem neue Regelungskonzepte erarbeitet werden können, die die Vorgänge im MSG-Lichtbogen berücksichtigen. Als Beispiel hierfür ist die unterschiedliche Beeinflussung des Werkstoffübergangs beim Impuls- und Sprühlichtbogen zu nennen. Durch eine zielgerichtete Anpassung der Regelungen durch die Stromquellenhersteller können KMU unmittelbar profitieren.

Zusammengefasst profitieren von Vorhaben vor allem die Anwender, da im Rahmen des Vorhabens herausgearbeitet werden konnte, welche Mechanismen die Effekte beim Einsatz verschiedener Gase bedingen. Insbesondere wurde deutlich, dass viele zum Teil kommunizierte Eigenschaften von Gasen, z. B. die Leitfähigkeiten, oft eine untergeordnete Rolle bei der Beurteilung von Schutzgasen einnehmen.

Das Vorhaben leistet damit einen unmittelbaren Beitrag, dass KMU die Potenziale verschiedener Schutzgase erkennen, für sie wichtige Kriterien definieren und mit diesem Wissen gezielt passende Schutzgase für ihre Anwendungen auswählen können. Unmittelbar profitieren KMU, da durch die methodischen und wissenschaftlichen Ergebnisse des Vorhabens Gase-, Zusatz- und Stromquellenhersteller zukünftig in der Lage sind, ihre Entwicklungen im Bereich der MSG-Prozesse noch zielgerichteter unter Berücksichtigung des Einflusses der Schutzgase voranzutreiben.

11 Erläuterung zur Kostenaufteilung

11.1 Erläuterungen zu Personaleinsatz

Die geleisteten Arbeiten waren für die Durchführung des Vorhabens erforderlich und entsprechen in angemessener Weise dem begutachteten und bewilligten Antrag.

Forschungsstelle 1: TU Dresden

Der wissenschaftliche Mitarbeiter an der TU Dresden übernahm die Aufgaben der Koordination des Gesamtvorhabens, die Planung, Koordination, Vorbereitung und Überwachung der Schweißversuche an der TU Dresden und die Durchführung der numerischen Untersuchungen. Durch den wiss. Mitarbeiter wurden federführend und in Zusammenarbeit mit dem wiss. Mitarbeiter am INP alle Zwischenberichte und der Abschlussbericht angefertigt. Er organisierte die Treffen der Forschungsstellen und der PbA-Sitzungen. Durch ihn erfolgte die Ermittlung geeigneter Prozessparameter (die auch am INP genutzt werden) und er war verantwortlich für die Bewertung der Schweißproben. Weiterhin erfolgte durch ihn die Entwicklung und Überprüfung der numerischen Lichtbogenmodelle. Diese wurden anschließend von ihm im Rahmen von Modellanalysen angewendet, um den Einfluss einzelner Gaseigenschaften zu verstehen.

Der technische Mitarbeiter an der TU Dresden unterstützte den Aufbau der Versuchsstände und die Durchführung aller experimentellen Untersuchungen. Unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters führte er den überwiegenden Teil der experimentellen Untersuchungen aus. Dies umfasste das Anfertigen von Schweißproben sowie deren Vorbereitung für die Metallographie. Durch ihn erfolgte die umfassende Dokumentation dieser Versuche. Des Weiteren wurden durch ihn Schweißversuche an praxisnahen Schweißaufgaben durchgeführt.

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten die Arbeit des technischen Mitarbeiters hinsichtlich der Probenvorbereitung für die Metallographie. Des Weiteren übernahmen sie Hilfstätigkeiten bei der Aufbereitung und Dokumentation der experimentellen Ergebnisse.

Forschungsstelle 2: INP Greifswald

Der wissenschaftliche Mitarbeiter des INP berechnete alle zur numerischen Simulation benötigten thermophysikalischen Eigenschaften der Prozessgase im Temperaturbereich bis 30 000 K. Im Rahmen der Arbeiten wurden die Dichte, die spezifische Wärme, die thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur, der Schutzgaszusammensetzung und dem Metaldampfgehalt berechnet.

Des Weiteren war der wissenschaftliche Mitarbeiter verantwortlich für die Planung, den Aufbau sowie für die Durchführung und Auswertung der spektroskopischen Untersuchungen. Hierzu wurde zunächst ein MSG-Schweißexperiment mit einer optischen Bank integriert und eine Messvorrichtung mit synchroner Messung des Spektrums, der elektrischen Signale und einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme erstellt. Durch den wiMi erfolgte insbesondere die Auswertung der Spektren zur Bestimmung der Plasmatemperatur und der Teilchendichte. Hierzu war die fachkundige Anwendung von Glättungsalgorithmen sowie Entfaltungsstrategien notwendig. Anschließend erfolgte unter Nutzung von teilchenspezifischen Konstanten die Rückrechnung auf die radialen Lichtbogentemperaturen (u. A. Boltzmannplot). Der Mitarbeiter diskutierte die Ergebnisse mit seinem Kollegen an der TU Dresden im Rahmen der Validierung der numerischen Modelle. Außerdem erfolgte durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.

Der technische Angestellte des INP unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Durchführung der spektroskopischen Untersuchungen und bei deren Auswertung. Insbesondere war er verantwortlich für die Ausführung der Schweißexperimente. Zusätzlich unterstützte er den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Auswertung der Versuche, insbesondere bei der Aufarbeitung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten die Arbeit bei den experimentellen Untersuchungen. Insbesondere unterstützten sie beim Aufbau der Versuchsvorrichtungen beziehungsweise bei der Durchführung der Schweißversuche und bei der Auswertung von Hochgeschwindigkeitskamera- und Stromsignalen.

11.2 Erläuterungen zu Geräteanschaffung

Es wurde keine Geräte beschafft.

11.3 Erläuterungen zu Leistungen Dritter

Zur Anschaffung der notwendigen Lizenzen für die Simulationssoftware ANSYS CFX an der TU Dresden mussten 9750 € aufgewendet werden.

12 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Im Rahmen dieses Projektes wurden in den Jahren 2012-2014 vier PbA-Sitzungen durchgeführt. Die aktuellen Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden weiterhin den jeweiligen Sitzungen des Fachausschuss 3 des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und verwandte Verfahren (DVS) vorgelegt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen von Vorträgen auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen vorgestellt. In Form von Workshops für KMU wurden die Ergebnisse ausführlich dargelegt und anwendungsorientiert diskutiert. Ein Überblick über die konkreten Transfermaßnahmen wird in Tabelle 12.1 gegeben.

Tabelle 12.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme A Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Forschungsergebnisse im PbA	A1: Vorstellung des Projektes A2: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens A3: Abschlusspräsentation	A1: 23.10.2012 TU Dresden A2: 17.05.2013 Berlin A2: 19.11.2013 TU Dresden A3: 25.02.2014 TU Dresden
Maßnahme B Transfer der Projektergebnisse über FA3 (Lichtbogen)	Information über das laufende Forschungsprojekt	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens B2: Abschlusspräsentation	B1: 13.03.2013 Magdeburg B1: 23.10.2013 Ilmenau B2: 25.03.2014 Aachen
Maßnahme C Fachvorträge auf Konferenzen	Information interessierter Firmen	C1: Institutsseminare C2: Tagung / Konferenz	C1: Vortrag: Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2013 C2: Vortrag: 4th International Round Table on Thermal Plasmas for Industrial Applications, Morocco, 2014
Maßnahme D	Direkte Ansprache interessierter Unternehmen		D1: permanent
Maßnahme E Veröffentlichung	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären.	E1: Internetseite der FST	E1: http://tu-dresden.de/mw/iof/fue/forschung/arbeitsgruppelichtbogenschweissen/projekte_datei/Projekte

Maßnahme F Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden	F1: Integration in die Vorlesungen „Schweißverfahren“ F2: Integration in Aufbaustudium zum Schweißfachingenieur (mit der SLV Halle)	F1: <i>ab SS 2014 an der TU Dresden</i> F2: <i>Vortrag: Weiterbildung für Schweißfachingenieure und Schweißfachmänner, SLV Halle, 2014</i>
Maßnahme G Weitergabe von Zusatzinformationen und Beratung	Information interessierter Firmen	G	G1: permanent
Maßnahme H Berichterstattung	Information interessierter Firmen	H1: Zwischenbericht H2: Abschlussbericht	H1: <i>16.10.2013 Zwischenbericht</i> H2: <i>19.06.2014 Abschlussbericht</i>

Tabelle 12.2: Geplante Transfermaßnahmen

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft	Veröffentlichung: Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“ (angenommen 05/2014)	2014 (vorauss. 09/14)
	eingereichter Vortrag auf der IIW Tagung 2014 in Seoul	28.05.2014
	eingereichter Vortrag und Veröffentlichungen zum DVS Congress 2014 in Berlin	13.12.2013

Übersicht über die Veröffentlichungen:

M. Hertel, S. Rose U. Füssel: Der Blick in den MSG-Prozess. 10. Dresdner Füge-technisches Kolloquium, Dresden, 2013

M. Hertel, S. Rose, U. Füssel, D. Uhlandt: Experimental and numerical investigations on the influence of different shielding gases in GMA welding. 4th International Round Table on Thermal Plasmas for Industrial Applications, Marrakech, Morocco 2014

M. Hertel, M. Häßler, S. Rose, U. Füssel, G. Gött, D. Uhlandt: Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MSG-Schweißprozesse durch konsequente Nutzung der Potentiale von Schutzgasen. Workshop "Lichtbogenphysik", Aachen 2014

S. Rose, M. Hertel, U. Füssel: Potenziale verschiedener Schutzgase bei MSG-Schweißprozessen. Vortrag SLV Halle bei „Weiterbildung für Schweißfachingenieure und Schweißfachmänner“, Halle 2014

geplante Veröffentlichungen

M. Hertel, J. Niese, M. Häßler, S. Rose, U. Füssel, D. Uhlandt: Experimentelle und numerische Untersuchung zum Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den MSG-Sprühlichtbogenprozess. Schweißen und Schneiden (Status: angenommen 05/14, Manuskript anbei)

M. Hertel, U. Füssel, S. Rose, D. Uhlandt: Influence of different shielding gases on material transfer and arc properties in GMA welding. International Institute of Welding, Study Group 212 "The Physics of Welding", Annual Assembly, Seoul, 2014 (Status: angenommen 05/14)

M. Hertel, U. Füssel, J. Niese, S. Rose, D. Uhlandt: Gaseinfluss bei MSG-Prozessen: Aktuelle Ergebnisse. DVS Congress, Berlin, 2014 (Status: angenommen, 03/14)

G. Gött und D. Uhlandt: How to convert high-speed images of a welding arc in to time-resolved 2D temperature profiles. International Institute of Welding, Study Group 212 "The Physics of Welding", Annual Assembly, Seoul, 2014 (Status: angenommen 05/14)

13 Projektbegleitender Ausschuss

Air Liquide Deutschland GmbH
Herr C. Kaya
Fütingsweg 34
47805 Krefeld

Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH
Herr H. Metzger
Kiesacker
35418 Buseck

AUDI AG
Herr D. Rudolph
Postfach 1144
74148 Neckarsulm

CFX Berlin Software GmbH
Herr Dr. A. Spille-Kohoff
Karl-Marx-Allee 90 A
10243 Berlin

Drahtzug Stein
Frau Dr. I. Raffeis
Talstraße 2
67317 Altleiningen

EWM Hightec Welding GmbH
Herr M. Hübner
Dr.-Günter-Henle-Str. 8
56271 Mündersbach

Kjellberg Finsterwalde
Herr H. Schuster
Leipziger Str. 82
03238 Finsterwalde

Kurt Haufe Schweißtechnik GmbH & Co. KG
Herr B. Kämmerer
Altlöbtau 9
01159 Dresden

Linde AG, Geschäftsbereich Linde Gas
Herr E. Siewert
Carl-von-Linde-Str. 25
85716 Unterschleissheim

Messer Group GmbH
Herr Dr. B. Hildebrandt
Gahlingspfad 31
47803 Krefeld

MIG Weld GmbH
Herr R. Lahnsteiner
Wattstraße 2
94405 Landau/Isar

OSCAR PLT GmbH
Herr Dr. M. Schnick
Hamburger Ring 11
01665 Klipphausen

Siemens AG
Herr H.-I. Schneider
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Volkswagen AG
Herr S. Herudek
Gifhorner Str. 180
38112 Braunschweig

Wir danken den im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses mitarbeitenden Firmen für die interessanten Diskussionen und Anregungen zur Projektdurchführung. Des Weiteren möchten wir uns bei allen Firmen bedanken, die das Projekt durch Sach- oder Dienstleistungen unterstützt und so zum Gelingen beigetragen haben.

Quellenverzeichnis

- [AGA1995] N. N.: Fact's about Mison-Schutzgase. Firmenschrift AGA-Gase GmbH, 1995
- [Air2011] <http://www.airproducts.com/NR/exeres/0F9377AF-886B-4489-A006-C4FE7659284A.htm> vom 11.03.2011
- [Bar1950] H. Bartels: Eine neue Methode zur Temperaturmessung an hochtemperierten Bogensäulen: I. Teil Z. Phys. 127 243–73 and 2. Teil Z. Phys. 128 546–74, 1950
- [Böh1990] D. Böhme: Gezielte Beeinflussung des Lichtbogenschweißprozesses in der Fertigung. DVS-Berichte Band 127, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [Bri2008] F. Briand et al.: Experimental investigations of the arc in MIG-MAG welding, SG 212, IIW Doc.212-1123-08, Proc. of IIW Meeting, 2008
- [Car2009] K. R. Carpenter et al: Influence of Shielding Gas on Fume Formation Rates for Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Plain Carbon Steel. Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference, 2009
- [Con1959] W. M. Conn: Die technische Physik der Lichtbogenschweissung einschliesslich der Schweissmittel, Springer Verlag, 1959
- [Dil1994] U. Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren. VDI-Verlag, 1994
- [Dil2006] U. Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien. Band 1, 2006
- [Eic1981] F. Eichhorn et al: Untersuchungen der Entstehung gesundheitsgefährdender Schweißrauche beim Lichtbogenhandschweißen und Schutzgasschweißen. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf, 1981
- [Fow1923] R. H. Fowler und E. A. Milne: The intensities of absorption lines in stellar spectra, and the temperatures and pressures in the reversing layers of stars Mon. Not. R. Astron. Soc. 83 403–24, 1923
- [Fow1924] R. H. Fowler und E. A. Milne: The maxima of absorption lines in stellar spectra (second paper) Mon. Not. R. Astron. Soc. 84 499–515, 1924
- [Fri1963] W. Frie: Entmischungseffekte bei Gemischen ionisierender Atomgase. Zeitschrift für Physik, Band 172, pp. 99 - 117, 1963

- [Füs2010] U. Füssel: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung, Abschlussbericht IGF 15.774 B, 2010
- [Her2012] M. Hertel, M. Schnick, S. Jäckel und U. Füssel: Numerische Simulation des MSG-Lichtbogens und des Werkstoffübergangs. DVS-Berichte Band 275, Große Schweißtechnische Tagung 2011, 2012
- [Lah1991] R. Lahnsteiner: Welding of high-tensile steels with the T.I.M.E. process. IIW/IIS Doc XII-1263-91. 1991
- [Lar1951] R. W. Larenz: Über ein Verfahren zur Messung sehr hoher Temperaturen in nahezu durchlässigen Bogensäulen. Z. Phys. 129 327–42. 1951
- [Low1974] J. J. Lowke: Predictions of arc temperature profiles using approximate emission coefficients for radiation losses. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Band 14, S. 111-122, 1974
- [Ma2008] S. Ma, H. Gao, L. Wu und S. Zheng: Time and spatially resolved spectroscopic measurement of temperatures in a free-burning arc by monochromatic imaging. Meas. Sci. Technol. 19 105602, 2008
- [Mur2001] A. B. Murphy: Thermal plasmas in gas mixtures. Journal of Physics D: Applied Physics, Band 34, S. R151-R173, 2001
- [Ols1963] H. N. Olsen: The electric arc as a light source for quantitative spectroscopy. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 3 305–33, 1963
- [Pat1958] Gesellschaft für Linde's Eismaschinen Aktiengesellschaft: Schutzgasgemisch zum Lichtbogenschweißen mit einer abschmelzenden Blankdrahtelektrode. Deutsches Patent 1 073 660, 1958
- [Rou2010] M. E. Rouffet et al.: Spectroscopic investigation of the high-current phase of a pulsed GMAW process. Journal of Physics D: Applied Physics 43, 2010
- [Sch2009] M. Schnick et al: Metal vapour causes a central minimum in arc temperature in gas-metal arc welding through increased radiative emission. J. Phys. D: Appl. Phys., Band 43, Nr. 2, 2009
- [Sch2010] M. Schnick et al: Modelling of gas-metal arc welding taking into account metal vapour. J. Phys. D: Appl. Phys. 43 434008, 2010

- [Sch2011] M. Schnick: Numerische und experimentelle Verfahrens- und Brennerentwicklung beim Plasmalichtbogenschweißen. Dissertation Technische Universität Dresden, 2011
- [Ste1993] V. Stenke: Besonderheiten und Eigenschaften von Mehrkomponentengasen in der Schweißtechnik. DVS Berichte 155, DVS-Verlag, 1993
- [Sie2013] E. Siewert et al.: Determination of enthalpy, temperature, surface tension and geometry of the material transfer in PGMAW for the system argon–iron. J. Phys. D: Appl. Phys., Bd. 46, 2013
- [Sub2001] M. Suban et al.: Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. Journal of Materials Processing Technology 119, 2001
- [Tan2007] M. Tanaka und J. J. Lowke: Predictions of weld pool profiles using plasma physics. Journal of Physics D: Applied Physics, Band 40, 2007
- [Tan2009] M. Tanaka, H. Sawato, S. Tashiro et al: Measurements and visualizations of 2D Temperature of Arc Plasma from a Monochromator with High-speed Video Camera. (Singapore: IIW) (IIW Doc.212- 1145-09), 2009
- [Tru2001] S. Trube et al.: Schutzgase zum Schweißen und Formieren von CrNi-Stählen. Jahrbuch Schweißtechnik 2001, DVS-Verlag, 2001
- [Mat2008] K.-J. Matthes: Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Hanser Fachbuch, 2008
- [Ros2010] S. Rose et al: Ansätze zur Emissionsreduzierung beim MSG-Impulsschweißen. Große Schweißtechnische Tagung, Hamburg, 2010
- [Rou2010] M. E. Rouffet, M. Wendt, G. Goett, R. Kozakov, H. Schöpp, K. D. Weltmann, D. Uhrlandt: Spectroscopic investigation of the high-current phase of a pulsed GMAW process. Journal of Physics D: Applied Physics, Band 43, 2010
- [Wie1991] W. L. Wiese: Spectroscopic diagnostics of low temperature plasmas: techniques and required data. Spectrochim. Acta B 46B 831–41, 1991
- [Zie2007] S. Zielińska et al.: Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy. Plasma Sources Sci. Technol. 16, 2007

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Beispiele für die quantitative Beschreibung von Schutzgaseigenschaften [Böh1990]	7
Abbildung 5.1: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Sprühlichtbogenprozesses mit einer Abschmelzleistung von 13 m/min bei einer mittleren Stromstärke von 350 A für verschiedene Schutzgaszusammensetzungen	16
Abbildung 5.2: Variation der Spannung an der Stromquelle für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon (rechts: Detailansicht im geringen Zumischungsbereich).....	17
Abbildung 5.3: Vorgehensweise bei der Digitalisierung der Drahtkontur und des Metaldampfkerns aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	17
Abbildung 5.4: Variation der zeitlich gemittelten Form des Unduloids und des Metaldampfkerns für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	19
Abbildung 5.5: Variation der Eintrittsfläche der Tropfen in das Schmelzbad für unterschiedliche Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon	20
Abbildung 5.6: Versuchsaufbau mit Lichtbogen fixiert im Zentrum und ausgerichteter Diagnostik.....	21
Abbildung 5.7: Beispielhafte Gegenüberstellung von HG-Bild und orts aufgelöstem Spektrum	23
Abbildung 5.8: Temperaturprofile und entsprechende HG-Bilder für verschiedene Gasgemische.....	23
Abbildung 5.9: Übersichtsspektrum über einen Sprühlichtbogen	25
Abbildung 5.10: Übersichtsspektrum über einen Sprühlichtbogen	26
Abbildung 5.11: Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit Metalinterferenzfilter bei 811 nm.....	26
Abbildung 5.12: HG-Aufnahme und resultierendes Temperaturbild	27

Abbildung 5.13: HG-Aufnahme und resultierendes Temperaturbild	28
Abbildung 5.14: Lichtbogenlänge (links) und Ansatzlänge (rechts)	29
Abbildung 5.15: einzelnes 2D-T-Profil aus HG-Aufnahme (links), Mittelwert (Mitte) und Standardabweichung (rechts) aus Sequenz.....	30
Abbildung 5.16: Standardabweichung für die Mischungen Ar mit Molekülgasanteil: von links 1 % O ₂ , 2,5 % CO ₂ , 8 % O ₂ und 18 % CO ₂	30
Abbildung 5.17: Vergleich zweier kurz aufeinander folgender 2D-T-Profile.....	31
Abbildung 5.18: Vergleich zweier kurz aufeinander folgender 2D-T-Profile.....	32
Abbildung 5.19: Mittlere Lichtbogenlänge für den Kurzlichtbogen.....	32
Abbildung 5.20: 2D-Temperaturverteilung im MSG-Lichtbogen für unterschiedliche Zumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	34
Abbildung 5.21: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	35
Abbildung 5.22: Breite der Wärmeeinflusszone für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon	36
Abbildung 5.23: HG-Aufnahmen des Nahtaufbaus für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	36
Abbildung 5.24: Einbrandtiefe für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	37
Abbildung 5.25: Nahthöhe für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	38
Abbildung 5.26: Aufgeschmolzene Fläche des Grundwerkstoffs (oben) und elektrische Leistung bezogen auf die aufgeschmolzene Fläche des Grundwerkstoffs (unten) für unterschiedliche Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	39

Abbildung 5.27: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für dreikomponentige Schutzgase aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Argon im Vergleich zu ein- und zweikomponentigen Schutzgasgemischungen aus Argon und Kohlenstoffdioxid	40
Abbildung 5.28: Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone für dreikomponentige Schutzgase aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Argon im Vergleich zu ein- und zweikomponentigen Schutzgasgemischungen aus Argon und Kohlenstoffdioxid	40
Abbildung 6.1: Berechnungsgebiet des numerischen Lichtbogenmodells	41
Abbildung 6.2: Temperaturabhängige thermische (oben) und elektrische (unten) Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des Metaldampfanteils (links) und des CO ₂ -Anteils (rechts).....	44
Abbildung 6.3: Durch numerische Simulation berechnete (links) und durch OES-Messungen bestimmte (rechts) radiale Temperaturprofile 3 mm oberhalb des Werkstücks für unterschiedliche Zumischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon	45
Abbildung 6.4: Einfluss von Kohlenstoffdioxid im Schutzgas auf die Struktur und die Eigenschaften des MSG-Lichtbogens	46
Abbildung 6.5: Berechnete Verteilungen der Plasmatemperatur (links oben), des molaren Eisenanteils (rechts oben), der Strömungsgeschwindigkeit (links unten) und der Druckverteilung (rechts unten) im Sprühlichtbogen, Hintergrund: Grauschattierung in Abhängigkeit der Strahlungsemission	47
Abbildung 6.6: Thermische und elektrische Leitfähigkeit von 100 % Argon und 100 % Eisen im Vergleich zu binären Mischungen aus Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon.....	50
Abbildung 6.7: Berechneter Wärmestrom in die Drahtelektrode und in das Werkstück (oben) und maximaler Lichtbogendruck an der Drahtunterseite und auf der Werkstückoberfläche (unten) für unterschiedliche Schutzgasgemischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Helium und Wasserstoff zu Argon	52
Abbildung 6.8: Einfluss der Verdampfung gegenüber den thermophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Temperaturverteilung im Lichtbogen für unterschiedliche Schutzgasgemischungen von Kohlenstoffdioxid zu Argon	54

Abbildung 7.1: Einfluss unterschiedlicher Schutzgaszumischungen von Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Helium zu Argon in Abhängigkeit der Zumischung	56
Abbildung 8.1: Kantenversatz (links), Ausrichtung des Schweißprozesses und Nahtaussehen für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dünnblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.1)	60
Abbildung 8.2: HG-Aufnahmen des Nahtaufbaus für ein Schutzgas aus 100 % Argon (links) und einem Schutzgas aus 18 % Kohlenstoffdioxid und 82 % Argon (rechts)61	
Abbildung 8.3: A-Maß (links) und Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone (rechts) für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dickblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.2)	61
Abbildung 8.4: Spezifische Aufschmelzleistung (links) und Nahtform, Schmelzlinie und Wärmeeinflusszone (rechts) für unterschiedliche ein- bis vierkomponentige Schutzgasmischungen der Dickblechanwendung (Parameter nach Tabelle 8.2)	62
Abbildung 8.5: Einfluss der Beimischung von Kohlenstoffdioxid zu Argon (links) und der Spannungskorrektur (rechts) auf das Einbrandprofil	62
Abbildung 9.1: Mehrlenker-Hinterachse PQ35 der Volkswagen AG, Quelle Originalbild: Volkswagen Aktiengesellschaft.....	63
Abbildung 9.2: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Übergangs- bzw. Langlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase bei der jeweils maximalen Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zur Standardanwendung (links oben)	64
Abbildung 9.3: Nahtaussehen der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Übergangs- bzw. Langlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase	65
Abbildung 9.4: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Sprühlichtbogen für unterschiedliche Schutzgase	66
Abbildung 9.5: Makroschliffe der Schweißung des Mehrlenkers mit dem Impulslichtbogen für unterschiedliche Schutzgase	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Angaben zum Schweißprozess.....	15
Tabelle 5.2:	Angaben zum Versuchsaufbau	15
Tabelle 5.3:	Untersuchte zweikomponentige Schutzgasgemische.....	16
Tabelle 5.4:	Zweiergemische mit Gasanteilen in Vol%	22
Tabelle 5.5:	Effekte bei verschiedenen Gasgemische am Sprühlichtbogen.....	33
Tabelle 6.1:	Energiebilanzen für die Drahtelektrode und das Werkstück für einen MSG-Sprühlichtbogenprozess mit 350 A unter 100 % Argon	52
Tabelle 8.1:	Angaben zum Schweißprozess der Dünoblechanwendung	59
Tabelle 8.2:	Angaben zum Schweißprozess der Dickblechanwendung	59
Tabelle 9.1:	Prozessparameter des Übergangslichtbogens.....	64
Tabelle 9.2:	Prozessparameter des Spühlichtbogens.....	66
Tabelle 9.3:	Prozessparameter des Impulslichtbogens.....	67
Tabelle 12.1:	Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum	74
Tabelle 12.2:	Geplante Transfermaßnahmen	75