

Abschlussbericht

Titel: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung

IGF-Nr.: 15.774 BR 1

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden
Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik
Professur Fügetechnik und Montage
01062 Dresden
Leiter der Forschungsstelle:
Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Laufzeit: 01.09.2008 – 31.08.2010

Dieses Forschungsvorhaben (IGF-Nr.: 15.774 BR 1) der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert.

Für die finanzielle Unterstützung unseres Vorhabens bedanken wir uns.

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift

Leiter der Forschungsstelle

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen.....	V
1 Zusammenfassung	1
2 Wissenschaftliche Problemstellung und Ausgangssituation	4
2.1 Wissenschaftliche Problemstellung.....	4
2.2 Stand der Technik: Schutzgase beim WIG-Schweißen.....	6
2.3 Stand der Technik: Diagnostische Untersuchungsmethoden für den Lichtbogen.....	7
2.4 Stand der Technik: Lichtbogensimulation	12
3 Zielstellung und Lösungsweg.....	16
4 Untersuchungsmethoden und erzielte Ergebnisse	18
4.1 Charakterisierung der Lichtbogeneigenschaften mittels Diagnostik.....	18
4.1.1 Verwendete Analysemethoden.....	18
4.1.2 Versuchsparameter	21
4.1.3 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf den Lichtbogenstaudruck	23
4.1.4 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf Energieeinbringung .	27
4.1.5 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf den physikalischen Wirkungsgrad	31
4.1.6 Einfluss weiterer Prozessparameter auf Staudruck, Gesamtwärme und Stromdichte (exemplarisch).....	33
4.1.7 Zusammenfassung	36
4.2 Erkennen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessgas und Lichtbogen mittels Simulation	38
4.2.1 Entwicklung eines geeigneten Simulationsmodells	38
4.2.1.1 Netz und Randbedingungen.....	38
4.2.1.2 Modellierung der WIG-Lichtbogensäule	39
4.2.1.3 Implementierung von Schutzgasgemischen – Demixingeffekte ..	40
4.2.1.4 Modellierung der Fallgebiete	42
4.2.2 Sensitivanalysen.....	49

4.2.2.1	Berechnung des Einflusses einzelner physikalischer Gaseigenschaften auf Lichtbogenstaudruck und Energieeintrag	49
4.2.2.2	Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArHe-Gasgemischen	52
4.2.2.3	Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArH ₂ -Gasgemischen	54
4.2.2.4	Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArN ₂ -Gasgemischen	58
4.2.3	Zusammenfassung	60
4.3	Gezieltes Ausnutzen der Prozessgaseigenschaften zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von WIG-Verfahren	62
4.3.1	Versuchsdurchführung	62
4.3.2	Einschweißversuche	63
4.3.2.1	Unlegierter Stahl S355	63
4.3.2.2	Austenitischer Werkstoff 1.4307	67
4.3.2.3	Duplexstahl 1.4462	70
4.3.3	Nutzung der Erkenntnisse zur Auswahl einer neuen Gasmischung ...	72
4.3.4	Verbindungsschweißungen an komplexeren Bauteilen	75
4.3.4.1	Aufschmelzen einer Plasmaschweißnaht	75
4.3.4.2	Rohr-Blech-Verbindung	76
4.4	Schlussfolgerungen für methodisches Vorgehen bei der Gasauswahl ..	77
4.4.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	77
4.4.2	Algorithmus für gezielte Gasauswahl	79
5	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung	81
6	Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)	83
6.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	83
6.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit	83
7	Erläuterungen zu Kostenaufteilung	85
7.1	Erläuterung zu Personaleinsatz	85

7.2 Erläuterung zu den Leistungen Dritter.....	85
8 Veröffentlichungen.....	86
9 Projektbegleitender Ausschuss.....	88
Anhang.....	IX
Literaturverzeichnis	IX
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	XII
Anlagenverzeichnis	XVIII

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Gasbestandteil A	
\vec{A}	magnetisches Vektorpotential	$\left(\begin{array}{l} \text{kg m}/(\text{A s}^2) \\ \text{kg m}/(\text{A s}^2) \\ \text{kg m}/(\text{A s}^2) \end{array} \right)$
\vec{B}	magnetische Flussdichte	T
B	Gasbestandteil B	
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J / (\text{kg K})$
D_a	ambipolarer Diffusionskoeffizient	m^2 / s
D_{AB}^E	kombinierter Diffusionskoeffizient für das elektrische Feld	$\text{m}^2 / (\text{V s})$
D_{AB}^p	kombinierter Diffusionskoeffizient für den Druck	m^2 / s
D_{AB}^T	kombinierter Diffusionskoeffizient für die Temperatur	$\text{kg} / (\text{m s})$
D_{AB}^x	kombinierter Diffusionskoeffizient für die Molfraktion	m^2 / s
D_e	Elektronen-Diffusionskoeffizient	m^2 / s
e	Elektronenladung	eV
\vec{E}	elektrisches Feld	$\left(\begin{array}{l} \text{Vm} \\ \text{Vm} \\ \text{Vm} \end{array} \right)$
f_L	Lorentzkraft	N
G	thermischer Ionisationsterm	mol / m^3
I	elektrische Stromstärke	A
j	skalare elektrische Stromdichte	A / m^2
\vec{j}	vektorielle elektrische Stromdichte	$\left(\begin{array}{l} A / \text{m}^2 \\ A / \text{m}^2 \\ A / \text{m}^2 \end{array} \right)$

\vec{J}_A	Gesamtmassenstrom	$\left(\begin{array}{l} \text{kg}/(\text{s m}^2) \\ \text{kg}/(\text{s m}^2) \\ \text{kg}/(\text{s m}^2) \end{array} \right)$
k_b	Boltzmann-Konstante	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$
\dot{m}	Massenstrom	kg / s
\bar{m}_A	durchschnittliche Schwerteilchenmasse der Komponente A	kg
\bar{m}_B	durchschnittliche Schwerteilchenmasse der Komponente B	kg
m_e	Elektronenmasse	kg
M	molare Masse	kg / mol
N	Teilchendichte	$1 / \text{m}^3$
N_0	Neutralteilchendichte im LTG	$1 / \text{m}^3$
N_e	Elektronendichte	$1 / \text{m}^3$
P_{el}	elektrische Leistung	W
p_{rel}	relativer Druck	Pa
p_s	Lichtbogenstaudruck	Pa
p_{tot}	totaler Druck	Pa
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m^2
S_{RH}	Widerstandserwärmung	W
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
U	elektrische Spannung	V
$U_{\text{Ionisierung}}$	Ionisierungspotential	V
v_{eH}	Geschwindigkeit von Elektronen und Schwerteilchen	m / s
v_{LB}	Strömungsgeschwindigkeit im Lichtbogen	m / s
v_S	Schweißgeschwindigkeit	m / s
x	molare Konzentration	mol / mol
α	Ionisationskoeffizient	$1 / \text{m}$
α	Elektroden spitzenwinkel	$^\circ$

γ	Elektronen-Ionen Rekombinationskoeffizient	m^3 / s
Δ	Differenzenoperator	
η	dynamische Viskosität	$Pa s$
η_{phys}	physikalischer Wirkungsgrad	
λ	thermische Leitfähigkeit	W / mK
μ_e	Elektronenmobilität	$m^2 / (V s)$
μ_0	magnetische Leitfähigkeit	H/m
ρ	Dichte	kg / m^3
σ	elektrische Leitfähigkeit	S / m
ω	Elektronendriftgeschwindigkeit	m / s
Φ	elektrisches Potential	V

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
CSM	Cathode spot mode
NM	Normal mode
LB	Lichtbogen
LBL	Lichtbogenlänge
LTG	lokales thermodynamisches Gleichgewicht
MHD	Magneto-Hydro-Dynamik
MIG	Metall-Inert-Gas
NEK	Nettoemissionskoeffizient
WIG	Wolfram-Inert-Gas

1 Zusammenfassung

Beim WIG-Schweißen werden in der Praxis überwiegend das inerte Schutzgas Argon oder Schutzgasgemische aus Argon mit Helium, Wasserstoff oder Stickstoff verwendet. Die Gasauswahl erfolgt gegenwärtig hauptsächlich aus werkstofftechnischen und nur teilweise aufgrund von verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Überlegungen. Bisher werden zur Gasauswahl Unterlagen der Gasehersteller oder der Fachausbildung verwendet. Aus den Erfahrungen ist bekannt, dass Wasserstoff- und Heliumzumischungen erhöhte Schweißgeschwindigkeiten im Vergleich zu Rein-Argon ermöglichen. In der Praxis ist die Auswahl einer geeigneten Schutzgasmischung jedoch mit einem hohen Aufwand zur Bestimmung der Verfahrensparameter und Anwendungsvorteile verbunden.

Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit schweißtechnischer Unternehmen ist es notwendig, die Verfahrensvorteile systematisch zu charakterisieren und somit Wettbewerbsvorteile durch das Anwenden spezieller Gasgemische aufzuzeigen. Im Rahmen des Vorhabens erfolgte eine umfassende Analyse der Wechselwirkungen zwischen der Schutzgaszusammensetzung und den Lichtbogeneigenschaften sowie dem Einbrandverhalten.

Dabei wurden durch Staudruck- und Energiedichtemessungen die Eigenschaften des Lichtbogens für Rein-Argon und Argon-Helium, -Wasserstoff und -Stickstoff charakterisiert, mittels Sensitivanalysen die physikalischen Ursachen erläutert und die Vorteile durch Schweißversuche gezeigt. Für die Sensitivanalysen wurde ein WIG-Lichtbogenansatzmodell entwickelt und angewendet. Dieses ermöglicht die numerische Analyse von unterschiedlichen Schutzgasmischungen, Stromstärken und Lichtbogenlängen. Folgende Wirk-Zusammenhänge wurden erkannt:

- Helium und Wasserstoff führen zu einer signifikanten Erhöhung des Energieeintrages in das Bauteil, der Einfluss von Stickstoff ist im Vergleich dazu gering. Der erhöhte Energieeintrag wird durch die erhöhte thermische Leitfähigkeit aller Schutzgaskomponenten sowie die Größen der inneren Energie bei den molekularen Gasen verursacht. Dies kann zur Erhöhung der Prozesswirtschaftlichkeit durch die Verdopplung bzw. sogar Verdreifachung der Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu Rein-Argon genutzt werden.

- Die Verringerung des Staudruckes ist bei heliumhaltigen Lichtbögen abhängig von der Lichtbogenlänge. Bei geringen Lichtbogenlängen von 2 mm sind Argon-ähnliche Staudrücke vorhanden. Durch die Erhöhung der Lichtbogenlänge tritt jedoch nahezu proportional zur Längenänderung eine Verringerung des Staudruckes ein. Diese Eigenschaft wird neben dem bereits bekannten Einfluss der Dichte v. a. durch die erhöhte Viskosität sowie höhere thermische Leitfähigkeit bei heliumhaltigen Gasen im Vergleich zu Rein-Argon verursacht. Für die Schweißpraxis kann dieser Effekt z. B. für das Schweißen von Werkstoffen mit geringer Viskosität genutzt werden, um infolge des geringeren Staudruckes Humpingeffekte zu verringern.
- Eine weitere Möglichkeit den Staudruck auch bei Rein-Argon zu beeinflussen, ist die Anpassung des Elektrodenanspitzwinkels. Bei 20 – 30° Anspitzwinkel ist das Maximum des Staudruckes vorhanden, durch eine Vergrößerung des Winkels kann jedoch der Staudruck gemindert werden.
- Die deutliche Erhöhung des Staudruckes bei wasserstoff- und stickstoffhaltigen Gasen wird durch deren Größen der inneren Energie sowie elektrische und thermische Leitfähigkeit hervorgerufen.
- Für den Einsatz von stickstoffhaltigen Gasgemischen muss aus den Untersuchungen geschlussfolgert werden, dass diese verfahrenstechnisch nur wenig Einfluss haben, sondern bei diesen Gasen der metallurgische Effekt zur Gewährleistung eines ausreichenden Austenitanteils bei Duplexstählen von Bedeutung ist.

Die Untersuchungen haben eindeutig den verfahrenstechnischen Vorteil beim Einsatz von Schutzgasgemischen für das WIG-Schweißen von Stahlwerkstoffen aufgezeigt. Dennoch wird in der Praxis oftmals auf den Einsatz von Schutzgasgemischen aufgrund der erhöhten Gaskosten verzichtet. Eine Recherche zu den Schweißnahtkosten zeigte jedoch, dass der Anteil an Kosten für die Schutzgase nur 1 - 2 % der Gesamtkosten beträgt. Daraus ist zu schlussfolgern, dass bei der Schutzgasauswahl auch die Vorteile von Gasgemischen bezüglich der Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit oder Verringerung der Schweißstromstärke bei konstanten Einbrandprofilen im Vergleich zu Argon berücksichtigt werden sollten.

Zur KMU-gerechten Aufbereitung der Ergebnisse wurde aus den Betrachtungen ein Algorithmus zur metallurgischen und verfahrenstechnischen Gasauswahl erarbeitet. Dieser soll das Verständnis der Anwender für den Einfluss der Schutzgase erhöhen und die Schutzgasauswahl erleichtern.

Neben den Anwendern profitieren die Hersteller technischer Gase von den Ergebnissen des durchgeführten Projektes. Sie können mit den nun wissenschaftlich belegten Zusammenhängen zwischen Schutzgas und Lichtbogeneigenschaften ihren Kunden das Potential der Gase besser und wissenschaftlich fundiert aufzeigen. Zum anderen können die Erkenntnisse bzw. das Simulationsmodell für die Entwicklung neuer Gase genutzt werden. Hierfür exemplarisch ist die Entwicklung eines WIG-Prozessgases, v. a. für das automatisierte Schweißen von austenitischen Werkstoffen. Das Gas ermöglicht eine erhebliche Steigerung der maximalen Schweißgeschwindigkeit gegenüber Argon und Argon-Helium bzw. Argon-Wasserstoff. Es ist festzustellen, dass diese Ergebnisse bei bzw. durch eine hohe Schweißstromstärke generiert werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Wissenschaftliche Problemstellung und Ausgangssituation

2.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Der WIG-Schweißprozess ist ein sowohl in der manuellen Fertigung in klein- und mittelständischen Unternehmen als auch in der automatisierten Serienfertigung häufig eingesetztes Schweißverfahren. Als Gründe dafür sind vor allem die sehr hohe Nahtqualität sowie der im Vergleich zu Strahlschweißverfahren einfache Aufbau und die geringen Investitionskosten zu nennen. Jedoch bedarf es aufgrund der weiterentwickelten Grundwerkstoffe, des zunehmenden Wettbewerbs sowie der steigenden Anforderungen an Fügeverbindungen einer Erweiterung der Anwendungsbereiche sowie einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des WIG-Verfahrens.

Der Lichtbogen bringt die Energie in den Grundwerkstoff ein und beeinflusst die Schmelzbadströmung. Um den steigenden Anforderungen der Praxis gerecht zu werden, ist es notwendig, den Fertigungsrandbedingungen durch spezifische Eigenschaften des Lichtbogens und des Energieeintrags ins Werkstück zu entsprechen. Hierzu werden größtenteils die Parameter Schweißstromstärke, Stromstärkeprofil sowie Elektrode angepasst. Das Schweißergebnis kann jedoch auch durch das Schutzgas gezielt beeinflusst werden.

Infolge der hohen Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Prozessgaszusammensetzung, Lichtbogeneigenschaften und Schmelzbadausbildung werden bisher bei einer Änderung des Schutzgases eine Vielzahl von Versuchen nach dem Trial-&-Error-Prinzip durchgeführt, um ein geeignetes Parameterfeld für die Anwendung zu bestimmen. Zur Minimierung bzw. Verringerung des Versuchsaufwands nutzen viele Unternehmen entweder Reingase oder Schutzgasmischungen, die aus den bisherigen Erfahrungen bekannt sind bzw. die ihnen von den Gaseherstellern empfohlen werden. Die Informationsbroschüren der Gaselieferanten oder die Ausbildungsunterlagen sind eine weitere Unterstützung für die Schutzgasauswahl durch die Schweißaufsichten in den Firmen. In diesen Unterlagen werden die metallurgischen Grenzen der Schutzgase aufgezeigt sowie die aus der Praxis bekannten Effekte, wie z. B. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit

und Einbrand, genannt. Nachteil dieser auch in Lehrunterlagen genutzten Erklärungen ist jedoch, dass die als Beispiele genutzten Versuche nur für eine bestimmte Parametervariation gelten, die nicht in jedem Fall auf andere Prozessrandbedingungen, wie z. B. Stromstärke, Lichtbogenlänge o. ä., verallgemeinert werden können.

Nachteilig ist vor allem, dass zwar an einzelnen Parametern der Einfluss von Gaseigenschaften auf das Schweißergebnis dokumentiert ist, jedoch der Einfluss auf das eigentliche Funktionselement des Schweißprozesses, den Lichtbogen, nicht verstanden ist. So können ähnliche Lichtbogeneigenschaften auf unterschiedlichen Werkstoffen auch unterschiedliche Schweißergebnisse hervorrufen. Folglich können Schweißversuche an verschiedenen Werkstoffen auch scheinbar widersprüchliche Ergebnisse liefern. Um diesen Widerspruch aufzulösen, ist es notwendig, die Eigenschaften des Lichtbogens und des Energieeintrages in das Werkstück in Abhängigkeit von den Prozessgasen unabhängig von den Werkstoffen zu analysieren. Diese Erkenntnisse ermöglichen eine zielgerichtete Auswahl von Prozessgasen. Dadurch sollen Unternehmen in die Lage versetzt werden, mit einem geminderten experimentellen Aufwand und unter Kenntnis des zu erwartenden Anwendernutzens die technologischen Vorteile kommerziell verfügbarer Prozessgasgemische zur Steigerung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit auszuschöpfen.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden experimentelle und numerische Methoden angewendet und mit Schweißversuchen kombiniert, um die Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim WIG-Schweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung zu analysieren. In den Kapiteln 2.2 bis 2.4 erfolgen eine umfassende Vorstellung der bekannten Analysemethoden sowie eine Diskussion der bereits dokumentierten Erkenntnisse. In Kapitel 3 wird hieraus der Forschungsbedarf konkretisiert. Eine Beschreibung der durchgeführten diagnostischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen sowie die Auswertung der Ergebnisse und Zusammenfassung ist in Kapitel 4 enthalten.

2.2 Stand der Technik: Schutzgase beim WIG-Schweißen

Beim WIG-Schweißen können für alle Grundwerkstoffe die Schutzgase Argon (Ar) und Helium (He) eingesetzt werden. Durch die Verwendung dieser inerten Gase werden Reaktionen mit dem Grundwerkstoff vermieden. Dabei ist Argon aufgrund des im Vergleich zu Helium geringen Preises sowie der guten Ionisierbarkeit das Standardschutzgas in Deutschland. Zumischungen von Helium führen zu einer Erhöhung des Energieeintrages und können die Prozessgeschwindigkeit erhöhen.

Des Weiteren kann durch die gezielte Zumischung von reaktiven Gasen die Metallurgie beeinflusst werden. Für austenitische Werkstoffe ist bekannt, dass Wasserstoff (H₂) als reduzierendes Gas eingesetzt werden kann und z. B. durch das Abbinden von Sauerstoff zu blanken Nahtoberflächen führt. Für Duplexstähle wird hingegen der Einsatz von Stickstoff (N₂)-haltigen Schutzgasgemischen empfohlen, da diese die Ferritphase unterdrücken und somit einen ausreichenden Austenitanteil im Grundwerkstoff gewährleisten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde in enger Absprache mit den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses der Einfluss der Schutzgase beim WIG-Schweißen an un- und hochlegierten Stahlwerkstoffen untersucht. Die aus metallurgischen Gesichtspunkten einsetzbaren Schutzgase sind in nachfolgender Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Übersicht: Einsatzmöglichkeiten von Schutzgasen für das WIG-Schweißen in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff

Stahlsorte	Beispiele für Stahlsorte	Ar	ArHe	ArH ₂	ArHeH ₂	ArN ₂
unlegierter Stahl	S355 (JR) - 1.0045 S235 (JR) - 1.0037	x	x			
Austenit	X 5 CrNi 18-10 - 1.4301 X 2 CrNi 18-9 - 1.4307	x	x	x	x	
Duplexstahl	X 2 CrNiMoN 22-5-3 - 1.4462	x	x			x

Neben diesen metallurgischen Effekten sind ähnlich wie bei Helium auch für die Verwendung von H₂- oder N₂- Zumischungen verfahrenstechnische Einflüsse aus der Praxis bekannt, wie z. B. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bei H₂- Zumischung oder Lichtbogenstabilisierung bei N₂-Zugaben. Unklar ist jedoch, wie diese Vorteile generiert und gezielt ausgenutzt werden können. Außerdem fehlt für Typenvertreter der un- und hochlegierten Stahlwerkstoffe eine Quantifizierung des Anwendervorteils zur Berücksichtigung in Kosten-Nutzen-Rechnungen.

2.3 Stand der Technik: Diagnostische Untersuchungsmethoden für den Lichtbogen

Zur Charakterisierung der Schmelzbadbeeinflussung durch den Lichtbogen können sowohl der Lichtbogenstaudruck als auch die elektrische Stromdichte und Wärmestromdichte messtechnisch erfasst werden. Über diese Kenngrößen können sowohl der Energieeintrag aber auch die Deformation der schmelzflüssigen Phase in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung abgeschätzt werden.

Mit Hilfe des Lichtbogenstaudrucks (p_s) sind entsprechend Gleichung (1) Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit im Lichtbogen (v_{LB}) möglich [1] [2].

$$p_{s_max} = \frac{1}{2} * \rho_{LB} * v_{LB}^2 \quad (1)$$

Der Staudruck von WIG-Lichtbögen wurde erstmals von LIN und EAGAR [3] untersucht. Als Standardparameter für die Messungen mit reinem Argon wurden eine Lichtbogenlänge von 8 mm und eine thorierte Elektrode mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet. Als Variationsparameter wurden der Anspitzwinkel (30°, 60° und 90°), die Lichtbogenlänge (2, 4 und 6 mm) sowie die Stromstärke (300 bis 600 A) ausgewählt. Die gewählten Stromstärkevariationen sind dabei für WIG-Anwendungen vergleichsweise hoch.

Die Ergebnisse zeigen, dass für reines Argon mit steigendem Anspitzwinkel der maximale Lichtbogenstaudruck sinkt und durch Erhöhung der Stromstärke der Staudruck jedoch steigt. Unklar ist, ob der Staudruck auch bei Spitzenwinkeln unter 30° weiter ansteigt oder ein Staudruckmaximum bei 30° identifiziert wurde. Hervorzuheben ist der Einfluss der Lichtbogenlänge. Entsprechend der Messungen von LIN und EAGAR [3] ist der Staudruck bei reinem Argon unabhängig von der Lichtbogenlänge.

Als weiteres Schutzgas wurde reines Helium untersucht. Dabei wurde bei den Standardparametern 300 A und 90° Elektrodenspitzenwinkel die Lichtbogenlänge zwischen 2 und 8 mm Lichtbogenlänge variiert. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verringerung des Staudruckes im Vergleich zu reinem Argon, wobei

sich der staudruckverringende Einfluss des Heliums mit zunehmender Lichtbogenlänge weiter erhöht [3] [6], vgl. Abbildung 2-1.

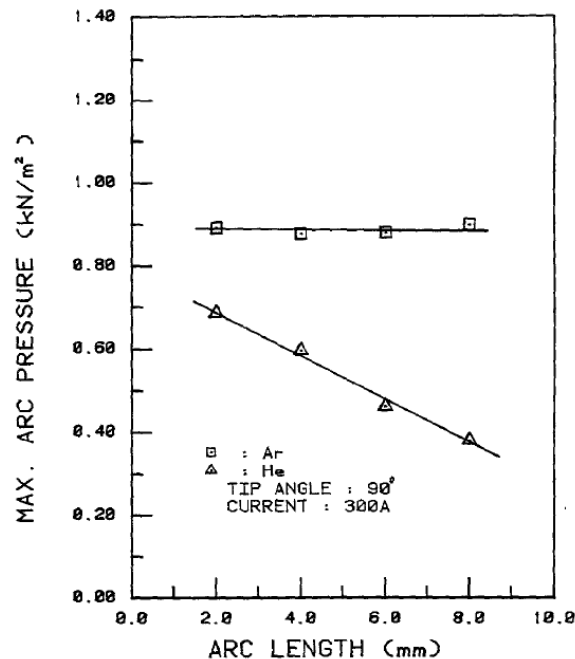


Abbildung 2-1: Einfluss der Lichtbogenlänge auf die Staudruckmaxima für Ar und He [3]

Die Arbeiten von LIN und EAGAR geben einen Überblick über das Staudruckverhalten von Argon-Lichtbögen sowie Aussagen zum Einfluss von Helium. Jedoch fehlen Untersuchungen mit ArHe-Gemischen, v. a. mit unterschiedlichen Stromstärken, sowie der Einfluss von H₂- und N₂-Zumischungen, welche gerade für austenitische und Duplexstähle oft Verwendung finden.

Zur Analyse der Wärme- und elektrischen Stromdichteverteilung wurde von NESTOR [4] das „Geteilte-Anoden-Verfahren“ entwickelt. Bei diesen Untersuchungen wurden alle Messungen in einer Kammer durchgeführt, die mit dem zu untersuchenden Schutzgas gefüllt war. Der Gasdruck in der Kammer betrug 790 mm Hg (≈ 105.000 Pa), als Elektrode wurde eine thorierte Wolframelektrode mit halbkugelförmiger (normal mode - NM) sowie 30° Spitze (cathode spot mode - CSM) und einem Durchmesser von 3,2 mm verwendet [4]. Die Stromstärke betrug 200 A. Hervorzuheben ist, dass in der umfangreichen Arbeit Ar-He-Gemische (2 % Ar und 98 % He), Ar-H₂-Gemische (91,4 % Ar + 8,6 % H₂) und Ar-N₂-Gemische (82,4 % Ar + 17,6 % N₂) analysiert und mit Rein-Argon verglichen wurden, vgl. Abbildung 2-2. Es wurde gezeigt, dass H₂- und N₂-

Zumischungen zu einer Erhöhung, He-Zumischungen jedoch zu einer Verringerung der maximalen Wärmestromdichte führen. Das Maximum der elektrischen Stromdichte wird hingegen sowohl durch He- als auch durch H₂ vermindert, N₂-Gehalte im Schutzgas wirken sich im Gegensatz dazu nicht auf die elektrische Stromdichte aus. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Versuche mit dem heliumhaltigen Gas aus Stabilitätsgründen mit der halbkugelförmig angeschliffenen Wolframelektrode (NM) durchgeführt wurden und somit nicht direkt vergleichbar sind.

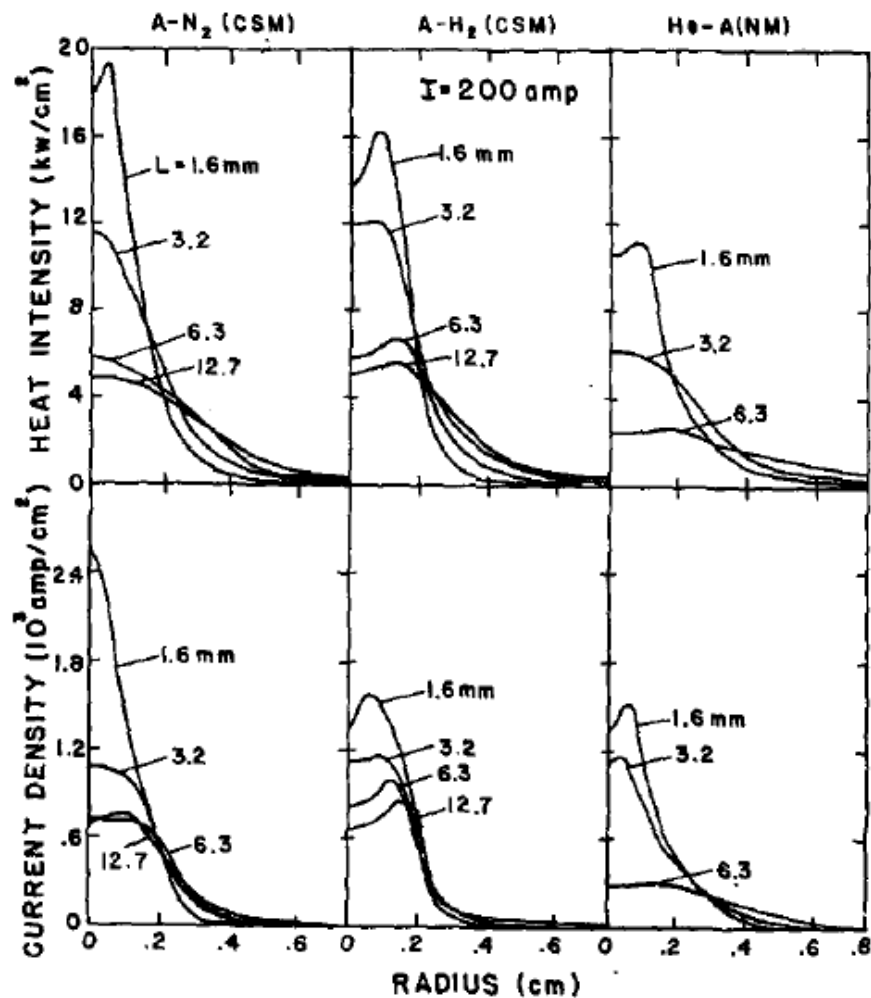


Abbildung 2-2: Einfluss der Lichtbogenlänge auf die Wärmestromdichte sowie elektrische Stromdichte für Ar-N₂ (17,6 % N₂), Ar-H₂ (8,6 % H₂) und Ar-He (98 % He) [4]

Des Weiteren ist zu bemerken, dass mit steigender Lichtbogenlänge die Maxima der elektrischen Stromdichte und der Wärmestromdichte sinken, vgl. Abbildung 2-2.

Hinsichtlich der Gesamtwärmeeinbringung der Gase, d. h. der Anodenleistung, wurde festgestellt, dass für alle untersuchten Gase die eingebrachte Leistung mit zunehmender Lichtbogenlänge steigt. Alle Schutzgaszusammensetzungen zum Basis-Gas Argon führen dabei im Vergleich zu reinem Argon zu einer Erhöhung der Energieeinbringung. Dieser Einfluss ist bei kleinen Lichtbogenlängen relativ gering, erhöht sich jedoch mit zunehmender Lichtbogenlänge, vgl. Abbildung 2-3.

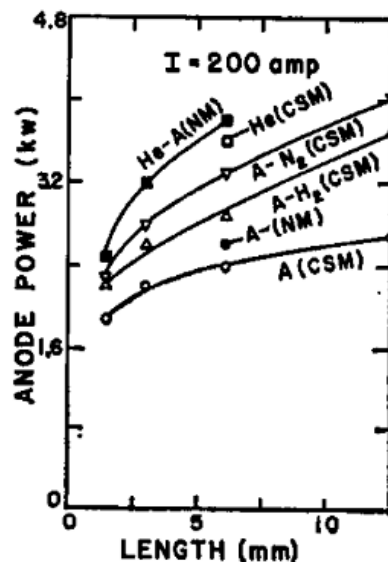


Abbildung 2-3: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Anodenleistung [4]

Durch TSAI und EAGAR [5] sowie TANAKA, TERASAKI und USHIO [7] wurden mit Hilfe des „Geteilten-Anoden-Verfahrens“ ebenfalls Messungen zur elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte durchgeführt. Dabei wurde in diesen Untersuchungen keine mit dem zu untersuchenden Schutzgas gefüllte Kammer verwendet, sondern – entsprechend den typischen Praxisanwendungen – ein WIG-Brenner mit reiner Wolframelektrode (Anspitzwinkel 75°). Für Rein-Ar wurde der Einfluss der Lichtbogenlänge und der Stromstärke untersucht. Die von NESTOR gefundenen Einflüsse wurden dabei bestätigt: die Stromstärke beeinflusst lediglich die maximale Wärmestromdichte im Lichtbogenzentrum, die Lichtbogenlänge führt im Gegensatz dazu auch zu Änderungen in der Verteilungsbreite [5] [7].

Hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Schutzgaszusammensetzungen wurden durch TSAI und EAGAR [5] Schutzgase mit 25 % bzw. 50 % Helium in Argon analysiert. Dabei wurde zum einen der Verlauf der Wärmestromdichte in

Abhängigkeit vom Radius und zum anderen aber auch die Verteilungsbreite zur Auswertung genutzt.

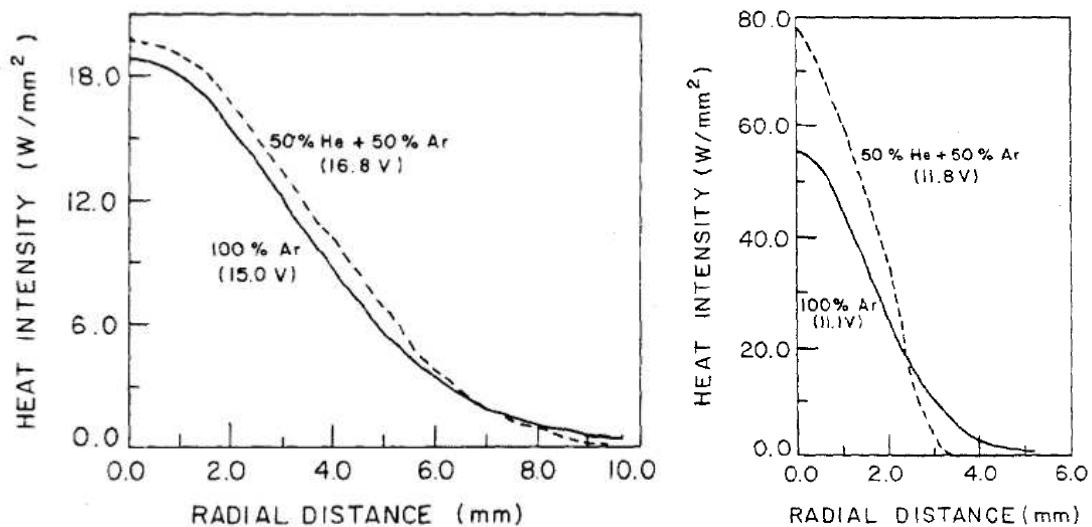


Abbildung 2-4: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung (100 % Ar; 50 % Ar + 50 % He) und Lichtbogenlänge (links: 9 mm LBL, rechts: 2 mm LBL) auf die Wärmestromdichte (100 A, 75° Anspitzwinkel) [5]

Die Messungen von TSAI und EAGAR [5] zeigen bei verschiedenen Lichtbogenlängen, dass Helium-Zumischungen zu einer Erhöhung des Wärmestromdichtemaximums und gleichzeitig zu einem schmaleren Lichtbogenprofil führen. Es ist zu schlussfolgern, dass bei Ar-He-Gemischen die Lichtbogenlänge einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung der Energieeinbringung hat. Weiterhin wird gezeigt, dass das Wärmestromdichteprofil bei Lichtbogenlängen kleiner als 5 mm im Vergleich zu Rein-Argon schmaler wird. Im Gegensatz dazu führen größere Abstände zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstück zu einer Verbreiterung des Wärmestromdichteprofiles.

In den beschriebenen Arbeiten wurden sehr umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Schweißparameter bei Verwendung eines Rein-Ar-Schutzgases sowie einige Analysen zum Einfluss von Helium als Gaskomponente durchgeführt. Allerdings wurde bisher ausschließlich mit konstanten Vorschubgeschwindigkeiten gearbeitet. Damit kann nicht in jedem Fall von einem thermisch stationären Prozesszustand ausgegangen werden.

Des Weiteren besteht Untersuchungsbedarf für ArH₂- sowie ArN₂-Gasgemische, welche für das WIG-Schweißen von austenitischen bzw. Duplexstählen Verwendung finden.

2.4 Stand der Technik: Lichtbogensimulation

Aufgrund der starken elektrischen Felder, der Strahlung sowie der hohen Temperaturen ist die messtechnische Erfassung der Lichtbogensäule sowie des Ansatzes an der Wolframelektrode mit einem sehr hohen versuchstechnischen Aufwand verbunden. Diese Restriktionen unterstreichen außerdem die hohe Bedeutung numerischer Modelle und Untersuchungsmethoden. Eine physikalisch komplexe und selbstkonsistente Prozesssimulation von Lichtbogenverfahren ermöglicht eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Analyse der Lichtbogeneigenschaften sowie der physikalischen Vorgänge im Lichtbogen.

Aufgrund der vergleichsweise einfachen physikalischen Vorgänge bei den WIG-Lichtbögen findet sich in der Literatur eine Vielzahl von numerischen Modellansätzen [9] [10]. Ursache hierfür ist vor allem die nichtabschmelzende und thermisch emittierende Wolframelektrode, so dass bei der Modellierung weder Tropfenübergang noch Metaldampf berücksichtigt werden müssen und auch die komplexen Effekte der Fallgebiete vereinfacht abgebildet werden können.

Für die WIG-Lichtbogensimulation sind die folgenden vier Teilmodelle notwendig:

1. Magneto-Hydrodynamik (MHD)
2. Fallgebiete
3. Eigenschaften des Plasmas
4. Mischgase und Entmischung

Der Lichtbogen kann in drei Gebiete unterteilt werden: Die Lichtbogensäule sowie den Fallgebieten an Kathode und Anode, vgl. Abbildung 2-5. Für die Lichtbogensäule ist es Stand des Wissens, MHD-Modelle zur Modellbeschreibung zu verwenden. In der Magneto-Hydrodynamik werden die Navier-Stokes-Gleichungen der Fluidmechanik und Hydrostatik mit den Maxwell-Gleichungen der Elektromagnetik gekoppelt. Durch diese Kombination können sowohl die

Strömungsverhältnisse im Lichtbogen als auch die elektromagnetischen Lichtbogengrößen (z. B. elektrischer Stromfluss, magnetische Felder, Elektronen-Ionen-Interaktionen, Widerstandserwärmung sowie Lorentzkraft). Für die Anwendung der MHD-Gleichungen wird vereinfachend ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTG) des Plasmas in der Lichtbogensäule angenommen. Das bedeutet unter anderem, dass die Schwerteilchen und Elektronen die gleiche Temperatur haben und ein Ladungsträgergleichgewicht herrscht, d. h. der Lichtbogen nach außen elektrisch neutral ist.

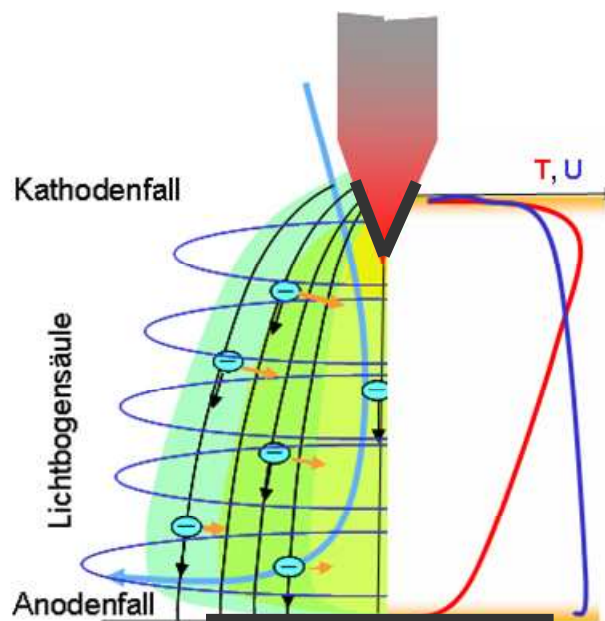


Abbildung 2-5: Prinzipielle Darstellung eines WIG-Lichtbogens

Der Übergang vom Lichtbogen zu den Elektroden wird als Fallgebiet (engl. *sheath region*) bezeichnet. In diesen Gebieten sind aufgrund der vergleichsweise geringen Anoden- und Kathodentemperatur sehr hohe Temperaturgradienten vorhanden. Infolge der geringen Temperaturen kann der Stromfluss nicht mehr über die elektrische Leitfähigkeit des Gases sondern durch eine Elektronen- und Ionendiffusion realisiert werden. Der Ladungsträgertransfer im Fallgebiet erfolgt durch die Konzentrationsunterschiede der Ladungsträger sowie durch die Wirkung von elektrischen Feldern.

Zur numerischen Modellierung der Fallgebiete sind in der Literatur verschiedene Ansätze dokumentiert.

- I. Durch LOWKE und TANAKA [11] sowie LAGO et al. [12] wird durch die Verwendung eines groben Gitters am Übergang des Lichtbogens zu den Elektroden eine so hohe Temperatur in den Gitterelementen der Fallgebiete generiert, dass das Plasma noch elektrisch leitfähig ist. Diese Vereinfachung vernachlässigt somit die Physik in den Fallgebieten vollständig. In der Arbeit von LOWKE und TANAKA [11] wird eine Elementhöhe für die erste Gitterschicht an den Elektroden angegeben, die die numerische Analyse eines WIG-Lichtbogens unter Rein-Ar sowie mit 200 A Stromstärke ermöglicht. Nachteilig ist jedoch, dass für andere Plasmazusammensetzungen oder Oberflächentemperaturen eine Anpassung des Gitters notwendig ist.
- II. Von LOWKE, MORROW und HAIDAR [13] sowie SANSONNENS et al. [14] wurde eine weitere Möglichkeit entwickelt, die Fallgebietsmechanismen numerisch abzubilden. Dabei werden im Fallgebiet mit Ausnahme der elektrischen Leitfähigkeit vereinfachend LTG-Plasmaeigenschaften angenommen und zusätzlich die Elektronendiffusion und -rekombination berücksichtigt. Die Modellannahmen beruhen darauf, dass die Abweichungen, die aus den unterschiedlichen Temperaturen der Schwerteilchen und Elektronen in den Fallgebieten sowie der Elektronen- und Ionenabsorption und -emission resultieren, einen geringeren Einfluss haben als die Effekte, die durch die Abweichung des Ionisationsgleichgewichtes hervorgerufen werden. Diese Modellierung bildet die physikalischen Effekte in den Fallgebieten komplexer als die Modelle in [11] und [12] ab. Ein weiterer Vorteil liegt in der Gitterunabhängigkeit des Ergebnisses. Eine hohe Netzauflösung im Bereich der Fallgebiete ermöglicht allerdings besonders bei Gasen mit molaren Bestandteilen eine bessere Abbildung des Wärmeübergangs.

In einer Vielzahl der WIG-Lichtbogenmodelle ist Rein-Ar als Schutzgas definiert. Die für die Praxis und die Aufgabenstellung relevanten Mischgase aus Argon mit Zumischungen von He, H₂ oder N₂ sind dagegen bisher kaum untersucht worden. Durch MURPHY et al. [15] und LOWKE et al. [16] wurde bereits der Einfluss der Schutzgasmischung auf den Lichtbogen analysiert. LOWKE et al. [16] untersuchten den Einfluss von H₂-Zumischungen, MURPHY et al. [15] neben H₂ auch den

Einfluss von Helium-Zumischungen. Defizite bei diesen Untersuchungen sind zum einen, dass die numerischen Ergebnisse zum Staudruck und der Energiedichte nicht mit experimentellen Daten validiert und diese Untersuchungen ausschließlich an 200 A Lichtbögen mit einer Lichtbogenlänge von 5 mm durchgeführt wurden. Um ein umfassendes Verständnis für den Einfluss der Schutzgase zu erhalten, ist jedoch die Untersuchung der Lichtbogeneigenschaften bei unterschiedlichen Schweißparametern notwendig. Des Weiteren ist auch die physikalische Komplexität der Modelle beschränkt. So werden die Vorgänge in den Fallgebieten über eine Gitteranpassung berücksichtigt und Entmischungseffekte (*engl. Demixing*) im Lichtbogen außer Acht gelassen. Schon seit den 70er Jahren ist jedoch durch die Arbeiten von FRIE [17] bekannt, dass im Lichtbogen aufgrund der Gradienten des Druckes, der Temperaturen, der molaren Anteile sowie des elektrischen Feldes Demixingvorgänge auftreten und zu einer Beeinflussung der Wärme- und Stromübertragung im Lichtbogen führen. SCHNICK [28] [29] [30], SPILLE-KOHOFF [18] und MURPHY et al. [19] [20] haben diese Effekte in numerischen Modellen zur Lichtbogensimulation berücksichtigt. In das im Rahmen des Projektes genutzte Modell sind diese Demixingeffekte implementiert.

3 Zielstellung und Lösungsweg

Aus der Praxis ist bekannt, dass beim WIG-Schweißen von Stahlwerkstoffen Rein-Ar- sowie ArHe-, ArH₂- und ArN₂-Gemische verwendet werden können. Dabei ist Rein-Ar das preisgünstigste Schutzgas, jedoch können durch die Zumischung weiterer Schutzgaskomponenten sowohl die Metallurgie (N₂: Sicherstellung eines ausreichenden Austenitanteils bei Duplexstählen) als auch verfahrenstechnische Parameter, d. h. Lichtbogenstaudruck sowie Energieeintrag, beeinflusst werden. Eine gezielte Schutzgasauswahl ist für den Anwender in der Praxis jedoch schwierig, da das Verständnis über die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Schutzgas, Lichtbogeneigenschaften und Schweißergebnis sehr komplex ist.

Bisher wurden entweder vereinzelte diagnostische Untersuchungen zum Lichtbogenverhalten durchgeführt, wobei vorrangig Rein-Ar sowie teilweise ArHe-Gemische untersucht wurden. Somit besteht zusätzlicher Forschungsbedarf für ArH₂- und ArN₂-Gemische. Weiterhin existieren numerische Untersuchungen zum Lichtbogenverhalten. Jedoch wurden diesen Untersuchungen ausschließlich bei einer Stromstärke von 200 A und 5 mm Lichtbogenlänge durchgeführt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse nicht mit experimentell ermittelten Daten validiert, so dass beispielsweise die Staudrucktendenzen für ArHe-Gemische nicht abgebildet werden können. Neben den diagnostischen und numerischen Untersuchungen sind Schweißversuche zum Einfluss der Schutzgase auf den WIG-Lichtbogen bekannt. Jedoch sind die Ergebnisse dieser Untersuchungsmethode auf den angewendeten Parametersatz beschränkt und erlauben nur eingeschränkt die Übertragung der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle.

Um das Prozessverständnis beim WIG-Schweißen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten zu erhöhen, werden im Rahmen des Projektes diagnostische, numerische und experimentelle Analysemethoden miteinander kombiniert, vgl. Abbildung 3-1. Mit Hilfe der diagnostischen Methoden werden die Lichtbogeneigenschaften am Fußpunkt, d. h. beim Übergang des Lichtbogens zum Werkstück charakterisiert. Diese Ergebnisse dienen anschließend zur Validierung des numerischen Modells. Dieses wird für Sensitivanalysen

verwendet. Ziel ist es dabei, das Verständnis über die Wechselwirkung zwischen Prozessgaszusammensetzung und Lichtbogeneigenschaften zu erhöhen. Nach diesen Untersuchungen zu den komplexen Einflussmechanismen wird im Rahmen von Schweißversuchen das Potential der gezielten Schutzgasauswahl für verschiedene praxisrelevante Anwendungsfälle aufgezeigt. Diese Versuche werden vor allem unter Berücksichtigung der für die industrielle Anwendung wichtigen Faktoren, d. h. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und Verbesserung der Nahtausbildung, durchgeführt.

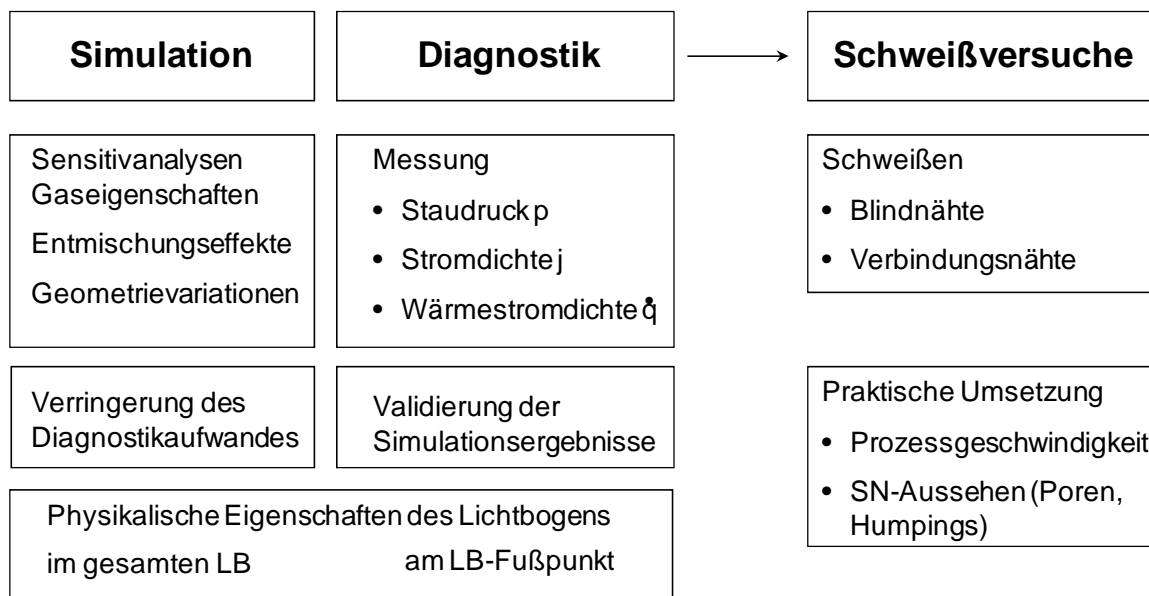


Abbildung 3-1: Konzept zur Projektdurchführung

Im Rahmen der folgenden Untersuchungen erfolgen außerdem eine Abschätzung des Wirtschaftlichkeitspotentials der Gaszusammensetzungen sowie eine Ergänzung des Algorithmus zur Auswahl der Schutzgase. In den Kapiteln 5 und 6 wird eine Bewertung der Ergebnisse gegenüber der Projektzielstellung und hinsichtlich des Nutzens zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von KMU durchgeführt.

4 Untersuchungsmethoden und erzielte Ergebnisse

4.1 Charakterisierung der Lichtbogeneigenschaften mittels Diagnostik

4.1.1 Verwendete Analysemethoden

Staudruckprüfstand

Der verwendete Staudruckprüfstand entspricht prinzipiell dem Versuchsaufbau von LIN und EAGAR [3]. In einer wassergekühlten Kupferplatte befindet sich senkrecht zur Oberfläche eine Bohrung, vgl. Abbildung 4-1 links. Über einen piezoresistiven Drucksensor, der an der Rückseite der Kupferplatte angebracht ist, wird der Staudruck des Lichtbogens messtechnisch erfasst. Dazu wird der WIG-Brenner mit konstantem Vorschub von über die Bohrung geführt und der gemessene Druck in Abhängigkeit vom Verfahrenweg aufgezeichnet [33].

Um das globale Staudruckmaximum zu erfassen und potentielle Fehler durch fehlerhafte Positionierung zu vermeiden, wird der Lichtbogenfußpunkt zweidimensional über der Messbohrung angerastert, vgl. Abbildung 4-1 rechts. Vorversuche zeigten, dass für eine vollständige Erfassung des Lichtbogendurchmessers die Gesamtverfahrenweite in x-Richtung 16 mm betragen muss. Des Weiteren zeigte sich, dass bei ausreichend exakter Vorpositionierung der Elektrode zur Messbohrung in y-Richtung eine Verfahrenbreite von 0,1 mm ausreichend ist.

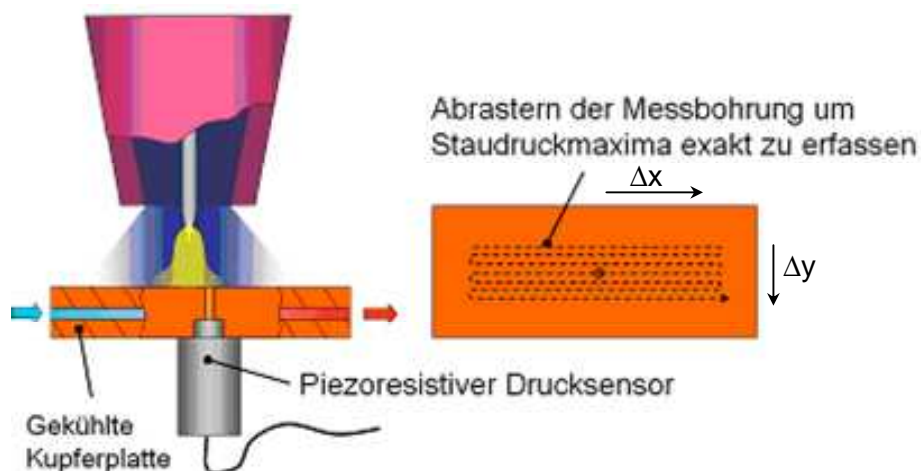


Abbildung 4-1: Prinzip der Staudruckmessung (links) und prinzipielles Verfahrensmuster (rechts)

Ein beispielhafter zweidimensionaler Staudruckverlauf ist in Abbildung 4-2 dargestellt, wobei hierbei auch in y-Richtung das vollständige Staudruckprofil aufgenommen wurde. Zur Versuchsauswertung wurde lediglich die Kurve mit dem Staudruckmaximum genutzt.

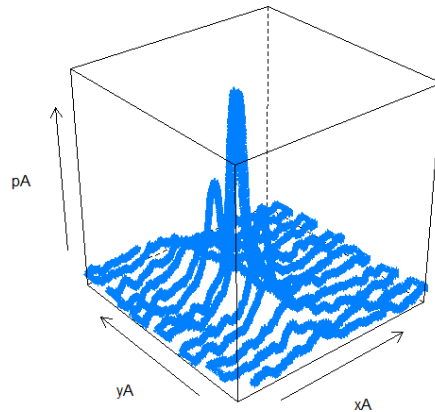


Abbildung 4-2: Beispielhafter Staudruckverlauf über x-y-Ebene

Hinsichtlich des Messbohrungsdurchmessers haben Voruntersuchungen [8] gezeigt, dass der Durchmesser der Messbohrung bei der Staudruckmessung einen entscheidenden Einfluss auf die Auflösung, d. h. vor allem auf das gemessene Staudruckmaximum, hat. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde der von LIN und EAGAR verwendete Messbohrungsdurchmesser von 1,0 mm für die vorliegende Arbeit auf 0,5 mm verringert. Ein zusätzlicher positiver Effekt des verringerten Durchmessers ist die Verminderung bzw. Vermeidung des Springens des Lichtbogens am Bohrungsrand.

Prüfstand zur Messung der elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte

In Anlehnung an den Versuchsaufbau von NESTOR [4] zur Messung der elektrischen Stromdichte und der Wärmestromdichte wird das Geteilte-Anoden-Verfahren auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt. Dazu werden zwei galvanisch und thermisch voneinander entkoppelte Kupferplatten verwendet. Der Lichtbogen wird senkrecht zur Trennebene über die Platten geführt, vgl. Abbildung 4-3.

Für aussagekräftige Ergebnisse ist ein stationärer Zustand in jedem Messpunkt notwendig. Hierzu wird durch die Steuerung der Gradient des Wärmeflusses

geprüft. Erst wenn dieser Gradient einen definierten Grenzwert unterschreitet, wird das Weiterverfahren des Brenners ausgelöst.

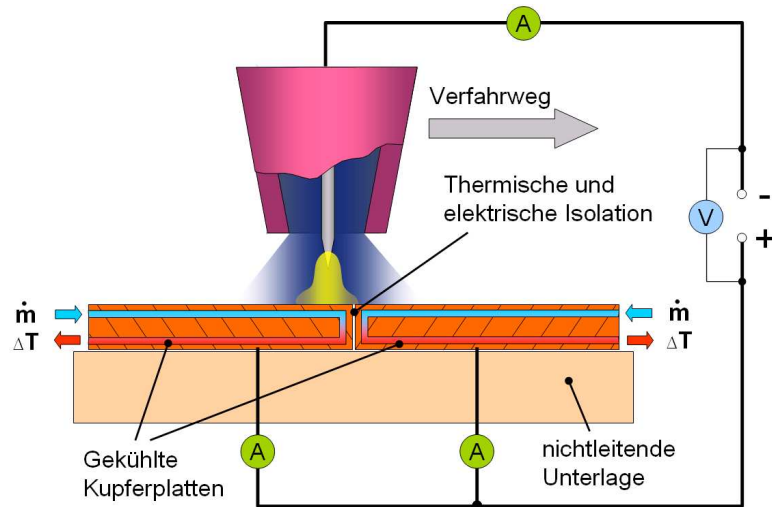


Abbildung 4-3: Versuchsaufbau für Messung der elektrischen und Wärmestromdichte

Mittels zweier LEM-Wandler werden die über die einzelnen Platten abgeführten elektrischen Ströme in Abhängigkeit des Verfahrwegs gemessen. Zur Bestimmung der Wärmestromdichte werden die Kühlwassermasseströme sowie die Temperaturdifferenz von Kühlwasserein- und -auslauf bestimmt. Die dadurch ermittelten Verteilungskurven sind in Abbildung 4-4 links dargestellt. Durch einen mathematischen Lösungsansatz, das sogenannte Abel-Integral, werden die elektrischen Ströme und Wärmeströme in Abhängigkeit vom Abstand zur Trennebene der Kupferplatten in eine radiale Stromdichteverteilung umgerechnet, vgl. Abbildung 4-4.

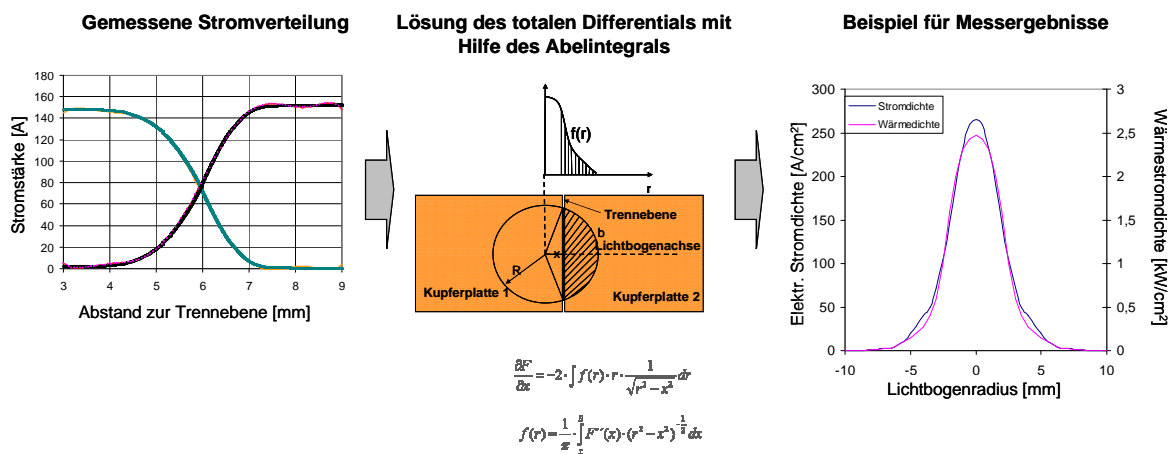


Abbildung 4-4: Auswertung der mittels des Geteilten-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen

4.1.2 Versuchsparameter

In der nachfolgenden Tabelle 4-1 sind die Standard- sowie Variationsparameter zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Standard- und Variationsparameter für diagnostische, numerische und experimentelle Untersuchungen

Parameter	Standard	Diagnostik	Simulation	Schweißversuche
1 Elektrode				
Typ	WLa15	WLa15	WLa15	WLa15
Durchmesser	3,2 mm	3,2 mm	3,2 mm	3,2 mm
Anspitzwinkel	30 °	10 - 90 °	30 °	30 °
Abplattungsdurchmesser der Elektrodenspitze	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm
2 Geometrische Parameter				
Lichtbogenlänge (Abstand Elektrode - Werkstück)	5 mm	2 mm, 5 mm, 8 mm	5 mm	2 mm, 5 mm, 8 mm
Elektrodenüberstand zur Schutzgasdüse	5 mm	5 mm	5 mm	5 mm
Schutzgasdüsendurchmesser	16 mm	16 mm	16 mm	16 mm
3 Schutzgase	Ar	Ar 100 % Ar 85 % He 15 % Ar 70 % He 30 % Ar 50 % He 50 % Ar 30 % He 70 % Ar 95 % H ₂ 5 % Ar 96 % He 3 % H ₂ 1 % Ar 98 % N ₂ 2 %	Ar 100 % Ar 30 % He 70 % Ar 90 % H ₂ 10 % Ar 98 % N ₂ 2 %	Ar 100 % Ar 70 % He 30 % Ar 50 % He 50 % Ar 30 % He 70 % Ar 98 % H ₂ 2 % Ar 95 % H ₂ 5 % Ar 96 % He 3 % H ₂ 1 % Ar 98 % N ₂ 2 %
4 Stromstärke	200 A	100 A, 200 A, 300 A	200 A	100 A, 200 A, 300 A
5 Vorschubgeschwindigkeit	25 cm/min	--	--	25 cm/min

Alle Versuche wurden an einer Schweißstromquelle EWM Tetrix 500 sowie mit einem wassergekühlten Maschinenbrenner BINZEL ABITIG MT 400W durchgeführt.

Das Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses verschiedener Schutzgaszusammensetzungen auf das Lichtbogenverhalten. Deswegen wurden für die Analysen in Absprache mit dem projektbegleitendem Ausschuss die im Folgenden dargestellten Schutzgasgemische verwendet. Da bei Gasen mit einer geringeren Dichte, v. a. He, entsprechend des DVS-Merkblattes 0913 [21] eine höhere Durchflussmenge verwendet werden muss, um Einwirbelungen von Atmosphärgasen zu vermeiden, wurden für die unterschiedlichen Prozessgase entsprechende Volumenströme verwendet:

<u>Bezeichnung in Arbeit</u>	<u>Normbezeichnung</u>		<u>Volumenstrom</u>
	DIN EN ISO 14175		
Ar 100 %	I1		10,0 l/min
Ar/He 85/15 %	I3	ArHe – 15	11,0 l/min
ArHe 70/30 %	I3	ArHe – 30	12,0 l/min
ArHe 50/50 %	I3	ArHe – 50	18,7 l/min
ArHe 30/70 %	I3	ArHe – 70	23,3 l/min
ArH ₂ 98/2 %	R1	ArH – 2	10,0 l/min
ArH ₂ 95/5 %	R1	ArH – 5	10,0 l/min
ArH ₂ 90/10 %	R1	ArH – 10	10,0 l/min
ArN ₂ 98/2 %	N2	ArN – 2	10,0 l/min
ArHeH ₂ 96/3/1 %	R1	HeH – 3/1	10 l/min

Da aus der Praxis bekannt ist, dass neben der Variation der Prozessgaszusammensetzung vor allem auch die verwendete Lichtbogenlänge sowie die Stromstärke einen großen Einfluss auf das Lichtbogenverhalten haben, wurden diese beiden Parameter in den nachfolgend aufgeführten Bereichen variiert:

Stromstärke:	100, 200 und 300 A
Lichtbogenlänge:	2, 5 und 8 mm

Die Lichtbogenlänge von 8 mm wurde dabei gewählt, um einen möglichst großen Bereich bis zu sehr selten in der Praxis eingesetzten Lichtbogenlängen zu untersuchen.

Zur Auswertung wurden bei den diagnostischen Untersuchungen der Staudruck, der Gesamtwärmestrom, die Wärmestromdichte, die elektrische Stromdichte und der physikalische Wirkungsgrad bestimmt. Aufgrund der Aussagefähigkeit für die Praxis sowie der Reproduzierbarkeit wird für die Auswertung vorrangig der Staudruck und der Gesamtwärmestrom genutzt. Der physikalische Wirkungsgrad ergibt sich aus dem gemessenen Gesamtwärmestrom im Verhältnis zur zugeführten elektrischen Leistung entsprechend nachfolgender Gleichung:

$$\eta_{\text{phys}} = \frac{\dot{Q}}{P_{\text{el}}} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{U \cdot I} \quad (2)$$

Für den Spannungswert wird dabei der an der Stromquelle abgelesene Spannungswert um den experimentell ermittelten Spannungsabfall im Masse- und Brennerkabel reduziert. Die Übergangswiderstände im Schweißbrenner sowie an den Masseanschlüssen werden vernachlässigt.

Aufgrund der in Voruntersuchungen [8] nachgewiesenen sehr hohen Reproduzierbarkeit der verwendeten zuverlässigen Diagnostikmethoden konnte der Umfang der diagnostischen Untersuchungen auf jeweils 3 Versuche reduziert werden. Bei den praktischen Schweißversuchen wurden dagegen 5 Versuche je Parametervariation durchgeführt, um auch hier eine statistische Absicherung der Versuchsergebnisse zu garantieren.

4.1.3 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf den Lichtbogenstaudruck

Der Lichtbogenstaudruck gibt den Druck an, den der Lichtbogen auf die Oberfläche des Schmelzbades ausübt. In der nachfolgenden Abbildung 4-5 ist der Einfluss von He-Zumischungen auf den Staudruck im Vergleich zu Rein-Ar dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass He-Zumischungen zu einer Verringerung des Staudruckmaximas führen, außerhalb eines Lichtbogenradius' von 1,5 mm der Verlauf der Staudruckkurve jedoch nahezu unabhängig vom verwendeten Schutzgas ist. Zur Diskussion der weiteren Staudruckauswertungen kann daher das Staudruckmaximum verwendet werden, vgl. Abbildung 4-5 rechts.

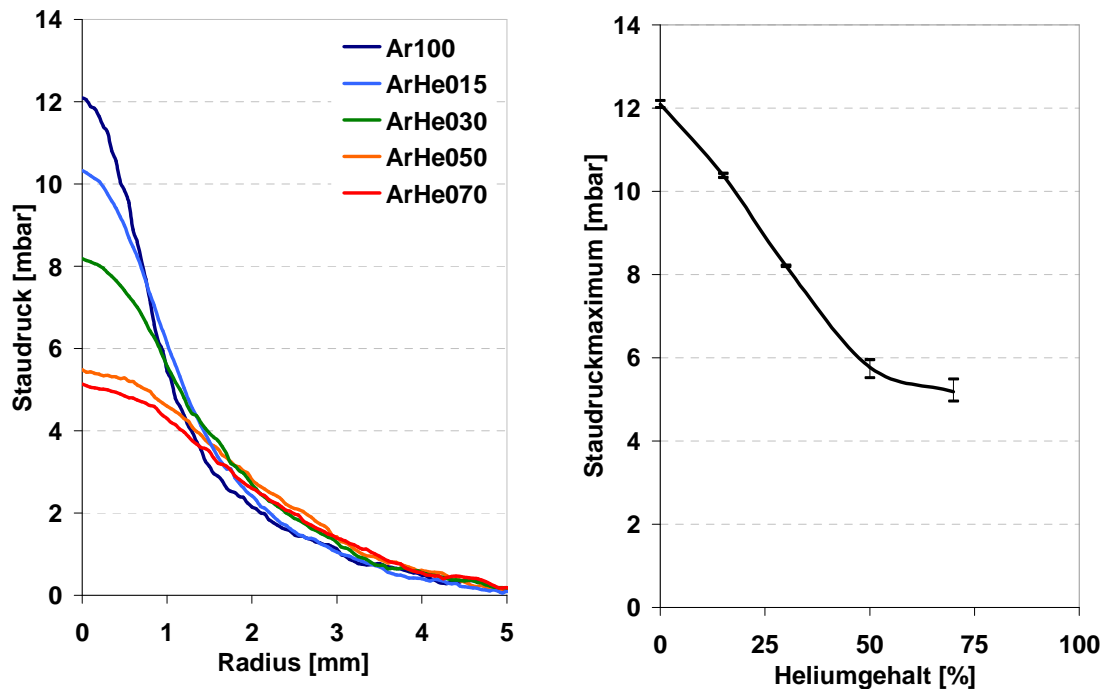


Abbildung 4-5: Einfluss von He-Zumischungen auf den Staudruck (links: Staudruckprofil in Abhängigkeit vom Lichtbogenradius, rechts: Zusammenfassung der Staudruckmaxima)

In Abbildung 4-6 ist der Einfluss der Lichtbogenlänge auf das Staudruckmaximum in Abhängigkeit von der Lichtbogenlänge für Rein-Ar sowie He-, H₂- und N₂-Zumischungen dargestellt. Entgegen den Ergebnissen von LIN und EAGAR [3] wurde dabei auch für Rein-Ar ein Einfluss der Lichtbogenlänge auf den Staudruck festgestellt. Mit Erhöhung der Lichtbogenlänge von 2 auf 5 mm steigt der Staudruck um ca. 10 %, eine weitere Steigerung des Abstandes der Elektrode zum Werkstück führt allerdings zu keiner weiteren Erhöhung.

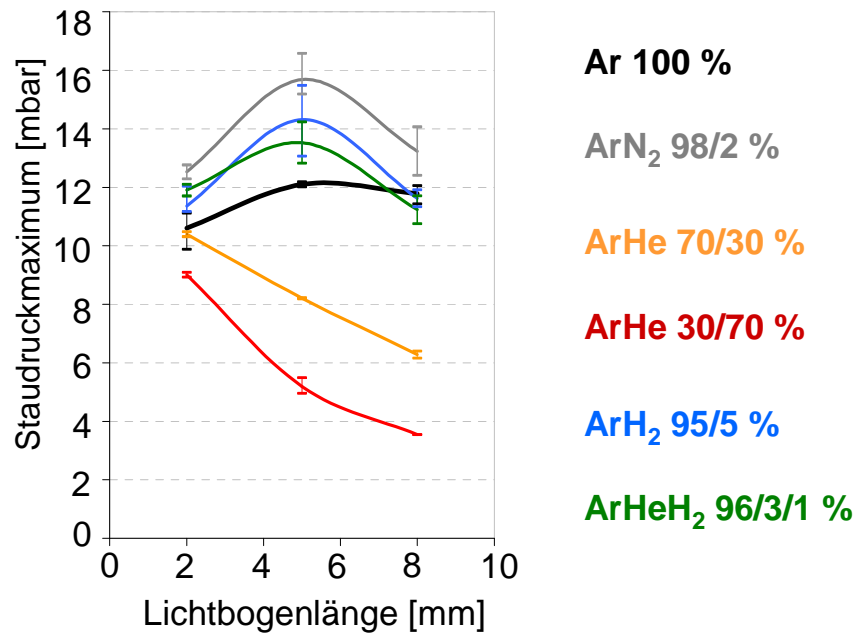


Abbildung 4-6: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Staudruckmaximum ($I = 200 \text{ A}$)

Weiterhin wurde festgestellt, dass lediglich heliumhaltige Mischgase eine Verringerung des Staudruckmaximums im Lichtbogenzentrum verursachen. Dieser Einfluss ist dabei abhängig von der Lichtbogenlänge: bei einem kurzen Lichtbogen (2 mm) ist die staudruckvermindernde Wirkung noch gering, mit zunehmender Lichtbogenlänge verringert sich der Staudruck jedoch sehr deutlich, vgl. Abbildung 4-6. Diese Ergebnisse bestätigen die Untersuchungen von LIN und EAGAR [3]. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass sich der Staudruck etwa indirekt proportional zum He-Gehalt im Schutzgas verhält. Deutlich wird dies v. a. bei einer Lichtbogenlänge von 5 mm. Hier führen 30 % He-Zumischungen zu Ar zu einer Staudruckminderung um etwa 30 %, 70 % He zu einer Verringerung des p_{S_max} um über 60 %.

Für die Praxis kann hieraus abgeleitet werden, dass He-Zumischungen gezielt entsprechend der Werkstoff- und Bauteileigenschaften ausgewählt werden können. Ist ein tiefer Einbrand gefordert, d. h. ein hoher Staudruck notwendig, können ArHe-Gemische mit geringen Lichtbogenlängen verwendet werden. Falls jedoch ein Werkstoff mit einer geringen Viskosität der Schmelze geschweißt und Humpingeefekte vermieden werden müssen, kann der Staudruck durch He-Zumischungen und die Einstellung eines langen Lichtbogens ($LB > 5 \text{ mm}$) gezielt verringert werden.

Im Gegensatz zu ArHe-Gemischen führen H₂- und N₂-Zumischungen im Schutzgas zu einer Erhöhung des Maximums des Staudruckes, vgl. Abbildung 4-6. Dabei ist signifikant, dass sowohl bei ArH₂ 95/5 als auch bei ArN₂ 98/2 die maximalen Staudrücke bei einer Lichtbogenlänge von 5 mm festgestellt wurden. Zusätzlich hervorzuheben ist der Einfluss von Stickstoff: 2 % N₂ erhöhen den Staudruck deutlich stärker als 5 % H₂.

Das untersuchte dreikomponentige Gasgemisch aus Ar, 3 % He und 1 % H₂ weist ähnliche Staudrücke wie das 5 %-H₂-haltige Argon-Gas auf. Hervorzuheben ist, dass das dreikomponentige Gas bei einer Lichtbogenlänge von 2 mm geringfügig höhere Staudruckwerte als ArHe 95/5 aufweist. Daraus ist für die Praxis zum einen zu schließen, dass der positive Einfluss der Gase erst bei höheren Lichtbogenlängen zum Tragen kommt (bei den molekularen Gasen v. a. bei 5 mm LBL) und zum anderen, dass bereits 1 % H₂-Zumischung die Eigenschaften des Lichtbogens stark beeinflusst.

Die Untersuchungen mit variierten Stromstärken zeigen ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den Lichtbogenstaudruck. Der Staudruck steigt mit zunehmender Stromstärke für alle Schutzgase, vgl. Abbildung 4-7. Des Weiteren sind auch bei diesen Untersuchungen die bereits beschriebenen Tendenzen der untersuchten Schutzgase zu erkennen:

1. He verringert die Staudruckminderung.
2. H₂- und N₂-haltige Schutzgase erhöhen den Staudruck.

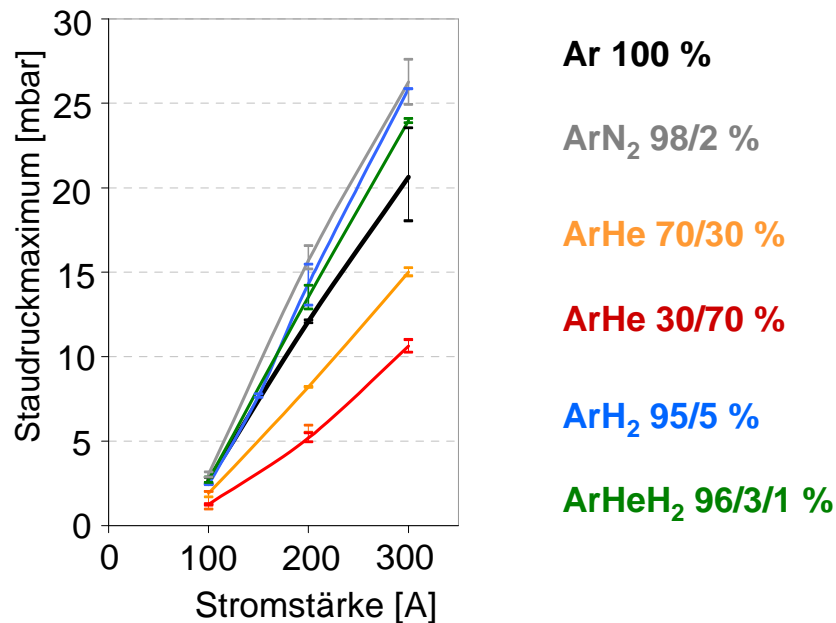


Abbildung 4-7: Einfluss der Stromstärke auf Staudruckmaximum (LBL = 5 mm)

Wie die Untersuchungen mit variiertem Lichtbogenlänge zeigten auch die Untersuchungen mit variiertem Stromstärke, dass eine Beimischung von 2 % N₂ einen stärkeren Einfluss auf den Staudruck als 5 % H₂ hat. Prozentual betrachtet bleiben mit steigender Stromstärke die Verhältnisse zwischen den einzelnen Gasgemischen nahezu konstant. Ein geringerer Staudruck ist hierbei als weicher Lichtbogen, ein hoher Staudruck als harter Lichtbogen zu beschreiben, wobei bekannt ist, dass ein harter Lichtbogen deutlich höhere Anforderungen an das manuelle Schweißen stellt.

4.1.4 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf Energieeinbringung

Neben dem Staudruck ist die Energieeinbringung eine wichtige Eigenschaft des Lichtbogens, die Schmelzbadgröße oder bei konstanter Schmelzbadgröße die maximale Schweißgeschwindigkeiten beeinflusst.

Im Gegensatz zu den Messungen zum Staudruck zeigen die Messdaten der elektrischen und v. a. der Wärmestromdichteverteilungen deutlich höhere Streuungen. Diese Streuungen werden v. a. durch die hohe Sensitivität der Auswertemethode (Abel-Integral, vgl. 4.1.1) bei der Bestimmung der Nulllinie

verursacht. Aufgrund dieser Unsicherheit wurde in den Auswertungen vorrangig die diagnostisch sehr gut ermittelbare Gesamtwärme zur Abschätzung des Lichtbogenverhaltens genutzt. In den nachfolgenden Abbildungen ist der Einfluss der Lichtbogenlänge (Abbildung 4-8), der Stromstärke (Abbildung 4-9) sowie der Lichtbogenspannung (Abbildung 4-10) auf die Gesamtenergieeinbringung durch den Lichtbogen dargestellt.

Bei Betrachtung des Einflusses der Lichtbogenlänge sowie der Stromstärke zeigt sich, dass alle Prozessgaszumischungen zu einer Erhöhung der Gesamtwärme im Vergleich zu Rein-Ar führen. Entsprechend der Messungen mit dem Geteilten-Anoden-Verfahren zeigt sich auch hier die Dominanz von He-Beimischungen und der deutlich geringere Einfluss von N_2 - und H_2 -Zumischungen sowie des untersuchten dreikomponentigen Gases.

Dieses diagnostische Ergebnis steht zunächst im Widerspruch zu den bekannten Effekten aus der Praxis. Durch die numerischen und experimentellen Analysen im Kapitel 4.3.2.2 können die Messergebnisse jedoch plausibel begründet werden.

Die Messungen mit steigender Lichtbogenlänge zeigen, dass der Gesamtenergieeintrag unabhängig von der Schutzgaszusammensetzung steigt, vgl. Abbildung 4-8. Durch die normierte Betrachtung, vgl. Abbildung 4-8 rechts, zeigt sich jedoch deutlich, dass nur bei den He-haltigen Gasen sowie dem ArH_2 -Gasgemisch mit 5 % H_2 mit großer Lichtbogenlänge eine im Vergleich zu Rein-Ar Erhöhung der Energieeinbringung vorhanden ist.

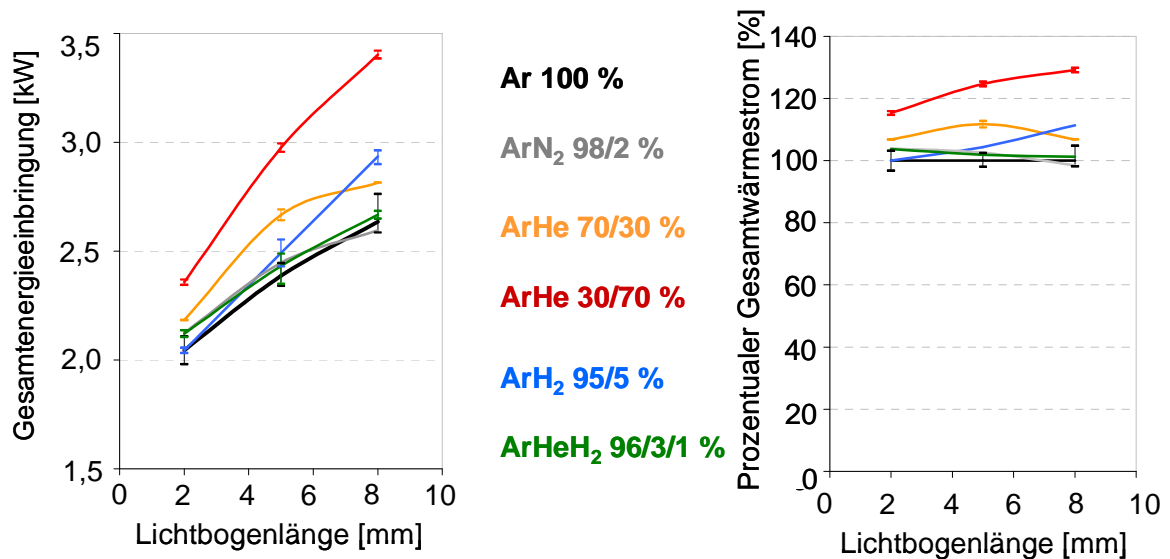


Abbildung 4-8: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Gesamtwärme (links) und normierte Darstellung des Gesamtwärmestroms (rechts) ($I = 200$ A)

Mit steigender Stromstärke steigt die Gesamtennergieeinbringung bei allen untersuchten Gasen, vgl. Abbildung 4-9. Erkennbar ist dabei wiederum der hohe Einfluss des He auf den Energieeintrag. Die Erhöhung der eingebrachten Wärme ist nahezu proportional zum He-Gehalt des Schutzgases ist.

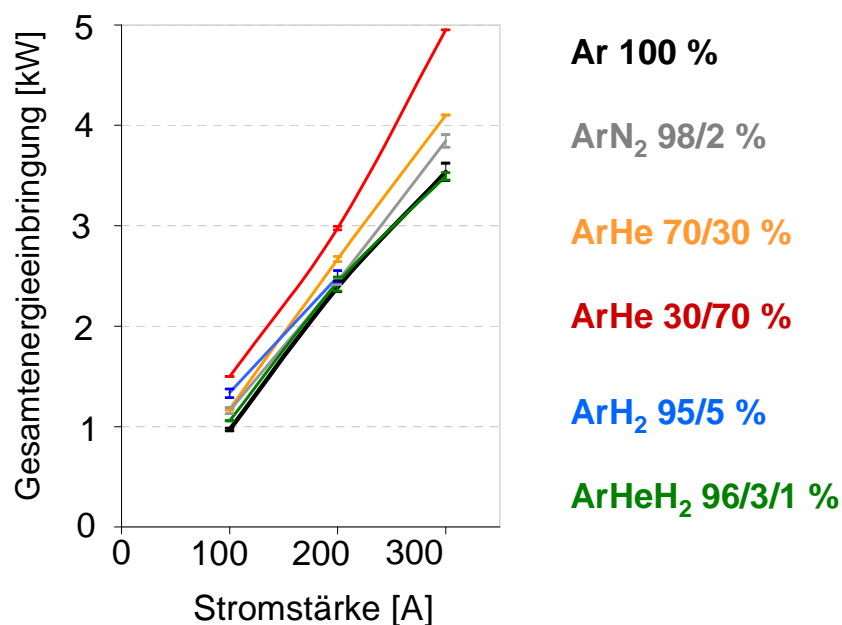


Abbildung 4-9: Einfluss der Stromstärke auf die Gesamtwärme (LBL = 5 mm)

Die Erhöhung der Gesamtennergieeinbringung kann zum einen durch einen höheren Wärmeeintrag in das Bauteil infolge der physikalischen Eigenschaften

(z. B. thermische Leitfähigkeit) des Schutzgases, zum anderen aber auch aufgrund des höheren Spannungsabfalls bei konstanter Lichtbogenlänge durch unterschiedliche Ionisationsenergien hervorgerufen werden. Zur Überprüfung des Einflusses der Ionisationsspannung der einzelnen Gaskomponenten wurden deshalb Versuche durchgeführt, bei denen die Lichtbogenspannung konstant gehalten und nur die Lichtbogenlänge entsprechend variiert wurde, vgl. Abbildung 4-10. Dabei wurde zu Beginn der Versuche für Rein-Ar der Spannungsabfall über den Lichtbogen bei 2, 5 und 8 mm Lichtbogenlänge ermittelt. Diese Spannungen wurden anschließend für die Schutzgasgemische durch eine entsprechende Variation der Lichtbogenlänge eingestellt. Die ermittelten Lichtbogenlängen sind in Abbildung 4-10 rechts dargestellt. Lediglich bei einer Zumischung von 2 % N_2 wurde eine sehr geringe Erhöhung der für die Spannung notwendigen Lichtbogenlänge festgestellt. H_2 - und He-Komponenten führen dagegen aufgrund der höheren Ionisationsenergie zu geringeren Lichtbogenlängen bei konstanten Spannungen.

Die Betrachtung der Gesamtenergieeinbringung in Abhängigkeit von der Lichtbogenspannung zeigt, dass nur beim ArHe-Gemisch 30/70 auch bei gleichen Lichtbogenspannungen, d. h. geringeren Lichtbogenlängen, eine deutliche Erhöhung der Gesamtenergieeinbringung bei Spannungen über ca. 13 V (dies entspricht einer LBL von 2 mm bei Rein-Ar) im Vergleich zu Rein-Ar vorhanden ist. Das H_2 -Gemisch weist lediglich ab einer Lichtbogenspannung von ca. 15 V eine geringe Erhöhung der Energieeinbringung auf. Dieses Ergebnis ist jedoch, wie bereits beschrieben, nicht konsistent mit den praktischen Erfahrungen aus den Schweißversuchen und wird in Kapitel 4.3 noch einmal aufgegriffen.

Für die untersuchten ArN_2 -, $ArHeH_2$ -, ArH_2 - und ArHe-Mischgase ist im Vergleich zu Rein-Ar bei geringen Spannungen kein erhöhter Energieeintrag feststellbar. Daraus ist zu schlussfolgern, dass bei geringen Lichtbogenlängen der erhöhte Energieeintrag der Prozessgasgemische infolge der erhöhten Ionisierbarkeit der Schutzgaskomponenten He und H_2 verursacht wird. Mit zunehmender Lichtbogenlänge gewinnen weitere Eigenschaften der Schutzgaskomponenten an Bedeutung und führen zu einer Erhöhung der Energieeinbringung, vgl. Kapitel 4.2.2. Daraus ist zu folgern, dass die positiven Einflüsse der Schutzgas-

komponenten He und H₂ wie z. B. Vergrößerung des Einbrandes oder der Schweißgeschwindigkeit v. a. bei hohen Lichtbogenlängen durch die Kombination mehrerer Gaseigenschaften zum Tragen kommt. Die höhere Ionisierbarkeit der Schutzgaskomponenten allein genügt nicht zur Erklärung dieser Effekte.

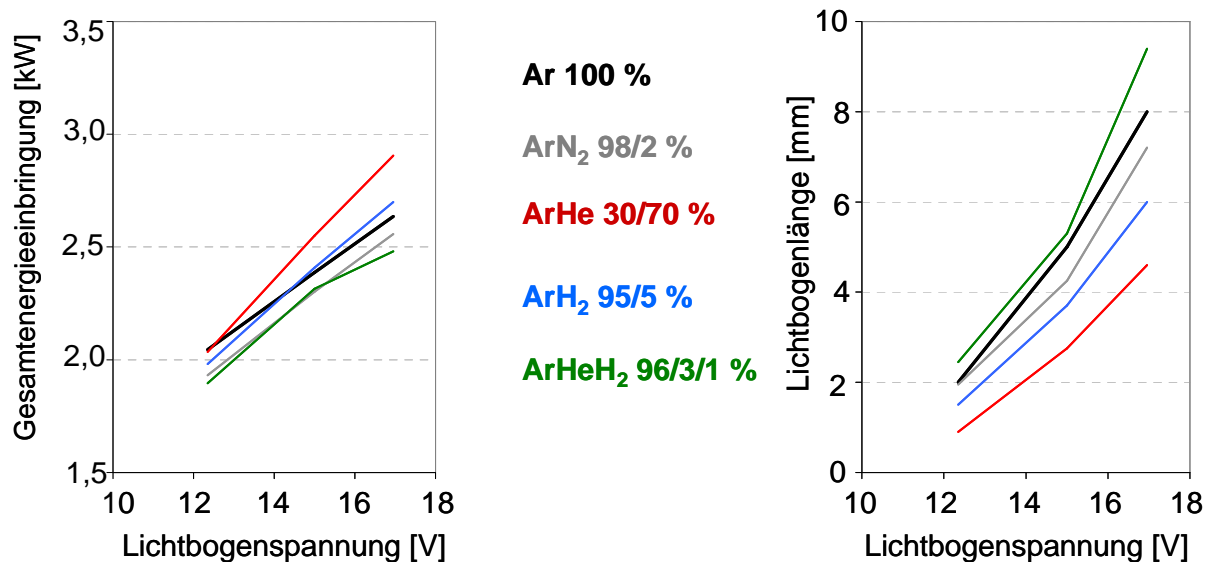


Abbildung 4-10: Einfluss der Lichtbogenspannung auf den Gesamtenergieeintrag (links), Einfluss der Lichtbogenspannung auf Lichtbogenlänge (rechts) ($I = 200 \text{ A}$)

4.1.5 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf den physikalischen Wirkungsgrad

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete physikalische Wirkungsgrad berechnet sich aus der gemessenen Gesamtwärme im Verhältnis zur zugeführten elektrischen Leistung, vgl. Kapitel 4.1.2. Die folgenden Diagramme zeigen, dass WIG-Prozesse Wirkungsgrade deutlich über 70 % erreichen können, vgl. Abbildung 4-11. Bei fast allen Schutzgasen sinkt der Wirkungsgrad mit steigender Lichtbogenlänge. Die einzige Ausnahme stellen He-haltige Gase dar, bei denen der Wirkungsgrad nahezu unabhängig von der Lichtbogenlänge ein ist.

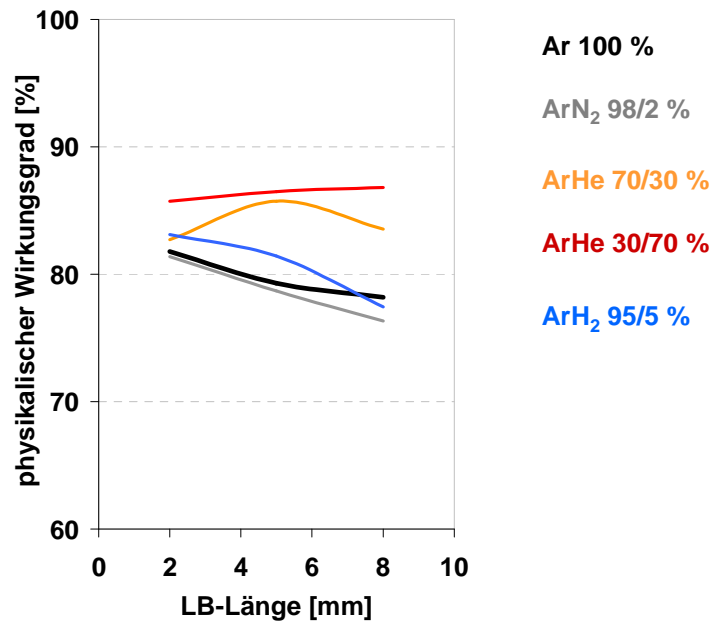


Abbildung 4-11: Einfluss der Prozessgaszusammensetzung und Lichtbogenlänge auf den physikalischen Wirkungsgrad (I = 200 A)

Hinsichtlich des Einflusses der Stromstärke ist für alle Schutzgase eine Verringerung des physikalischen Wirkungsgrades mit zunehmender Stromstärke zu verzeichnen, vgl. Abbildung 4-12. Auch bei dieser Betrachtung werden die genannten Tendenzen erkannt: He-Zumischungen erhöhen den Wirkungsgrad signifikant, H₂-Anteile nur gering. Hervorzuheben ist jedoch, dass bei dieser Betrachtung auch N₂ im Vergleich zu Rein-Ar zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades, v. a. bei 100 und 300 A, führt.

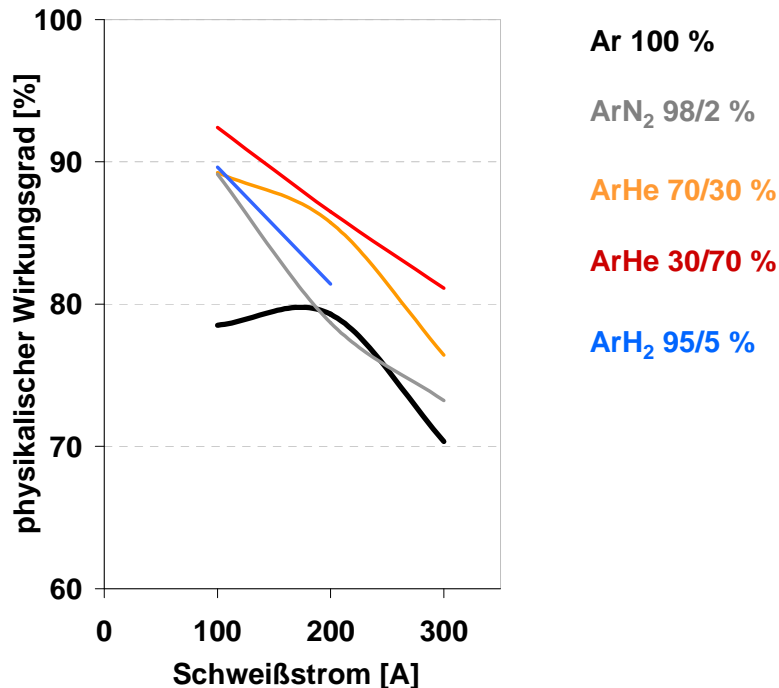


Abbildung 4-12: Einfluss der Prozessgaszusammensetzung und Stromstärke auf den physikalischen Wirkungsgrad (LBL = 5 mm)

4.1.6 Einfluss weiterer Prozessparameter auf Staudruck, Gesamtwärme und Stromdichte (exemplarisch)

Der Lichtbogenstaudruck wird neben den beiden bisher beschriebenen Einflussfaktoren auch durch den Anspitzwinkel der Wolframelektrode stark beeinflusst. Bisher wird von einem umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen dem Spitzenwinkel α und dem Staudruck ausgegangen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte dagegen sowohl für Rein-Ar als auch für das ArHe-Gemisch ArHe 30/70 ein Staudruckmaximum zwischen ca. 20 und 30° Anspitzwinkel nachgewiesen werden, vgl. Abbildung 4-13. Bei einer Verkleinerung bzw. auch Vergrößerung des Winkels treten unabhängig vom Schutzgas starke Verringerungen des Staudruckes auf.

Für die Praxis ist zu schlussfolgern, dass selbst bei Verwendung des preisgünstigen Rein-Ar-Schutzgases Humpingeefekte infolge eines zu hohen Lichtbogenstaudruckes durch die gezielte Auswahl des Elektrodenanspitzwinkels vermieden werden können. Da die H₂- und N₂-haltigen Schutzgase hinsichtlich

des Drucks am Lichtbogenfußpunkt ein dem Ar ähnliches Verhalten aufweisen, vgl. Kapitel 4.1.3, ist anzunehmen, dass auch bei diesen Gasen eine Druckverringerung bei vergrößertem Anspitzwinkel auftritt.

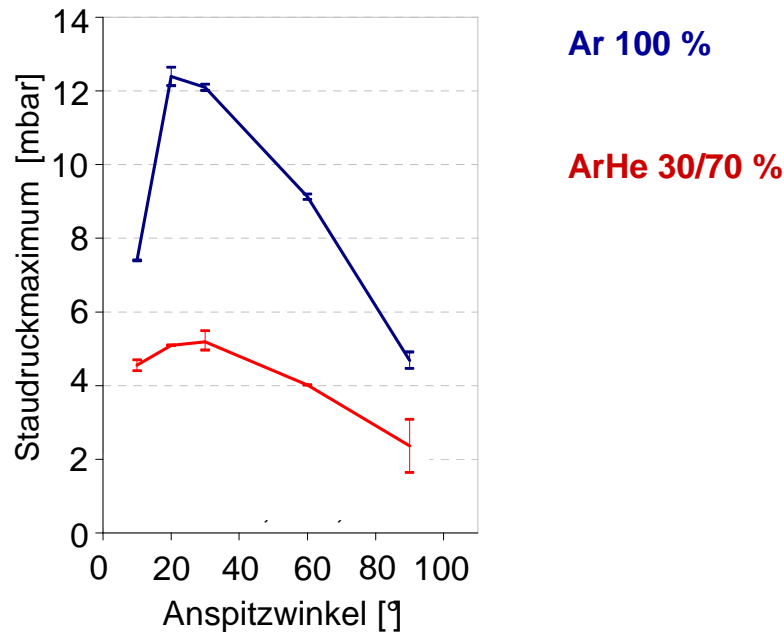


Abbildung 4-13: Einfluss des Elektrodenanspitzwinkels auf Lichtbogenstaudruck ($I = 200 \text{ A}$, $LBL = 5 \text{ mm}$, Elektrodendurchmesser: $3,2 \text{ mm}$)

Eine weitere Kenngröße des Energieeintrages ist die elektrische Stromdichte. Ähnlich dem Verhalten der Wärmestromdichte haben Untersuchungen gezeigt, dass sich die Kurvenverläufe der elektrischen Stromdichte im Maximum unterscheiden. Aufgrund dessen werden in nachfolgender Abbildung 4-14 nur die Maximalwerte dieser Messgröße angegeben. Eine hohe Stromdichte bedeutet prinzipiell hohe Lorentzkräfte, welche eine nach innen gerichtete Schmelzbadströmung verstärken.

Abbildung 4-14 zeigt, dass die Stromdichte bei ArHe-Gemischen im Vergleich zu Rein-Ar nur bei einer geringen Lichtbogenlänge von 2 mm deutlich größer ist. Mit zunehmender Lichtbogenlänge verringert sich die Differenz zwischen den Stromdichten von Rein-Ar und ArHe-Gemischen.

Es ist zu vermuten, dass die erhöhte Stromdichte bei geringer Lichtbogenlänge zu dem Ar-ähnlichen Staudruck bei diesen Lichtbogenparametern führen, vgl. Abbildung 4-6.

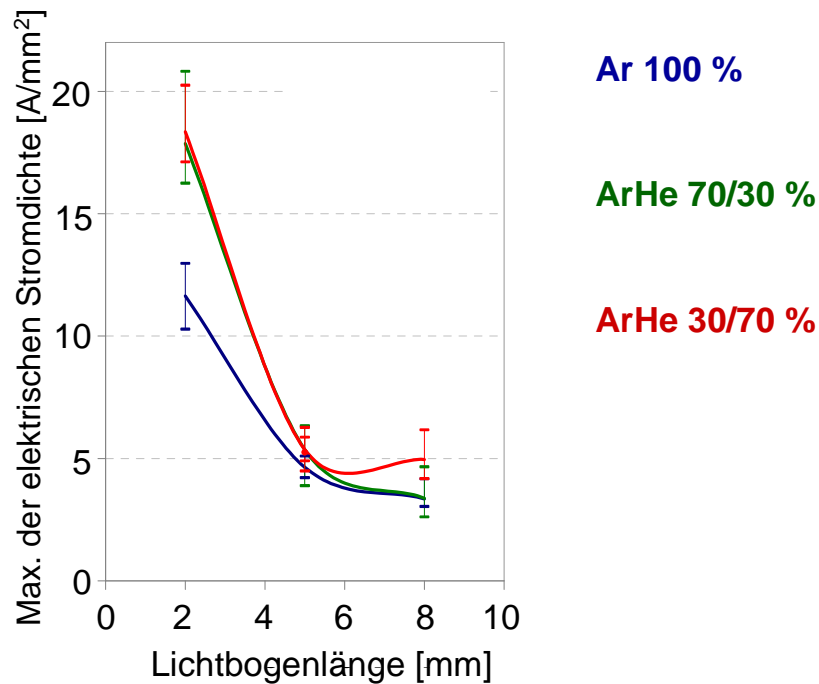


Abbildung 4-14: Einfluss der Lichtbogenlänge bei ArHe-Gasen auf die Maxima der elektrischen Stromdichten ($I = 200 \text{ A}$)

Zusätzlich wird die Gesamtwärme durch den Schutzgasvolumenstrom beeinflusst, vgl. Abbildung 4-15. Die dazugehörigen Versuche wurden durchgeführt, um den Einfluss der aufgrund der geringen Dichte von He notwendigen erhöhten Schutzgasvolumenströme auf die Lichtbogeneigenschaften abzuschätzen.

Die Versuche zeigen, dass im analysierten Variationsbereich für Rein-Ar keine Verringerung der eingebrachten Wärme und für das ArHe-Gemisch erst ab einem Schutzgasvolumenstrom über 20 l/min eine Verringerung der eingebrachten Wärme um ca. 0,1 kW bzw. 5 % eintritt. Daraus ist zu folgern, dass die unterschiedlichen Schutzgasvolumenströme in den Versuchsreihen keinen signifikanten Einfluss auf die Lichtbogeneigenschaften haben.

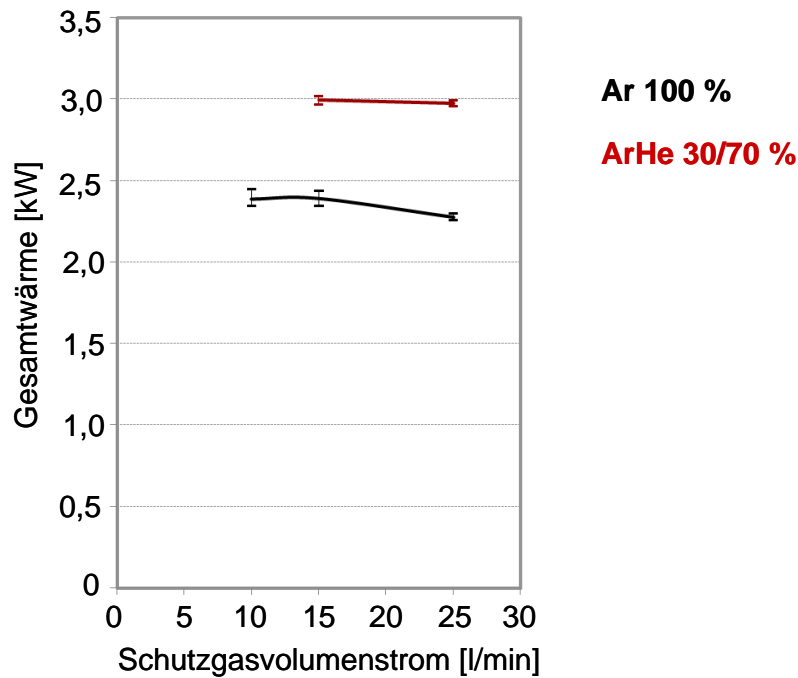


Abbildung 4-15: Einfluss des Schutzgasvolumenstromes auf die Gesamtwärme (exemplarisch an Rein-Ar und ArHe30/70 mit $I = 200$ A, LBL = 5 mm)

4.1.7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der diagnostischen Untersuchungen an unterschiedlichen Schutzgaszusammensetzungen sind in Tabelle 4-2 zusammenfassend dargestellt.

Es ist festzustellen, dass alle untersuchten Gaskomponenten zu einer Erhöhung der Gesamtenergieeinbringung gegenüber Rein-Ar führen, wobei entsprechend der Ergebnisse des Geteilten-Anoden-Verfahrens v. a. He-Zumischungen diese Lichtbogeneigenschaft signifikant und nahezu proportional zu ihrem Anteil im Gasmisch beeinflussen. Die nur sehr geringe Zunahme der diagnostisch ermittelten Gesamtwärme bei H_2 -Zumischungen wird in den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen überprüft.

Hinsichtlich des Staudruckes ist ein Unterschied zwischen He- und H_2 - bzw. N_2 -Zumischungen erkennbar. Lediglich He-Zumischungen verursachen eine Verringerung des Staudruckes im Vergleich zu Rein-Ar, die beiden anderen untersuchten Gaskomponenten erhöhen den Lichtbogendruck dagegen deutlich. Die Minderung des Staudruckes bei heliumhaltigen Schutzgasen ist abhängig von

der Lichtbogenlänge. Bei geringem Abstand der Wolframelektrode zum Bauteil (in den Versuchen 2 mm) konnte auch für He-haltige Gase ein dem Rein-Ar nahezu identischer Staudruck festgestellt werden. Durch eine Erhöhung der Lichtbogenlänge kann der staudruckmindernde Effekt der He-Zusätze gesteigert werden. Dabei zeigte sich eine lineare Abhängigkeit sowohl vom He-Gehalt als auch von der Lichtbogenlänge.

Tabelle 4-2: Übersicht zum Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogeneigenschaften

	Lichtbogeneigenschaften	
	Staudruck	Gesamtwärmeeinbringung
He-Zumischung	Verringerung in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge LBL klein: Staudruckminderung gering LBL groß: Staudruckminderung groß	Erhöhung ↑↑
H₂-Zumischung	Erhöhung	Erhöhung ↑
N₂-Zumischung	Erhöhung	Erhöhung ↑

Durch die bisherigen diagnostischen Untersuchungen wurden die Eigenschaften des Lichtbogens am Übergang zum Werkstück charakterisiert. Diese Werte werden im Folgenden auch zur Validierung der Simulationsmodelle genutzt.

4.2 Erkennen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessgas und Lichtbogen mittels Simulation

4.2.1 Entwicklung eines geeigneten Simulationsmodells

4.2.1.1 Netz und Randbedingungen

Die WIG-Lichtbogensimulation wird mit Hilfe der Software ANSYS CFX durchgeführt. Unter Annahme einer Rotationssymmetrie der Lichtbogenausbildung wird die Elektrode, die Schutzgasdüse, das Werkstück und der Strömungsraum abgebildet, vgl. Abbildung 4-16.

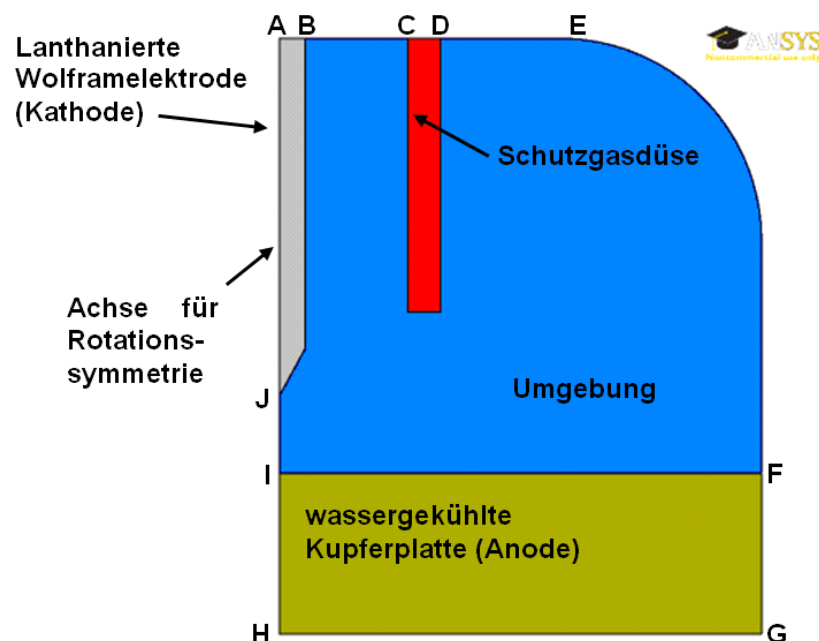


Abbildung 4-16: Berechnungsdomain für WIG-Lichtbogensimulation

Dabei werden in Anlehnung an bisherige numerische Untersuchungen zu WIG-Lichtbögen eine lanthanierte Elektrode mit einem Durchmesser von 3,2 mm, eine Lichtbogenlänge von 5 mm sowie 5 mm Elektrodenüberstand als Geometrierandbedingungen genutzt [9] [11] [13] [14] [16]. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen wurde der Anspitzwinkel der Elektrode verändert - dieser wurde im Rahmen der Untersuchungen auf einen Winkel von 30° festgelegt und mit einem Abplattungsdurchmesser von 0,5 mm versehen. Um eine Validierung der Simulationsergebnisse mit den diagnostischen Untersuchungen zu gewährleisten, wird die Anode als gekühlte Cu-Platte ausgeführt.

Die Randbedingungen der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls, Energie, elektrisches Potential und magnetisches Vektorpotential sind in Tabelle 4-3 zusammen gefasst.

Tabelle 4-3: Flächenrandbedingungen des Lichtbogenmodells

		T	\dot{m}	P_{rel}	Φ	j	\vec{A}
AB	Kathode	300 K	-			j	$\partial A_i / \partial n = 0$
BC	Schutzgaseinlass	300 K	$10 \text{ l min}^{-1} * \rho$		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$
CD	Schutzgasdüse	300 K	-		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$
DE	Umgebung Oben	300 K	1 bar		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$
EF	Umgebung Seite	300 K	1 bar		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$A_i = 0$
FG	Werkstück Seite	300 K	-		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$A_i = 0$
GH	Werkstück Unten	$\partial T / \partial n = 0$	-		0V		$\partial A_i / \partial n = 0$
HI	Symmetrieachse	$\partial T / \partial n = 0$	-		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$
IJ	Symmetrieachse	$\partial T / \partial n = 0$	-		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$
JA	Symmetrieachse	$\partial T / \partial n = 0$	-		$\partial \Phi / \partial n = 0$		$\partial A_i / \partial n = 0$

Die Mischung des Schutzgases mit Atmosphärgasen bzw. Kontamination mit Sauerstoff im Prozessbereich wird nicht betrachtet. Der Fokus wird auf den Einfluss der unterschiedlichen Prozessgaszusammensetzungen gelegt. Aus diesem Grund wird an den äußeren Bereichen D-E und E-F (vgl. Abbildung 4-16) die Zusammensetzung des Prozessgases definiert. Der Stromfluss wird über die Kathodenoberseite A-B (vgl. Abbildung 4-16) vorgegeben.

4.2.1.2 Modellierung der WIG-Lichtbogensäule

Die Modellierung des Lichtbogens erfolgt mit Hilfe des MHD-Gleichungssystems. Darunter wird die Kombination aus den Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie aus der Strömungsmechanik mit den Maxwell-Gleichungen der Elektromagnetik verstanden. Die verwendeten Maxwell-Gleichungen sind nachfolgend dargestellt:

Ladungsträgererhaltung

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (3)$$

Ohm'sches Gesetz

$$\vec{j} = -\sigma \text{grad}\phi \quad (4)$$

Magnetisches Potential

$$\text{div}(\text{grad}\vec{A}) = -\mu_0 \vec{j} \quad (5)$$

Magnetische Flussdichte

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (6)$$

Der Einfluss der Lorentzkraft, Gleichung (7), auf das Geschwindigkeitsfeld wird durch einen Quellterm in den Impulserhaltungsgleichungen berücksichtigt.

Lorentzkraft

$$\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (7)$$

Des Weiteren wird die Widerstandserwärmung S_{RH} , Gleichung (8), durch einen Quellterm in der Energieerhaltungsgleichung implementiert.

Widerstandserwärmung

$$S_{RH} = \frac{j^2}{\sigma} \quad (8)$$

4.2.1.3 Implementierung von Schutzgasgemischen – Demixingeffekte

Die thermodynamischen und Transporteigenschaften der Gase bestimmen die Eigenschaften des WIG-Lichtbogens. Für die praktische Anwendung sind vor allem die Schnittgrößen zum Werkstück von Interesse. Im Bereich der Lichtbogensäule werden LTE-Eigenschaften des Plasmas angenommen. Im Rahmen der Arbeit wurden die Plasmaeigenschaften von MURPHY [20] verwendet. Die Daten liegen für spezifische Gaszusammensetzungen vor und werden zwischen Stützstellen linear interpoliert. Eine Zusammenfassung der verwendeten Datensätze für ArHe-, ArH₂- und ArN₂-Gemische ist im Anhang, vgl. Anhang A1 bis A4, enthalten.

Die Stoffdaten zeigen, dass die Gaseigenschaften stark temperaturabhängig sind und der Einfluss der Schutzgase auf den Lichtbogen somit nicht mit den

Gaseigenschaften bei Raumtemperatur erklärt werden kann. Beispielhaft sei die thermische Leitfähigkeit von H_2 genannt, die bereits bei 3800 K um den Faktor 100 höher ist als bei Raumtemperatur.

Die Temperatur der Bogensäule wird wesentlich von den Strahlungsmechanismen beeinflusst. Dabei findet sowohl Strahlungsemission als auch -absorption statt. Die Differenz aus Energieabgabe durch Emission und Energieaufnahme durch Absorption im Kontrollvolumen wird als Nettoemission bezeichnet. Unter der Annahme einer bestimmten Absorptionslänge im Plasma kann die Nettoemission vereinfachend in Abhängigkeit von der Plasmatemperatur und der chemischen Zusammensetzung berechnet werden. Die Druckabhängigkeit der Nettoemission wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt. Für das Modell in dieser Arbeit werden die aus der Literatur bekannten Werte für Reingase verwendet und in Abhängigkeit der molaren Anteile gewichtet [22] [23] [24] [25]. Die Nettoemission wird als Energiesenke in der Energieerhaltungsgleichung berücksichtigt.

Seit den Arbeiten von FRIE [17] ist bekannt, dass in thermischen Plasmen Entmischungseffekte (engl. *demixing*) auftreten. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Beschreibung der Demixing-Effekte das Modell von MURPHY [26] verwendet. Dieses ist für binäre Gasgemische ohne chemische Reaktionen anwendbar. Die Erhaltungsgleichung für eine Spezies im Gemisch kann wie folgt formuliert werden:

$$\frac{\partial(\rho y_A)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} y_A + \vec{J}_A) = 0 \quad (9)$$

In der Gleichung (9) beschreibt die Massenstromdichte \vec{J}_A den Stofftransport in Folge der Ver- und Entmischungseffekte. Er ist abhängig von den Gradienten der Temperatur T , dem Druck p , der molaren Fraktion x der Spezies A und B sowie vom elektrischen Feld E . Die Berechnung des Massenstromes erfolgt entsprechend der nachfolgenden Gleichung:

$$\vec{J}_A = \frac{n^2}{\rho} \frac{\bar{m}_A \bar{m}_B}{m_A m_B} (D_{AB}^x \text{grad} x_B + D_{AB}^p \text{grad} \ln p_{\text{tot}} + D_{AB}^E \vec{E}) - D_{AB}^T \text{grad} \ln T \quad (10)$$

Die kombinierten Diffusionskoeffizienten D_{AB}^k wurden [26] entnommen.

4.2.1.4 Modellierung der Fallgebiete

Implementierung und Validierung existierender Modelle

Im Gegensatz zur Lichtbogensäule können die Übergänge von der Lichtbogensäule zur Anode bzw. Kathode (Fallgebiete) nicht mit LTG-Randbedingungen beschrieben werden. Die Ursache dafür ist die zu geringe Plasmatemperatur in diesem Bereich. An der Schnittstelle zwischen Lichtbogen und den Elektroden beträgt die Gastemperatur weniger als 7000 K. Somit wäre unter Annahme von LTG-Eigenschaften die elektrische Leitfähigkeit zu gering, um den Ladungsträgertransport zu realisieren. Stattdessen sind die Mechanismen des Ladungsträgertransports durch Elektronen- und Ionendiffusion geprägt, welche durch Elektronenemission an der Kathode sowie Rekombinationseffekte der Ladungsträger beeinflusst werden. Die Modellierung dieser Effekte ist sehr komplex. Folgende Modellvorstellungen werden für WIG-Lichtbögen genutzt:

1. Berücksichtigung der Elektronendiffusion infolge der ambipolaren Diffusion (nach SANSONNENS et al. [14] und LOWKE et al. [13])
2. Vergrößerung der Gitterelemente an der Elektrodenoberfläche (nach LOWKE und TANAKA [11])

In Ansatz 1 werden die Effekte in den Fallgebieten sehr komplex beschrieben, während im Ansatz 2 die Fallgebietsmechanismen durch definierte Netzauflösung an den Randschichten der Elektroden abstrahiert werden. Für den in der Literatur oft untersuchten Referenzfall ($I = 200 \text{ A}$, $LBL = 5 \text{ mm}$, Rein-Ar) konnte eine gute Übereinstimmung der numerischen und experimentell ermittelten Lichtbogeneigenschaften festgestellt werden. Daher wurden die Eignung der beiden Fallgebietsmodelle für unterschiedliche Gaszusammensetzungen und Lichtbogenparameter untersucht. Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Modellvorstellungen sowie deren Besonderheiten bei der Implementierung eingegangen bevor die Anwendbarkeit für Schutzgasgemische dargestellt wird.

Ansatz 1: Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS et al. [14]

In dem Fallgebietsmodell nach SANSONNENS et al. [14] wird die Elektronendichte N_e mit Hilfe einer Transportgleichung beschrieben. In dieser Gleichung wird neben dem Einfluss der ambipolaren Diffusion (erster Term) die Rekombination (zweiter

Term) berücksichtigt. Der dritte Term, der sogenannte Elektronendrift, wird im Modell in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \text{div} D_a \text{grad} N_e + \gamma(N_0 G - N_e^2) + \alpha \omega N_e \quad (11)$$

Für den ambipolaren Diffusionskoeffizienten D_a und den Rekombinationskoeffizienten γ werden Vereinfachungen angenommen. Die elektrische Leitfähigkeit im Fallgebiet ergibt sich aus nachfolgender Gleichung:

$$\sigma = \frac{N_e \cdot e^2}{m_e \cdot v_{eH}} \quad (12)$$

Dabei ist v_{eH} die Geschwindigkeit der Elektronen und Schwerteilchen. Die Driftgeschwindigkeit für diese Teilchen wird nach DEVOTO [27] unter Annahme des gleichen Kollisionsquerschnittes für Rein-Ar und Ar-Gemische berechnet.

Der Elektronendiffusionskoeffizient wird in der Ladungserhaltungsgleichung verwendet:

$$\sigma \text{grad} \Phi = e D_e \text{grad} N_e \quad (13).$$

Neben der Implementierung der zusätzlichen Gleichungen ist auch das Gitter für diesen Modellansatz anzupassen. Um den Gradienten der Elektronenkonzentration korrekt abzubilden, ist im Fallgebiet eine sehr feine Gitterauflösung notwendig, vgl. Abbildung 4-17.

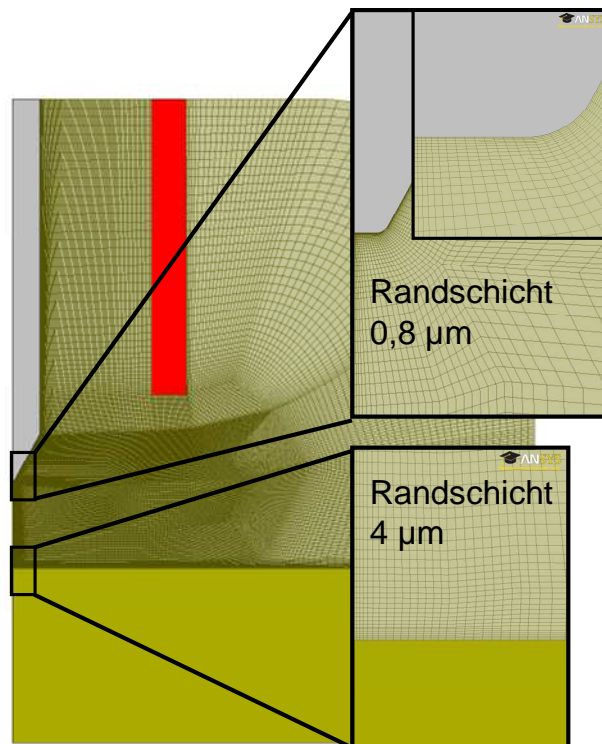


Abbildung 4-17: Notwendige Gitterauflösung für Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS et al. [14]

Die zusätzlichen Randbedingungen für die Elektronendichte sind Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Zusätzliche Randbedingungen für die Elektronendichte zur Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS et al. [14]

°□	°□	N_e □
AB □	Kathode □	-□
BC □	Schutzgaseinlass □	LTG □
CD □	Schutzgasdüse □	-□
DE □	Umgebung·Oben □	$\partial N_e / \partial n = 0$ □
EF □	Umgebung·Seite □	$\partial N_e / \partial n = 0$ □
FG □	Werkstück·Seite □	-□
GH □	Werkstück·Unten □	-□
HI □	Symmetrieachse □	-□
IJ □	Symmetrieachse □	-□
JA □	Symmetrieachse □	-□
FI □	Interface·Kathode·zu·Umgebung □	<i>Thermoemission</i> □
BJ □	Interface·Werkstück·zu·Umgebung □	$N_e = D_e \cdot \lambda_s$ □
CD □	Interface·Schutzgasdüse·zu·Umgebung □	$\partial N_e / \partial n = 0$ □

Ansatz 2: Fallgebietsmodellierung nach LOWKE und TANAKA [11]

Im Fallgebietsmodell nach LOWKE und TANAKA [11] werden die physikalischen Vorgänge nicht abgebildet, sondern der elektrische Widerstand des Fallgebiets durch ein grobes Gitter abstrahiert. Die Gitterweite des ersten Elementes an der Elektrodenoberfläche ist nach LOWKE und TANAKA [11] von der freien Weglänge der Ladungsträger und somit von der Gaszusammensetzung abhängig, vgl. Abbildung 4-18. Von LOWKE und TANAKA [11] wurde eine Gitterweite von 0,1 mm an der Kathode und von 0,4 mm an der Anode vorgeschlagen, welche für die folgenden Referenzuntersuchungen verwendet wurden.

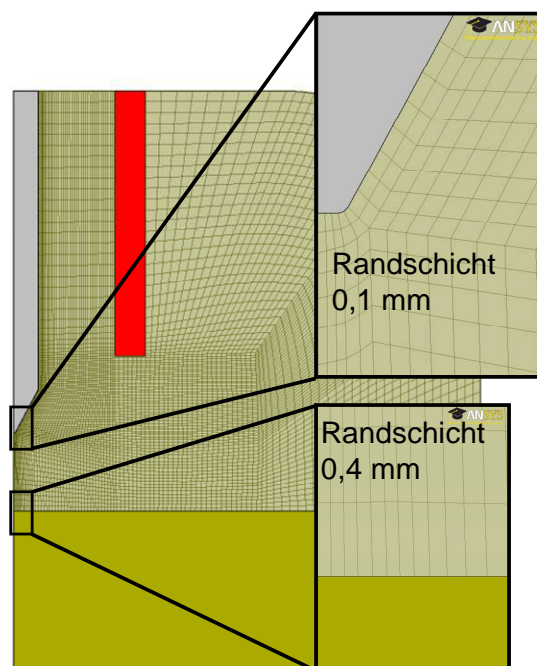


Abbildung 4-18: Notwendige Gitterauflösung für Fallgebietsmodellierung nach LowKE und TANAKA [11]

Erprobung der Fallgebietsmodelle

Zur Erprobung der Fallgebietsmodelle wurden neben Rein-Ar auch die Schutzgaskomponenten He, H₂ und N₂ in der Modellierung berücksichtigt. Hierzu wurden die Vorhersagen der Fallgebietsmodelle für unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen hinsichtlich Staudruck und Gesamtwärme mit den experimentell ermittelten Daten, vgl. Kapitel 4.1, verglichen. Die Ergebnisse sind den Abbildung 4-19 bis Abbildung 4-21 dargestellt.

Die Auswertung der Staudruckkurven, vgl. Abbildung 4-19 zeigt, dass bei der Rein-Ar-Simulation beide Simulationsansätze sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Die Analyse der Staudrücke bei ArHe-Gemischen zeigt dagegen, dass das Modell nach SANSONNENS ähnliche Tendenzen vorhersagt, wie experimentell ermittelt wurden. Das Modell nach LOWKE und TANAKA bildet diese Tendenzen dagegen nicht ab.

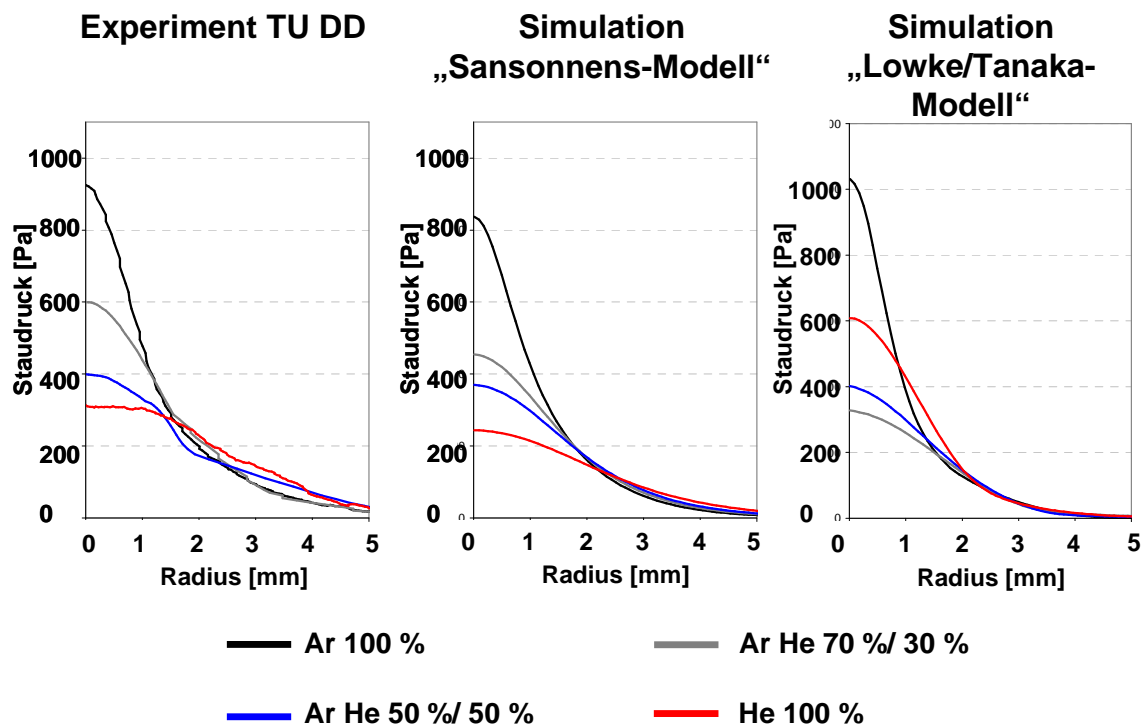


Abbildung 4-19: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Staudrücke für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A, LBL 5 mm)

Neben dem Staudruck werden zur Abschätzung der Eignung der Modelle auch der Energieeintrag, d. h. die Gesamtwärme sowie die elektrische Stromdichte, betrachtet. Das Modell nach SANSONNENS zeigt hinsichtlich der Gesamtwärme ähnliche Tendenzen wie die Experimente. Die Unterschiede zwischen Mess- und Berechnungswerten sind vergleichsweise gering. Jedoch kann mit diesem Modellierungsansatz die Verteilung der elektrischen Stromdichte über dem Werkstück nicht abgebildet werden, vgl. Abbildung 4-21.

Der Modellierungsansatz nach LOWKE und TANAKA bildet die Gesamwärmemetendenz nicht ab. Gleiches gilt für die Verteilung der elektrischen

Stromdichte. Daraus ist zu folgern, dass die verwendeten Gitterhöhen nur für Rein-Ar anwendbar sind.

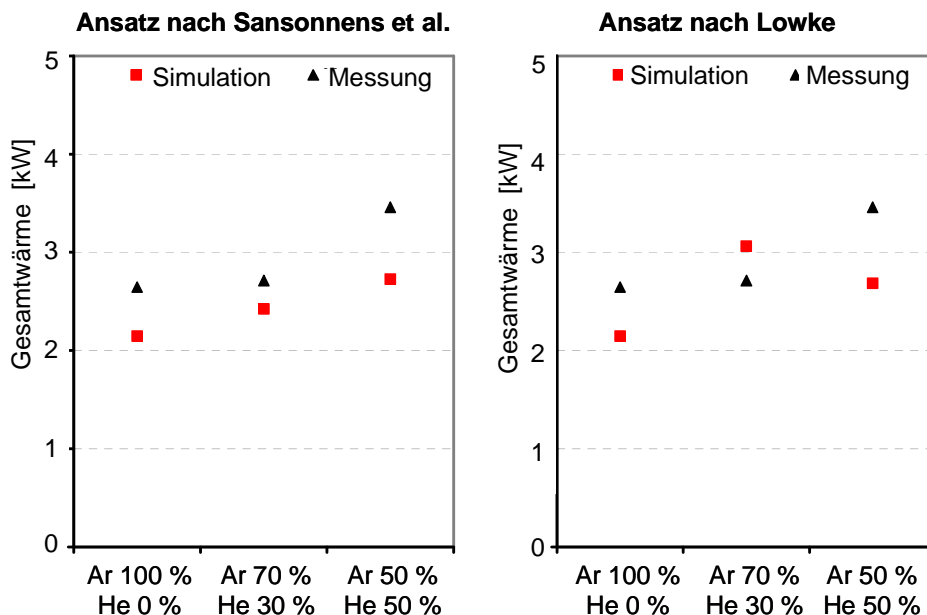


Abbildung 4-20: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Gesamtwärmen für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A) (LBL 5 mm)

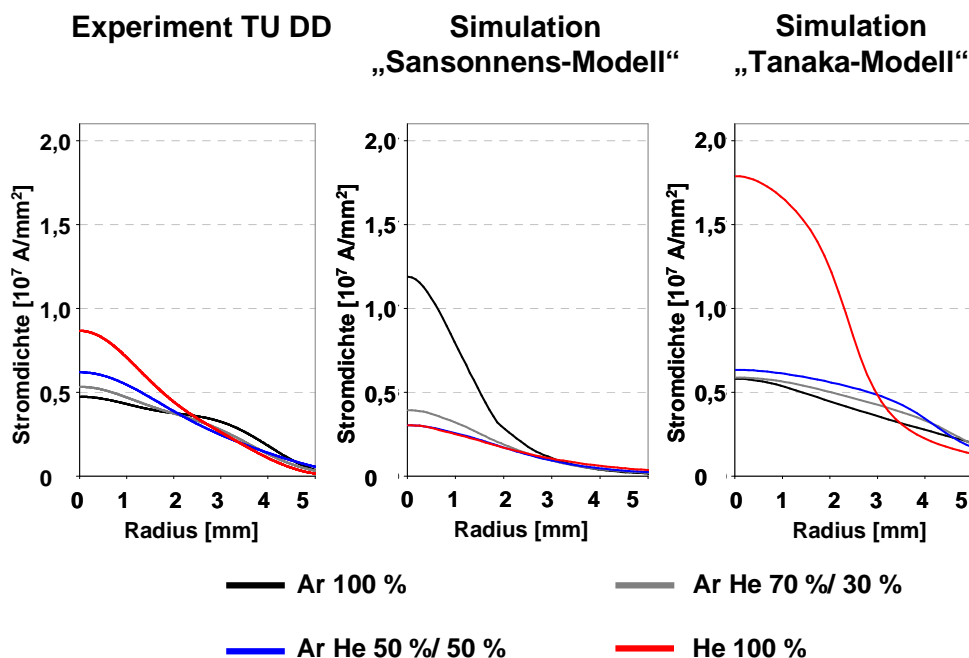


Abbildung 4-21: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Stromdichten für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A) (LBL 5 mm)

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass sowohl der Modellierungsansatz nach SANSONNENS als auch der Modellierungsansatz nach LOWKE und TANAKA zur Fallgebietsmodellierung mit ArHe-Gemischen nur eingeschränkt einsetzbar sind. Um jedoch auch diese Gemische, die im Rahmen des Projektes von großer Bedeutung sind, numerisch simulieren zu können, wurde ein neuer Modellansatz entwickelt.

Entwicklung eines neuartigen numerischen Modells zur Simulation von Schutzgasgemischen – mittels Widerstandsansatz

Bei diesem neu entwickelten Modell werden die Vorgänge in den Fallgebieten als Widerstände nachgebildet. Dieser Ansatz ergibt sich aus der Überlegung, dass die thermische und elektrische Leitfähigkeit der Plasmen in einen entsprechenden Widerstand umgerechnet werden können, indem der reziproke Wert gebildet wird.

Der elektrische Widerstand beschreibt den Spannungsabfall in den Fallgebieten, der sich durch die verminderte elektrische Leitfähigkeit infolge der geringen Temperaturen in diesen Bereichen ergibt. Des Weiteren ist im Modell ein Widerstand für den Wärmeübergang implementiert, der den Temperaturgradienten vom Lichtbogenkern zu den Elektroden abbildet, vgl. Abbildung 4-22.

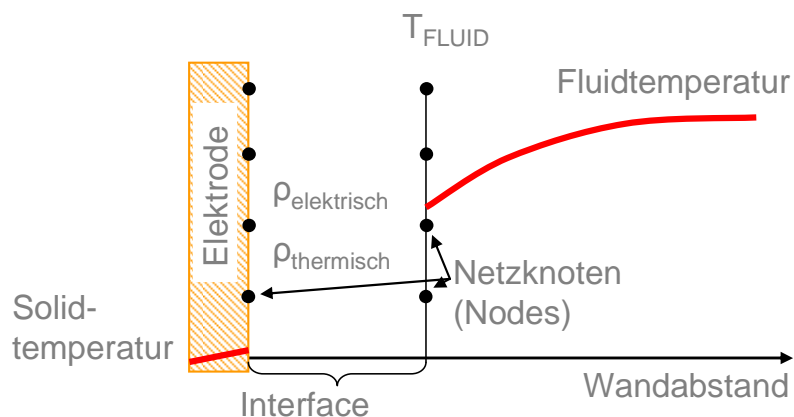


Abbildung 4-22: Fallgebietsmodellierung mit Hilfe von Widerständen für den elektrischen Stromfluss sowie den Wärmefluss vom Lichtbogenkern zu den Elektroden

Mit Hilfe des Widerstandsmodells für die Fallgebiete können für He-haltige Gase sowohl der Lichtbogenstaudruck als auch der Gesamtwärmeeintrag in das Werkstück sowohl tendenziell als auch in ihren Maximalwerten in guter Näherung

abgebildet werden. Daher kann das Modell für Sensitivanalysen an verschiedenen Prozessgasmischungen genutzt werden.

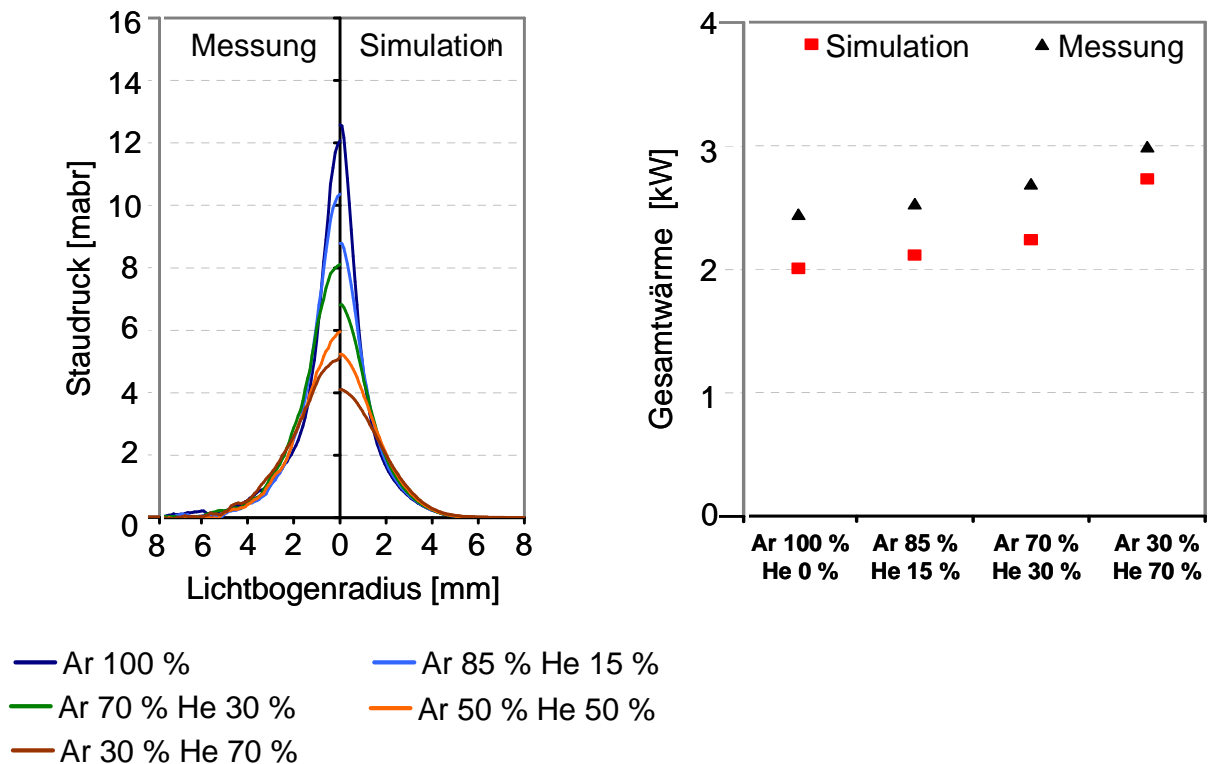


Abbildung 4-23: Validierung des entwickelten Widerstandsmodells durch Vergleich mit experimentellen Daten

4.2.2 Sensitivanalysen

4.2.2.1 Berechnung des Einflusses einzelner physikalischer

Gaseigenschaften auf Lichtbogenstaudruck und Energieeintrag

Numerische Sensitivanalysen ermöglichen es, den Einfluss einzelner Gaskomponenten in einem Gasgemisch physikalisch vertieft zu untersuchen. Üblicherweise werden bei der Berechnung von Gasgemischen die thermodynamischen und Transporteigenschaften der Mischgase entsprechend der molaren Massenanteile der Gaskomponenten gemittelt. Bei den Sensitivanalysen werden zum Basisgas jedoch nur einzelne thermische oder Transporteigenschaften der zweiten Schutzgaskomponente definiert. Dadurch kann erkannt werden, welche einzelne Eigenschaft des jeweiligen Gases zu welchen Änderungen der Lichtbogeneigenschaften führt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird Ar verwendet und der Einfluss von He-, H₂- bzw. N₂-Zumischungen untersucht. Die mittels Sensitivanalyse untersuchten Eigenschaften sind:

- Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)
- Elektrische Leitfähigkeit (σ)
- Ionisationspotential ($U_{\text{Ionisierung}}$)
- Nettoemissionskoeffizient (NEK)
- Thermische Leitfähigkeit (λ)

In den nachfolgenden Diagrammen ist zum einen der numerisch ermittelte Staudruck und Wärmestrom für Rein-Ar (erster Wert) als auch die Ar-Gasgemische (letzter Wert – ArHe 30/70 %, ArH₂ 90/10 %, ArN₂ 98/2 %) dargestellt. Zum zweiten ist der Einfluss (vor allem die Sensitivität) einzelner Gaseigenschaften von He, H₂ oder N₂ auf den Staudruck bzw. die Gesamtwärme dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei den Sensitivuntersuchungen für die Gaszumischungen immer deren Reingaseigenschaften verwendet wurden, um den Effekt zu maximieren.

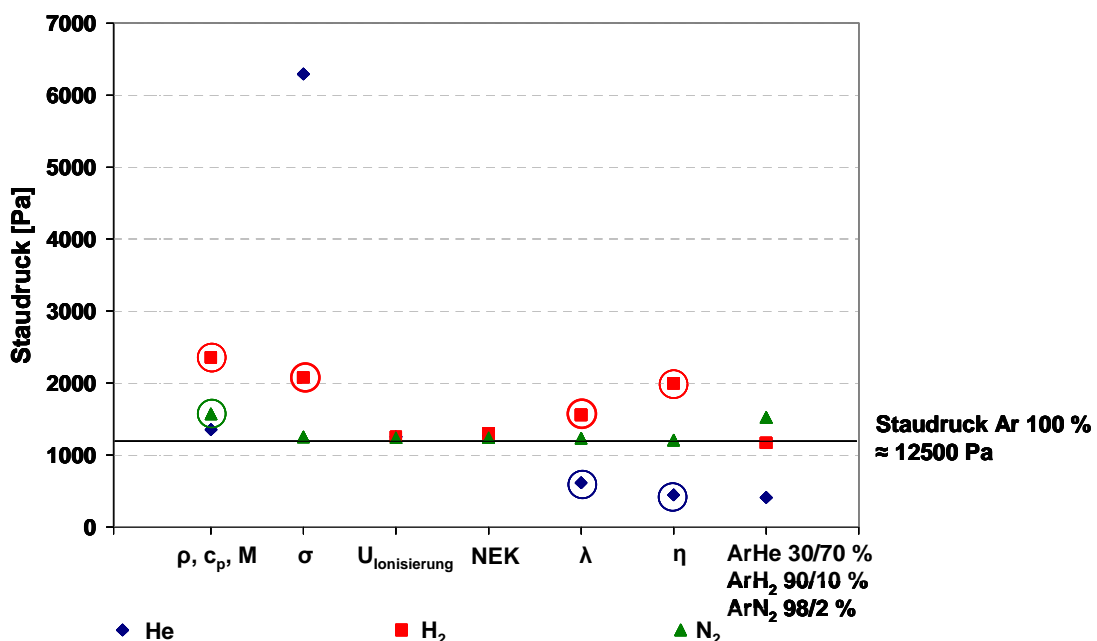


Abbildung 4-24: Sensitivanalyse für den Einfluss der Prozessgaseigenschaften auf den Staudruck. Der Einfluss der eingekreisten thermophysikalischen Eigenschaften wird nachfolgend diskutiert.

Die Sensitivanalysen zeigen, dass die Verringerung des Staudrucks bei He-Zumischungen vor allem durch die thermische Leitfähigkeit sowie die Viskosität hervorgerufen wird. Bei ArH₂-Gemischen wird die Staudruckerhöhung hingegen durch die Größen der inneren Energie sowie die dynamische Viskosität verursacht. Auch bei N₂-Zumischungen bewirkt vorrangig die Größen der inneren Energie die Staudruckerhöhung.

Hinsichtlich der Gesamtenergieeinbringung wird bei allen Zumischungskomponenten die Erhöhung durch die thermische Leitfähigkeit und bei den molekularen Gasen durch die Größen der inneren Energie hervorgerufen, vgl. Abbildung 4-25.

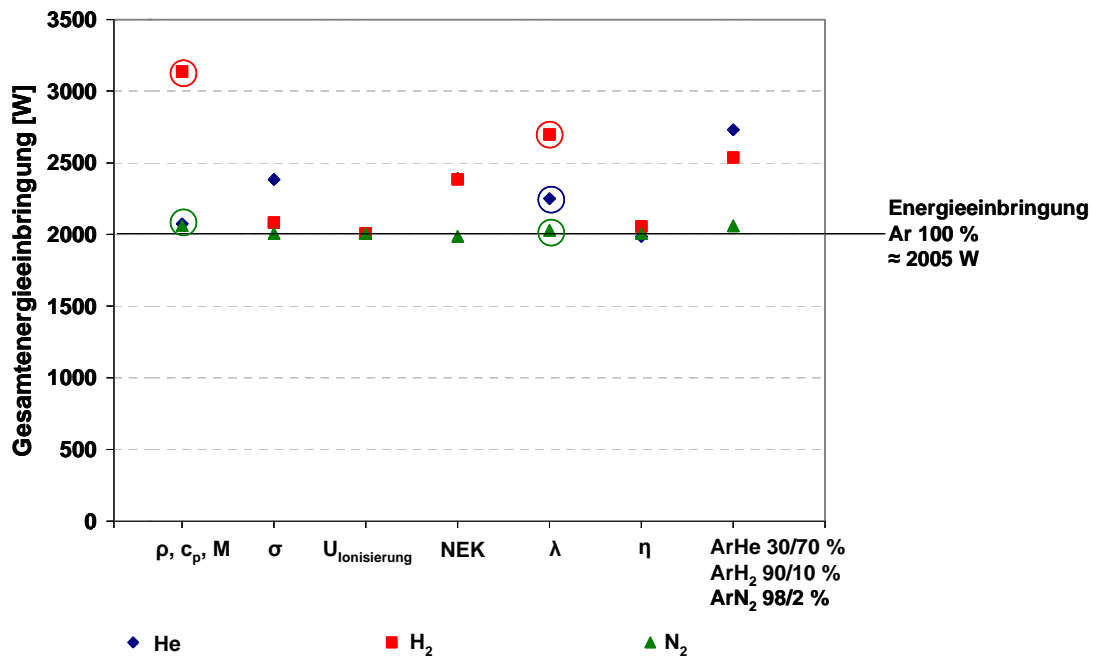


Abbildung 4-25: Sensitivanalyse für den Einfluss der Prozessgaseigenschaften auf die Gesamtwärme. Der Einfluss der eingekreisten thermophysikalischen Eigenschaften wird nachfolgend diskutiert.

Die oben benannten Eigenschaften der Mischgase werden im Folgenden hinsichtlich deren Ursache-Wirkungs-Struktur ausführlich beschrieben. Eine Übersichtsdarstellung der Lichtbogenbeeinflussung für alle untersuchten Eigenschaften ist im Anhang, vgl. Anhang A5 bis A7, enthalten.

4.2.2.2 Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArHe-Gasgemischen

Die Viskosität von He verursacht eine Staudruckverringering bei Verwendung von ArHe-Gasgemischen. In Abbildung 4-26 links ist zu erkennen, dass ab einer Temperatur von ca. 10.000 K die Viskosität von He-haltigen Gasen im Vergleich zu Argon zum Teil um ein Vielfaches höher ist. Diese Tendenz nimmt mit steigendem He-Gehalt im Lichtbogen zu. Daraus ist zu schlussfolgern, dass v. a. im heißen Lichtbogenkern eine hohe dynamische Viskosität des Plasmas vorhanden ist. Da die Viskosität auch als Größe der inneren Reibung anzusehen ist, ist ein starkes Abbremsen der Strömung im Lichtbogenzentrum beziehungsweise ein flacheres aber breiteres Strömungsprofil des Lichtbogens die Folge. Dadurch sinkt oberhalb der Werkstückoberfläche die Strömungsgeschwindigkeit und der Lichtbogen übt einen vergleichsweise geringen Staudruck auf die Schmelze aus. Dieser geschwindigkeitsverringeringende Reibungseffekt ist besonders bei hohen Viskositäten, d. h. hohen He-Gehalten, sowie bei großen Lichtbogenlängen von Bedeutung. Aufgrund dessen ist auch der hohe Staudruck bei kurzen Lichtbogenlängen bei ArHe-Gehalten erklärbar. Die mittels Staudruckmessung erkannten Effekte von Heliumzumischungen sind folglich eindeutig der Viskosität von He-haltigen Gasen zuzuordnen.

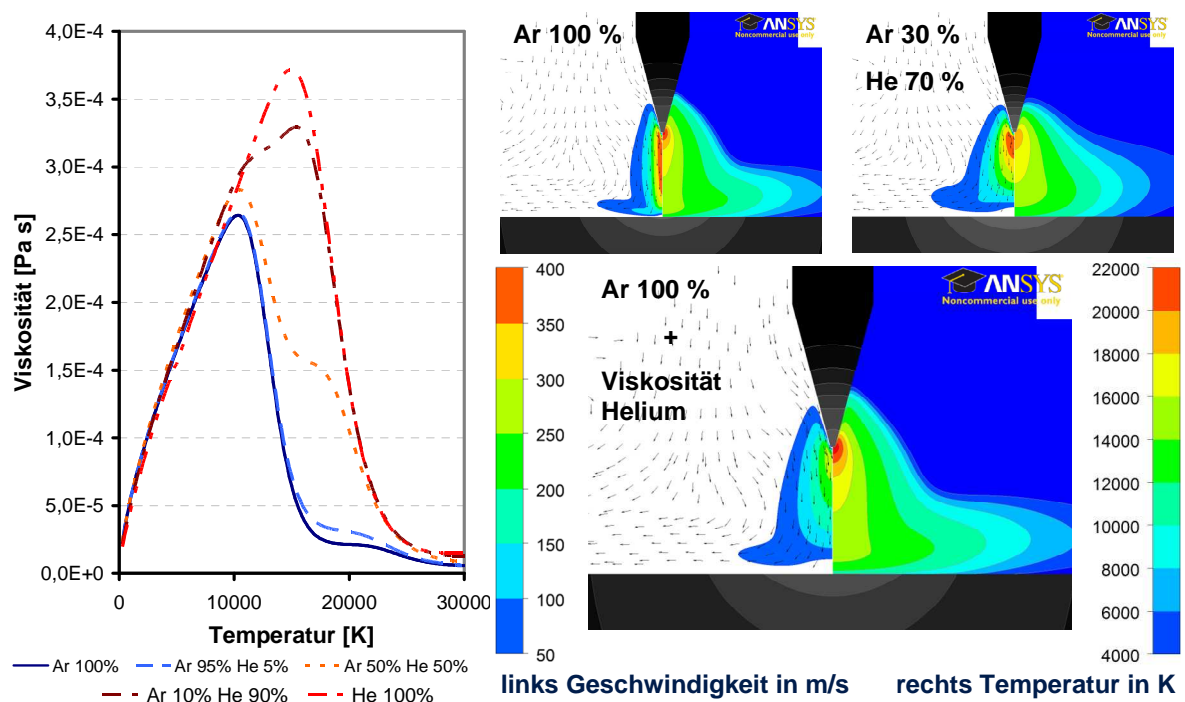


Abbildung 4-26: links: Einfluss von Temperatur und He-Konzentration auf Viskosität von ArHe, rechts: Einfluss der Viskosität von He auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArHe-Gasgemischen

Neben der Viskosität beeinflusst auch die thermische Leitfähigkeit von He die Lichtbogeneigenschaften stark. Diese Plasmaeigenschaft führt zum einen zur Erhöhung des Energieeintrages in das Werkstück und zum zweiten auch zur Verminderung des Staudrucks. Abbildung 4-27 links zeigt, dass He-haltige Gasgemische im Vergleich zu Rein-Ar im gesamten Temperaturbereich eine erhöhte thermische Leitfähigkeit aufweisen. Dieser Einfluss verstärkt sich ab ca. 15.000 K überproportional. Das Maximum der thermischen Leitfähigkeit liegt bei ca. 22.000 K. Somit wird durch diese Stoffgröße die Wärme aus dem heißen Lichtbogenzentrum nach außen geleitet. Das bewirkt zum einen den aus der Praxis bekannten breiteren He-Lichtbogen. Zum zweiten wird aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit im unteren Temperaturbereich (300 bis 8000 K) die Wärme auch sehr gut in das Bauteil übertragen, wodurch der erhöhte Energieeintrag erklärt werden kann.

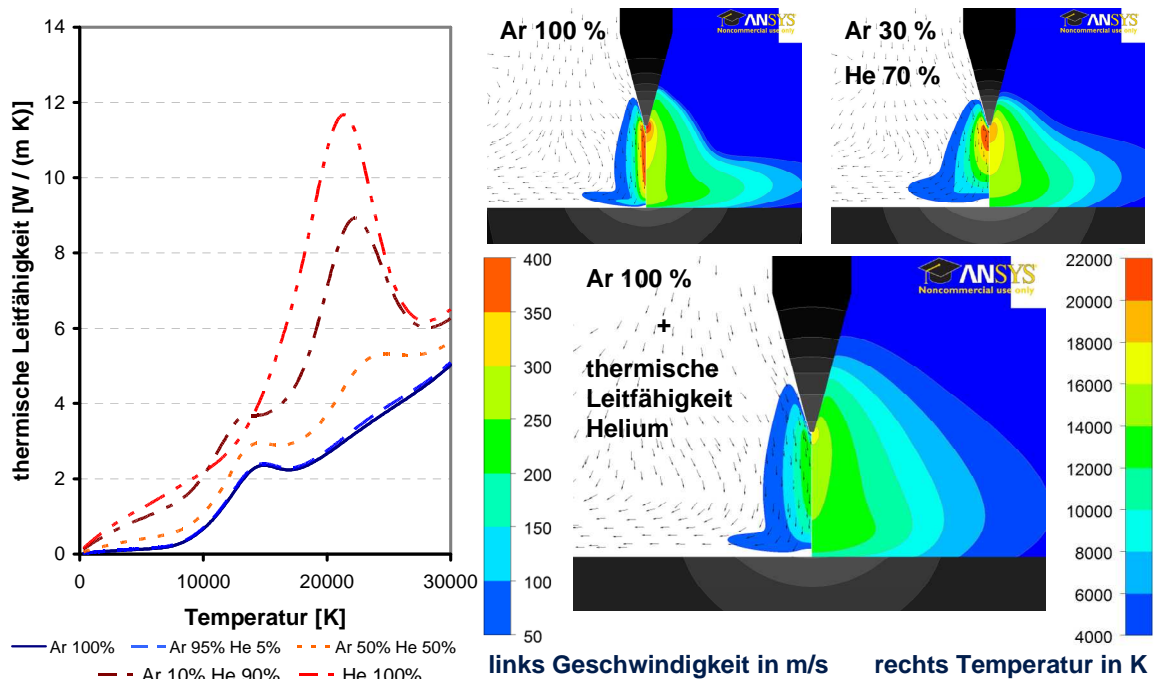


Abbildung 4-27: Einfluss von Temperatur und He-Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArHe, rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArHe-Gasgemischen

Bisher wurde die Staudruckminderung bei Zumischung von He über die geringere Dichte von He erklärt. Diese Hypothese wird durch die Simulation relativiert, da bei dieser Rechnung neben der Stoffgröße Dichte auch die spezifische

Wärmekapazität c_p sowie die molare Masse M berücksichtigt wird. Offensichtlich bewirken diese drei Eigenschaften in Kombination eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit an der Kathode.

Aber es zeigt sich, dass neben der Viskosität die thermische Leitfähigkeit einen hohen Einfluss hat. Infolge der thermischen Leitfähigkeit bilden sich ein breiterer Lichtbogen sowie ein kälteres Lichtbogenzentrum aus, welche zu einer geringeren Stromdichte und geringeren Lorentzkraft führt. Die Lorentzkraft ist die Ursache der Lichtbogenströmung, die den Staudruck an der Werkstückoberfläche bestimmt. Folglich wird die Minderung des Lichtbogenstaudrucks durch die Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit verursacht.

Aufgrund der Tatsache, dass die elektrische Leitfähigkeit bei He-haltigen Gasen besonders im Temperaturbereich zwischen 6000 und 20.000 K im Vergleich zu Rein-Ar gemindert wird, werden höhere Lichtbogentemperaturen und ein höherer Energieeintrag in das Werkstück verursacht, vgl. Abbildung A-1 und Abbildung A-5.

Eine ähnliche Wirkung hat die Minderung der Strahlungsemission. Durch die Minderung der Strahlungsverluste steigen der Wirkungsgrad, die Lichtbogentemperatur und der Energieeintrag in das Werkstück, vgl. Abbildung A-5.

4.2.2.3 Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArH₂-Gasgemischen

Bei ArH₂-Gemischen wird die Erhöhung des Staudruckes im Vergleich zu Rein-Ar durch die dynamische Viskosität, die thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M) hervorgerufen. Hinsichtlich der Vergrößerung der Energieeinbringung ist neben den Größen der inneren Energie vor allem die erhöhte thermische Leitfähigkeit von ArH₂-Gemischen von Bedeutung.

Die Größen der inneren Energie (c_p , ρ , M) führen bei H₂-haltigen Schutzgasen zu einer Erhöhung des Staudruckes und der Wärmeeinbringung. In Abbildung 4-28 links ist die volumetrische spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung und Plasmatemperatur dargestellt. Bei etwa 3500 K

zeigt sich bei H_2 -Zumischungen aufgrund der notwendigen Dissoziationsenergie eine starke Erhöhung der auf das Volumen bezogenen Wärmekapazität. Diese Eigenschaft ist für die Lichtbogenansätze an den Elektroden von Bedeutung. Die hohe innere Wärme bedingt eine Abkühlung im Bereich des Lichtbogenansatzes, der leitfähige Lichtbogenbereich wird in Richtung Elektrodenspitze verschoben. Aufgrund des verringerten elektrisch leitfähigen Querschnittes erhöht sich die Stromdichte. Dies führt zum einen zu einer erhöhten Widerstandserwärmung. Zum zweiten erhöht sich die Lorentzkraft, was die Strömung beschleunigt und den Staudruck erhöht, vgl. Abbildung 4-28 rechts. Dieser Effekt kann allen molekularen Gasen zugeordnet werden und wurde besonders für reaktive Gase bereits beschrieben [29] [31].

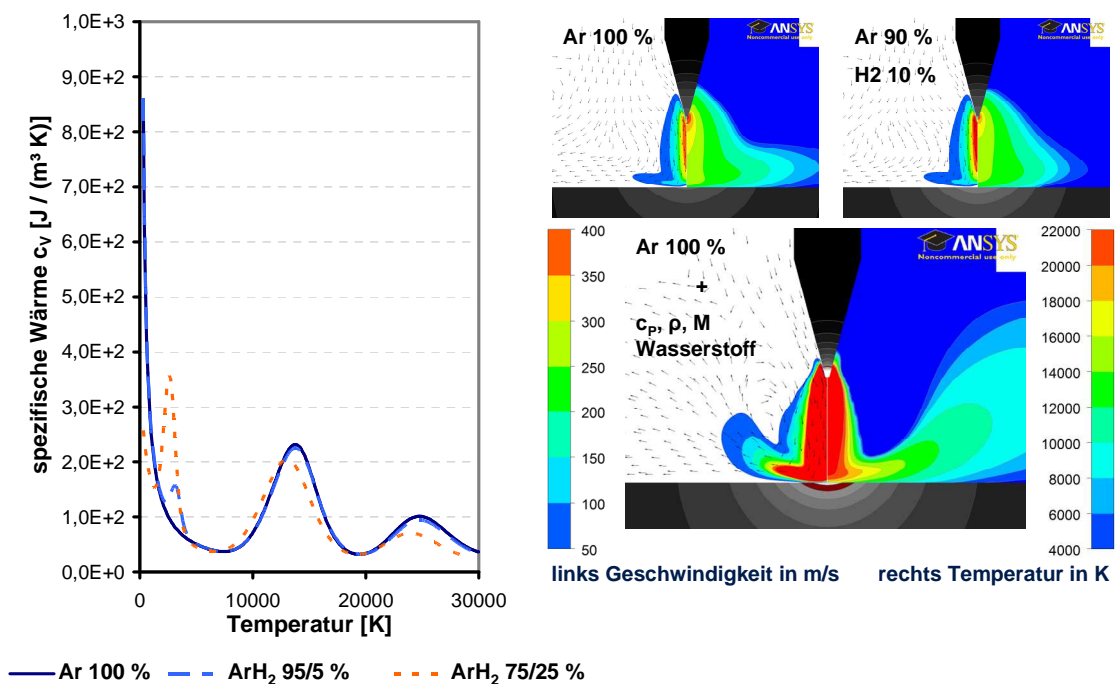


Abbildung 4-28: links: Einfluss von Temperatur und H_2 -Konzentration auf spezifische volumetrische Wärmekapazität von ArH_2 , rechts: Einfluss von ρ , c_p und M auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH_2 -Gasgemischen

Eine weitere den Lichtbogen signifikant beeinflussende Eigenschaft von H_2 ist die thermische Leitfähigkeit. Diese Größe ist bei Temperaturen unter 6.000 K, d. h. bei sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit des Plasmas, im Vergleich zu Ar signifikant höher, vgl. Abbildung 4-29 links. Durch die hohe Wärmeleitung verringert sich der elektrisch leitfähige Querschnitt, wodurch eine Erhöhung der Lorentzkraft hervorgerufen wird. Dies führt zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten und

erhöht den Lichtbogenstaudruck. Eine weitere Folge der erhöhten thermischen Leitfähigkeit bei niedrigen Temperaturen ist der bessere Wärmeübergang in das Werkstück, womit die im Vergleich zu Rein-Ar erhöhte Energieeinbringung erklärt werden kann.

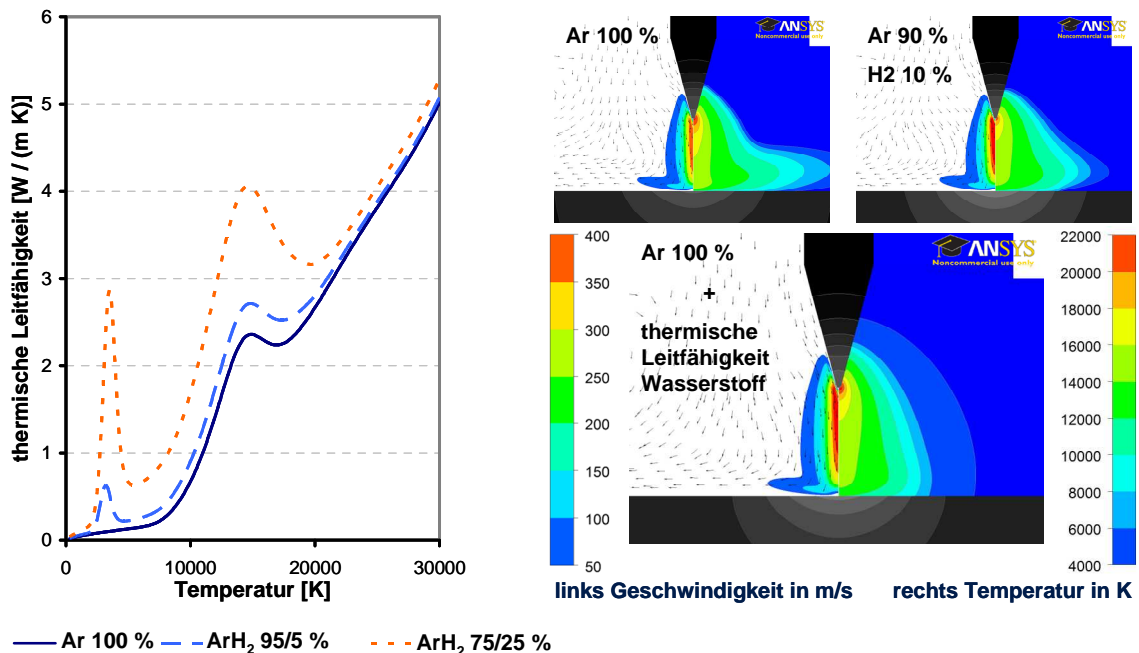


Abbildung 4-29: links: Einfluss von Temperatur und H₂-Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArH₂, rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH₂-Gasgemischen

Die Sensitivanalysen zeigen des Weiteren, dass die elektrische Leitfähigkeit von Wasserstoff zu einer Erhöhung des Staudruckes führt. In Abbildung 4-30 links ist zu erkennen, dass ab einer Temperatur von ca. 20.000 K die elektrische Leitfähigkeit von H₂-haltigen Gasen im Vergleich zu Rein-Ar höher ist. Aufgrund dessen wird der elektrische Strom vorrangig durch den elektrisch gut leitenden Lichtbogenkern geführt, wodurch sich die Stromdichte erhöht und eine Beschleunigung der Strömung verursacht wird, vgl. Abbildung 4-30 rechts.

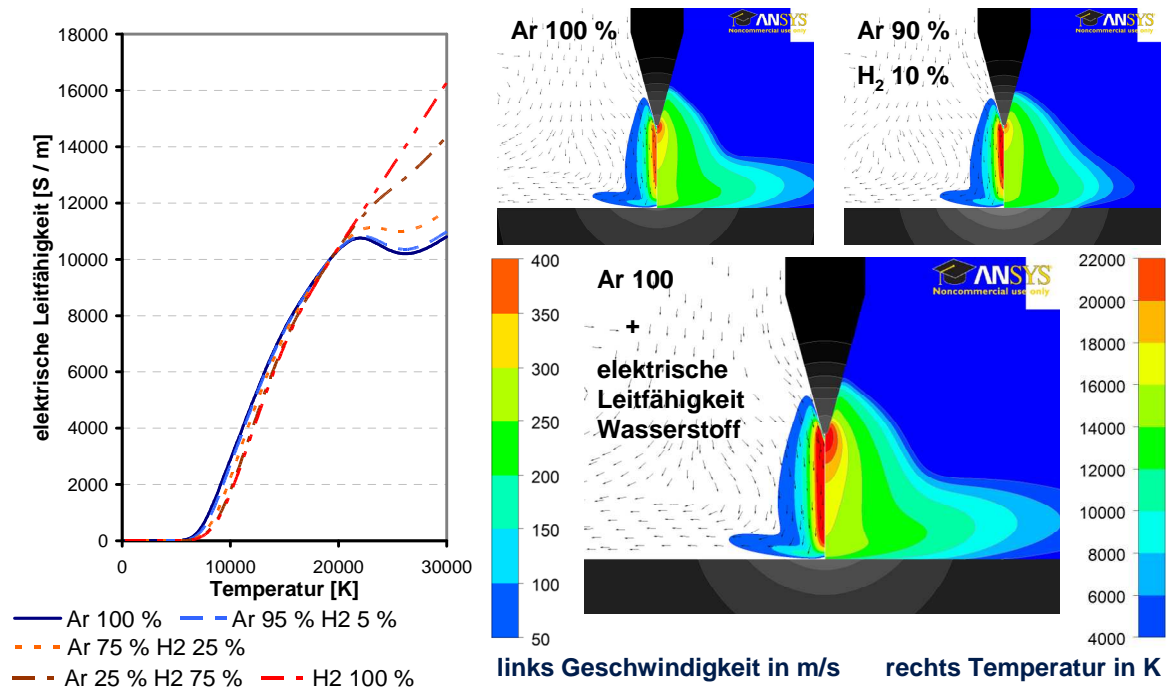


Abbildung 4-30: Einfluss von Temperatur und H₂-Konzentration auf elektrische Leitfähigkeit von ArH₂, rechts: Einfluss von σ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH₂-Gasgemischen

Die dynamische Viskosität von H₂ ist im Vergleich zu Ar gering, vgl. Abbildung 4-31 links. Dabei ist zu beachten, dass im Bereich bis 10 % H₂ kein signifikanter Unterschied zu Ar hinsichtlich der Viskosität festgestellt werden kann. Die in der Sensitivanalyse erzielten Ergebnisse wurden für 100 % H₂ ermittelt. Somit ist dieses Ergebnis als zusätzliche theoretische Betrachtung einzustufen. Der erhöhte Staudruck bei Verwendung von H₂-haltigen Gemischen ist folglich vorrangig auf die erhöhte innere Energie sowie die thermische und elektrische Leitfähigkeit zurückzuführen.

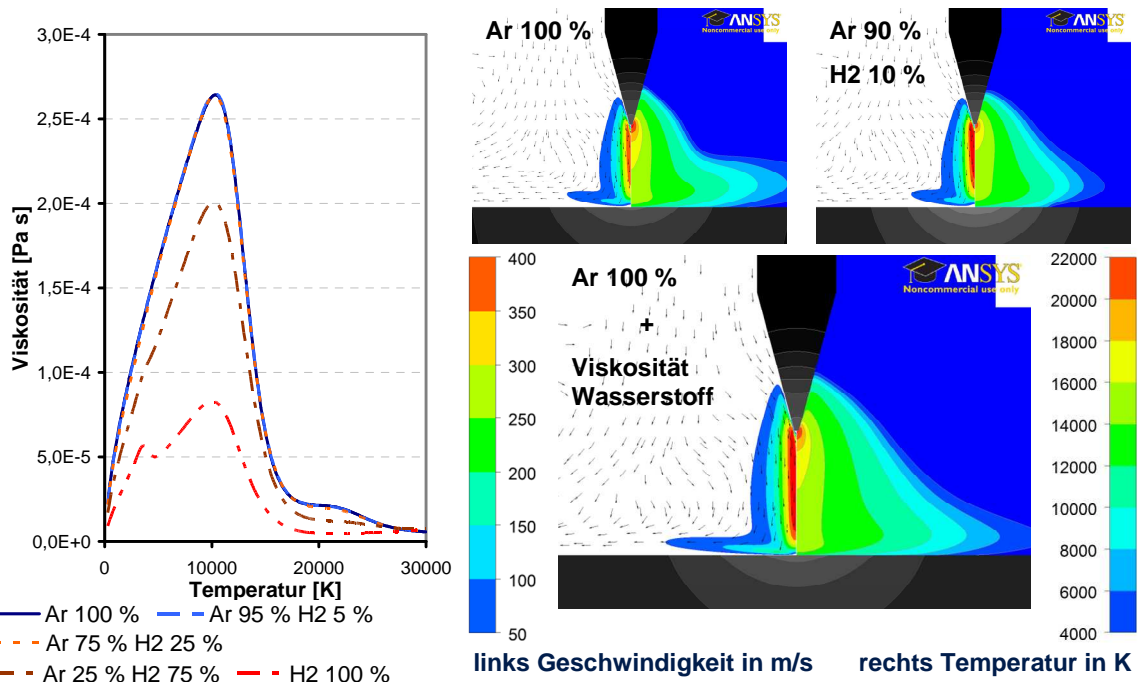


Abbildung 4-31: links: Einfluss von Temperatur und H₂-Konzentration auf Viskosität von ArH₂, rechts: Einfluss von η auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH₂-Gasgemischen

4.2.2.4 Hypothesen für das Lichtbogenverhalten bei ArN₂-Gasgemischen

Durch die Sensitivanalysen wurde erkannt, dass die Staudruckerhöhung bei Verwendung von ArN₂-Gemischen durch die Größen der inneren Energie, die Vergrößerung der eingebrachten Energie hingegen vor allem durch die thermische Leitfähigkeit von N₂ hervorgerufen wird.

Ähnlich wie bei H₂-haltigen Lichtbögen ist auch bei N₂-Zusätzen zum Schutzgas eine Erhöhung der spezifischen volumetrischen Wärmekapazität im Bereich der Dissoziation vorhanden. Bei N₂ ist dieser Effekt ab einer Temperatur von ca. 8.000 K festzustellen. Durch den erhöhten Energiebedarf wird der Lichtbogenansatz ausgekühlt und in Richtung der Elektroden spitze verschoben. Da bei N₂ die Dissoziation bei einer höheren Temperatur als bei H₂ stattfindet, d. h. bei Vorhandensein der elektrischen Leitfähigkeit im Plasma, ist dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt wie bei H₂. Dennoch wird durch den verminderten Strömungsquerschnitt die Stromdichte erhöht, so dass infolge der

Widerstandserwärmung die Plasmatemperatur im Lichtbogenkern sowie infolge der Lorentzkraft die Strömungsgeschwindigkeit ansteigt, vgl. Abbildung 4-32.

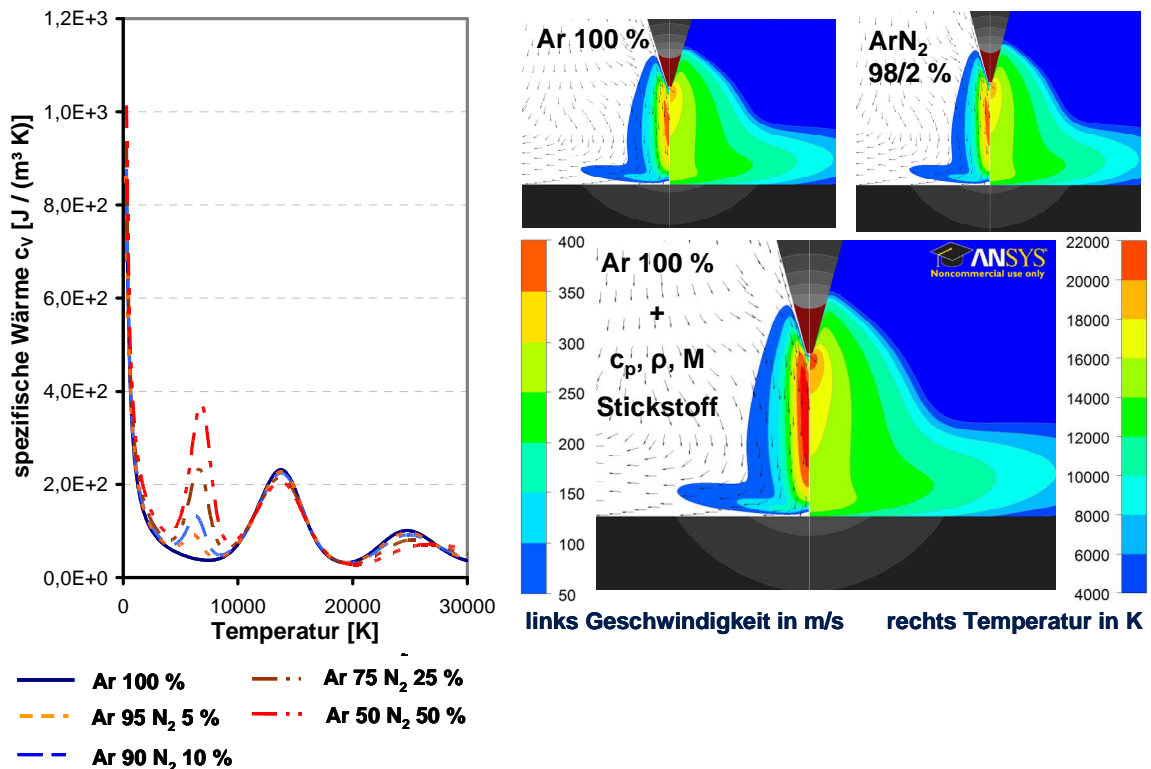


Abbildung 4-32: links: Einfluss von Temperatur und N₂-Konzentration auf spezifische volumetrische Wärmekapazität von ArN₂, unten: Einfluss von ρ , c_p und M auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArN₂-Gasgemischen

Die thermische Leitfähigkeit von N₂ ist im gesamten Lichtbogentemperaturbereich im Vergleich zu Rein-Ar geringfügig höher. Bei der Dissoziation von N₂ bei ca. 8.000 K liegt das Maximum der thermischen Leitfähigkeit vor, vgl. Abbildung 4-33. Dies kann zu einem geringfügig breiteren Lichtbogenquerschnitt führen, wodurch die geringe Erhöhung der Wärmeeinbringung in den Grundwerkstoff durch N₂-haltige Prozessgase erklärbar ist.

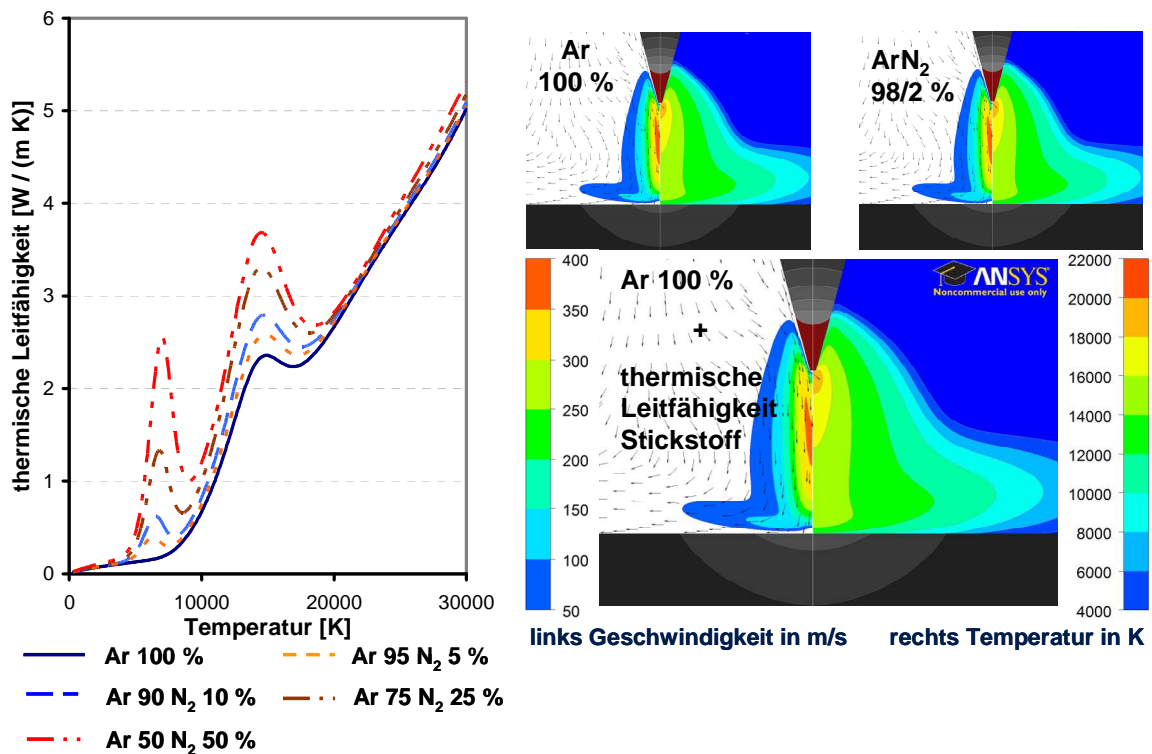


Abbildung 4-33: links: Einfluss von Temperatur und N_2 -Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArN_2 , rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArN_2 -Gasgemischen

4.2.3 Zusammenfassung

Um die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessgaszusammensetzung und Lichtbogeneigenschaften zu untersuchen, wurden Sensitivanalysen durchgeführt. Dafür war es notwendig, eine geeignete numerische Beschreibung der Fallgebietsmechanismen zu verwenden. Durch einen Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse bei Verwendung der Ansätze nach SANSONNENS bzw. LOWKE und TANAKA wurde erkannt, dass beide Ansätze nicht zur Fallgebietsmodellierung für Prozessgasmischungen aus Ar mit He, H_2 bzw. N_2 geeignet sind. Um die Fallgebiete auch bei solchen Prozessgasmischungen berücksichtigen zu können, wurde ein neues numerisches Modell (Widerstandsmodell) entwickelt. Dieses zeigt gute Übereinstimmungen mit den durch Staudruck- und Energiedichtemessungen experimentell ermittelten Lichtbogeneigenschaften.

Mit Hilfe der Sensitivanalysen konnten physikalische Erklärungen für die experimentell ermittelten Einflüsse der Schutzgaszumischungen auf die Lichtbogeneigenschaften gefunden werden, vgl. Tabelle 4-5.

Hervorzuheben ist, dass die bei Verwendung von Gaszumischungen im Vergleich zu Rein-Ar erhöhte Energieeinbringung im Wesentlichen durch die erhöhte thermische Leitfähigkeit der zusätzlichen Gaskomponenten hervorgerufen wird.

Der Einfluss auf den Staudruck ist komplexer. Bei He-Zumischungen führt sowohl die erhöhte Plasmaviskosität als auch die höhere thermische Leitfähigkeit zur Staudruckverringerng. Bei H₂- sowie N₂-Zumischungen wird hingegen die Erhöhung des Staudruckes vorrangig durch die Größen der inneren Energie hervorgerufen, wobei bei ArH₂-Gemischen zusätzlich auch die verringerte Viskosität den Lichtbogen beeinflusst.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Sensitivanalysen: Erkennen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

		Lichtbogeneigenschaften	
		Staudruck	Gesamtwärmeeinbringung
He-Zumischung	Effekt	Verringerung in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge LBL klein: Staudruckminderung gering LBL groß: Staudruckminderung groß	Erhöhung ↑↑
	Ursache	Viskosität thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)	thermische Leitfähigkeit elektrische Leitfähigkeit
H ₂ -Zumischung	Effekt	Erhöhung	Erhöhung ↑
	Ursache	Viskosität thermische Leitfähigkeit elektrische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)	thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)
N ₂ -Zumischung	Effekt	Erhöhung	Erhöhung ↑
	Ursache	Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)	thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie (ρ , c_p , M)

4.3 Gezieltes Ausnutzen der Prozessgaseigenschaften zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von WIG-Verfahren

4.3.1 Versuchsdurchführung

Durch Schweißversuche wurden die aus den diagnostischen und numerischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse praxisnah überprüft. Hieraus können Kennzahlen bezüglich der Wirtschaftlichkeit und Empfehlungen für die Anwender zur gezielten Schutzgasauswahl abgeleitet werden.

Die Versuche wurden an einem Schweißversuchsstand mit einer Linearvorschub-einheit durchgeführt. Die Blechabmaße betragen 250 x 100 mm. Die Materialien wurden auf einer gekühlten Kupferplatte aufgespannt, um einen Wärmestau im Werkstoff zu vermeiden.

Da vor allem die reaktiven Gase H_2 und N_2 hinsichtlich der schweißgeeigneten Werkstoffe eingeschränkt sind, wurden für die Schweißversuche in Absprache mit dem PbA die in nachfolgender Tabelle zusammengefassten Materialien und Schutzgase ausgewählt.

Tabelle 4-6: Für Schweißversuche eingesetzte Werkstoffe und geeignete Schutzgase

Werkstoff	Gefüge	Blechdicke	geeignete Schutzgase
S355	normalisierend gewalzter Stahl	10 mm	Ar, ArHe
1.4307	Austenit	9 mm	Ar, ArHe, ArH ₂
1.4462	Duplex	6 mm	Ar, ArHe, ArN ₂

Die Durchführung der Schweißversuche erfolgte in zwei Phasen:

1. Einbrandschweißversuche mittels Blindnähten
 - a. mit konstanten Schweißparametern (I , v_s , LBL, U_{LB}) → Vergleich der Einbrandprofile
 - b. mit Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit → maximal mögliche Schweißgeschwindigkeit ohne äußerlich sichtbare Nahtunregelmäßigkeiten
2. Verbindungsschweißungen an komplexeren Bauteilen

Die Schweißversuche wurden wie die diagnostischen Untersuchungen mit der Schweißstromquelle EWM Tetric 500 und einem wassergekühlten Maschinenbrenner BINZEL ABITIG MT 400W durchgeführt.

4.3.2 Einschweißversuche

4.3.2.1 Unlegierter Stahl S355

Für den Werkstoff S355 können beim WIG-Schweißen aus metallurgischen Gründen lediglich die inerten Schutzgase Ar, He sowie Gemische aus diesen beiden Komponenten verwendet werden. Aus den bisherigen Untersuchungen ist bekannt, dass durch He-Zumischung der Staudruck des Lichtbogens gemindert und die Wärmeeinbringung in das Bauteil jedoch signifikant erhöht wird.

In Abbildung 4-34 sind die erzielten Schweißnahttiefen und -breiten für Argon und ArHe-Gemische mit 30 % He sowie mit 70 % He zusammengefasst. Dabei wurde bei einer konstanten Stromstärke von 200 A die Lichtbogenlänge zwischen 2, 5 und 8 mm variiert.

Es ist zu erkennen, dass mit Erhöhung der Lichtbogenlänge von 2 auf 5 mm für alle untersuchten Schutzgasgemische die Einbrandtiefe abnimmt, die Schweißnahtbreite sich jedoch vergrößert. Dabei wird die Einbrandfläche, d. h. sowohl Tiefe als auch Breite, in Abhängigkeit vom He-Gehalt aufgrund der erhöhten Energieeinbringung und der Wärmeleitung im Bauteil im Vergleich zu Argon vergrößert. Somit kann über den He-Gehalt durch den erhöhten Energieeintrag auch bei Lichtbögen mit geringen Staudrücken die Schweißnahttiefe gezielt beeinflusst werden.

Eine Erhöhung der Lichtbogenlänge auf 8 mm führt bei Rein-Ar zu einer Verringerung der Einbrandtiefe sowie einer geringen Abnahme der Schweißnahtbreite. Bei He-haltigen Gasen bleibt die Tiefe des Einbrandes konstant, jedoch steigt die Breite der Schweißnaht.

Es bleibt festzuhalten, dass bei He-Zugaben in das Schutzgas bei einer Lichtbogenlänge von 2 mm aufgrund des höchsten Staudruckes und der größten elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte die größten Einschweißstiefen

hervorgerufen werden. Eine Erhöhung der Lichtbogenlänge führt jedoch zu einem flacheren, aber breiteren Schmelzbad.

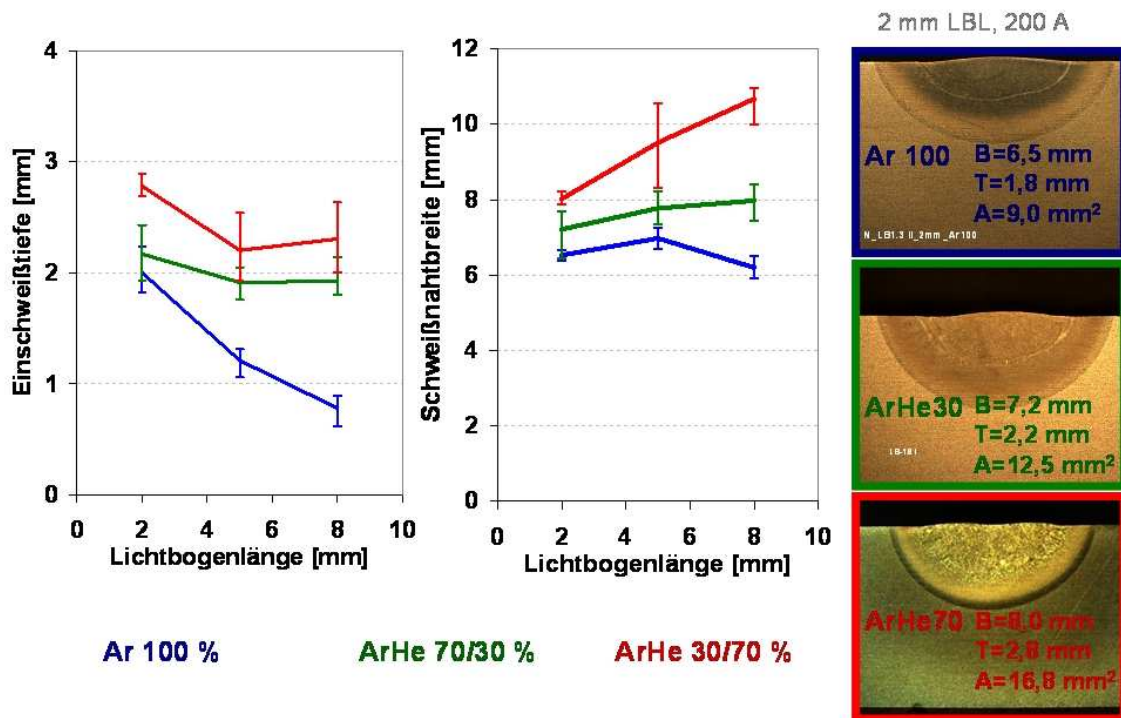


Abbildung 4-34: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge bei S355 mit Ar und ArHe-Gemische, ausgewählte Probenquerschnitte (rechts)

Als zweiter Lichtbogenparameter wird der Einfluss der Stromstärke betrachtet, vgl. Abbildung 4-35. Infolge der mit steigender Stromstärke erhöhten Energieeinbringung in das Bauteil steigen sowohl die Einschweißtiefe als auch die Schweißnahtbreite proportional zur Stromstärke an. Besonders hervorzuheben ist das Verhalten von Mischgas mit 30 % He-Anteil. Im unteren Stromstärkebereich bis 200 A bewirkt dieses Schutzgas im Vergleich zu Rein-Ar nur eine geringe Vergrößerung der Schweißnahtbreite. Bei 300 A ist jedoch sowohl die Schweißnahttiefe als auch –breite deutlich größer als mit Rein-Ar und nur geringfügig kleiner als bei Mischgas mit 70 % He-Anteil.

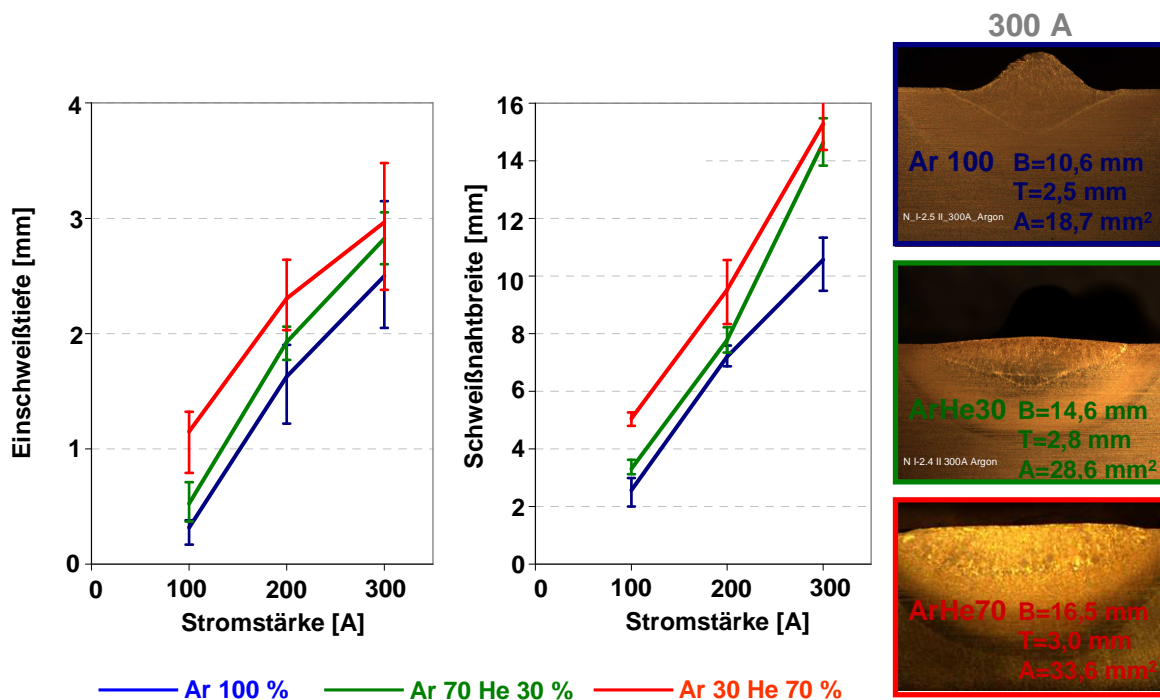


Abbildung 4-35: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Schweißstromstärke (LBL = 5 mm), ausgewählte Probenquerschliffe (rechts)

Durch die Verwendung von He-haltigen Gasen vergrößert sich bei konstanter Lichtbogenlänge die Lichtbogenlänge, so dass der Energieeintrag erhöht wird. Aufgrund dessen wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Lichtbogenlänge konstant gehalten, jedoch die Lichtbogenlänge variiert wurde. Die Auswertung der Einbrandprofile zeigt, dass He-Zumischungen trotz der geringeren Lichtbogenlänge bei gleicher Spannung zu einer deutlichen Vergrößerung sowohl der Schweißnahtbreite als auch der Schweißnahtfläche führen, vgl. Abbildung 4-36. Die Schweißergebnisse korrelieren mit den Untersuchungen zum Wirkungsgrad. Zusätzlich ist es jedoch möglich, dass der Schmelzwirkungsgrad auch durch die Erhöhung der Wärmestromdichte positiv beeinflusst wird.

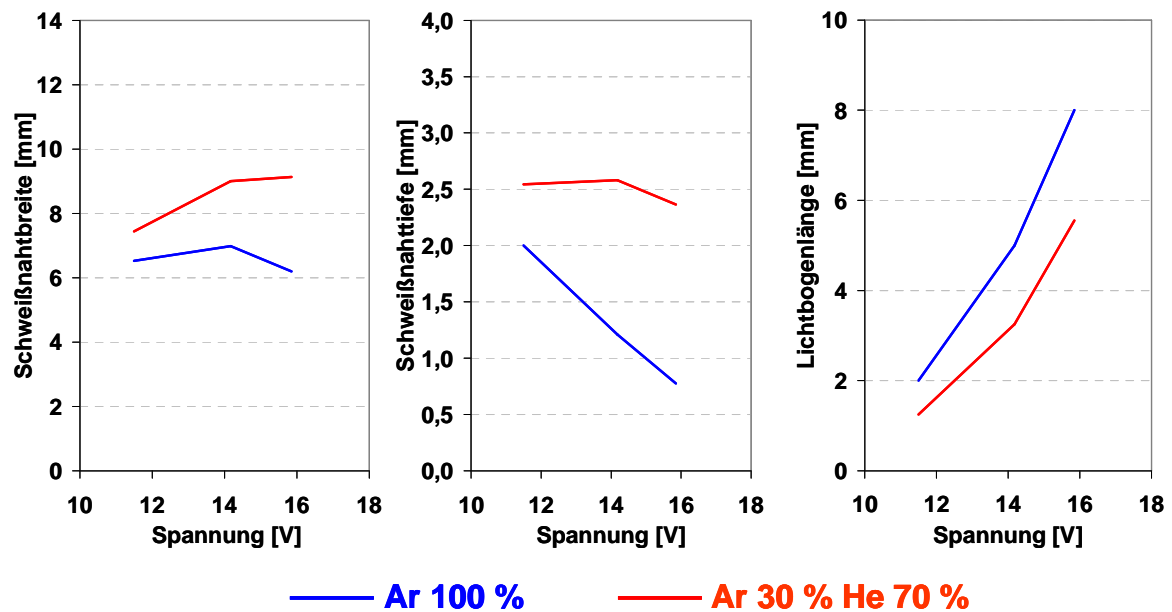


Abbildung 4-36: Einschweißtiefe (links) und –breite (rechts) in Abhängigkeit von Spannung ($I = 200 \text{ A}$)

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass He-Zumischungen zu einer erhöhten Energieeinbringung führen. In der Praxis kann dieser Vorteil gezielt für eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bei konstantem Einbrand genutzt werden. In der nachfolgenden Abbildung 4-37 sind die bei definierten Stromstärken in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung maximal erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten dargestellt. Eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit würde zu äußerlich sichtbaren Nahtunregelmäßigkeiten führen. Die geschwindigkeitslimitierenden Unregelmäßigkeiten waren Einbrandkerben oder Humpingeffekte.

Die Versuche zeigen, dass mit steigender Stromstärke die maximale Schweißgeschwindigkeit sinkt. So sind bei 100 A sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten ohne Nahtunregelmäßigkeiten möglich, jedoch sind die Einbrandtiefen aufgrund der sehr geringen Streckenenergie minimal. Mit steigender Stromstärke steigt zum einen die Streckenenergie, so dass die Schweißnahtfläche steigt. Zum zweiten steigt jedoch auch das Risiko für Einbrandkerben. Humpingeffekte treten nur bei Rein-Ar mit 300 A auf. Bei den anderen Parametern sind Einbrandkerben die restriktiven Fehler.

Durch das Zumischen von He kann die maximale Schweißgeschwindigkeit bei 200 und 300 A im Vergleich zu Rein-Ar verdoppelt werden. Eine Erhöhung des He-Gehaltes von 50 auf 70 % im Schutzgas hat jedoch einen nur sehr geringen Einfluss auf die mögliche Schweißgeschwindigkeit. Jedoch wird aufgrund der erhöhten Energieeinbringung durch 70 % He im Vergleich zum 30 %-He-haltigen Gemisch die Schweißnahtquerschnittsfläche geringfügig vergrößert, vgl. Abbildung 4-37 rechts.

Hervorzuheben ist zudem, dass bei 300 A Stromstärke trotz der Verdopplung der Schweißgeschwindigkeit bei He-Zumischungen im Vergleich zu Rein-Ar nur eine um 20 % geminderte Schweißnahtfläche zu verzeichnen ist.

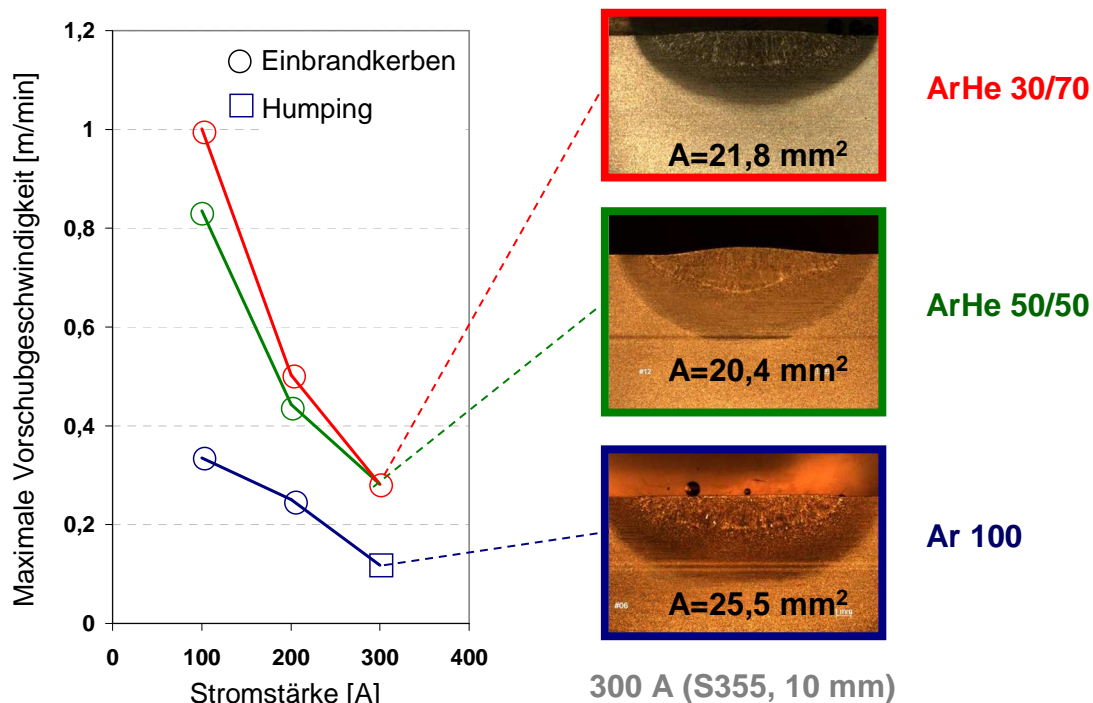


Abbildung 4-37: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für S355

4.3.2.2 Austenitischer Werkstoff 1.4307

Für den austenitischen Werkstoff 1.4307 wurde die Eignung der inerten sowie H₂-haltigen Prozessgase untersucht. Dabei zeigte sich, dass alle Schutzgaszumischungen zu einer signifikanten Erhöhung der Schweißnahtquerschnittsfläche im Vergleich zu Rein-Ar beitragen. Bei dem Vergleich der

Wirkung von He- und H₂-Zumischungen wird der Einfluss der Lichtbogeneigenschaften, d. h. des Staudruckes und der Gesamtwärme, auf das Einbrandverhalten deutlich. He führt aufgrund seines breiteren Energiedichteprofiles und des geringen Staudrucks zu einem breiteren, aber flacheren Einbrandprofil.

Die H₂-Menge wirkt sich vorrangig in der Breite der Schweißnaht aus. Die Tiefe des Einbrandes unterscheidet sich kaum bei der Verwendung von 2 bzw. 5 % H₂.

Auch das dreikomponentige Mischgas mit 3 % He, 1 % H₂ und 96 % Ar bewirkt eine Erhöhung des Einbrandes. Diese Erhöhung ist jedoch abhängig von der Lichtbogenlänge. Die Einschweißtiefe wird vor allem bei einer kurzen Lichtbogenlänge erhöht.

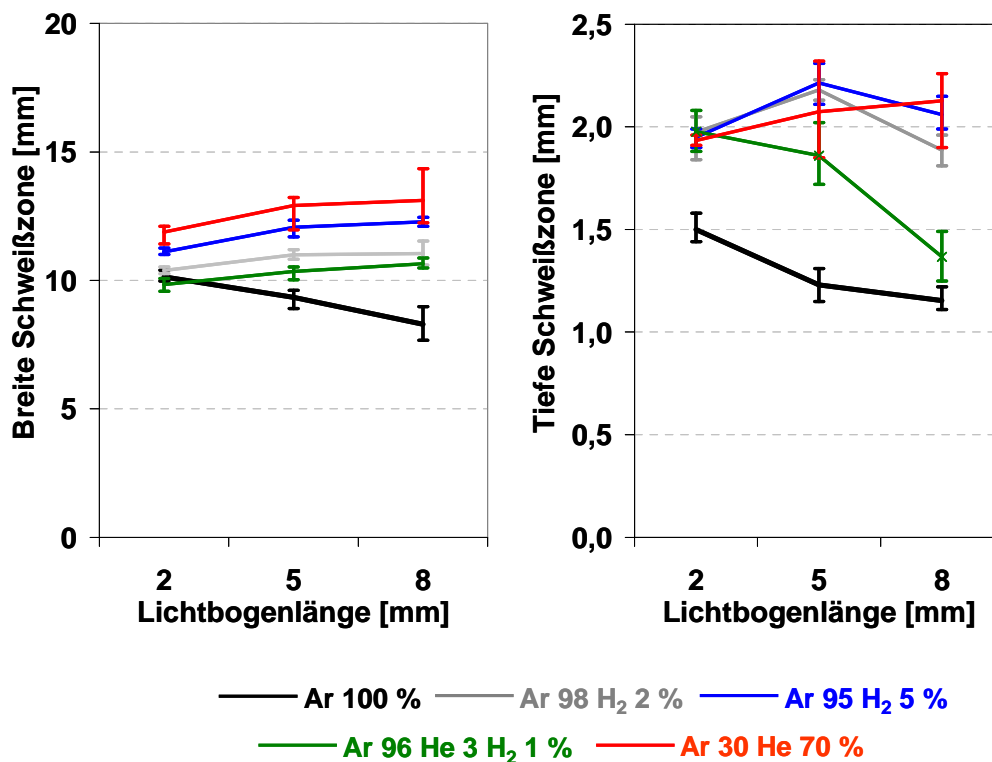


Abbildung 4-38: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Breite und Tiefe der Schweißnaht ($I=200$ A) bei 1.4307

Durch die Schweißversuche wurde erkannt, dass schon 5 % H₂ im Schutzgas einen ähnlichen Effekt haben wie 70 % He-Zumischungen. Dieser große Einfluss von H₂-Zumischungen war entsprechend der diagnostischen Untersuchungen nicht zu erwarten, vgl. Kapitel 4.1.4.

Es ist zu vermuten, dass das Geteilte-Anoden-Verfahren für die Analyse der molekularen Gase weniger geeignet ist als für Reingase. Als Ursache dafür sind die Unterschiede in der Oberflächentemperatur der Werkstücke zu nennen. Beim Geteilte-Anoden-Verfahren muss die gekühlte Cu-Platte eine Temperatur unterhalb von 1084 °C (Schmelztemperatur von Kupfer) haben. In praktischen Schweißversuchen ist jedoch mit einer Oberflächentemperatur der Schmelze zwischen ca. 1500 bis 2500 °C zu rechnen. Ab 2000 °C Plasmatemperatur steigt die thermische Leitfähigkeit von H₂-haltigen Prozessgasen im Vergleich zu Rein-Ar sehr stark an, vgl. Kapitel 4.2.2. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der geringen Oberflächentemperatur beim Geteilte-Anoden-Verfahren die Wärmeleitfähigkeit in der Grenzschicht im Vergleich zum Schweißen an Stahlwerkstoffen zu gering ist und aufgrund dessen die Diskrepanz zwischen der gemessenen Gesamtwärmeeinbringung und Schweißnahtfläche bei Schweißversuchen besteht. Bei der Untersuchung der maximalen Schweißgeschwindigkeit wurden bei dem austenitischen Werkstoff aufgrund der im Vergleich zum S355 erhöhten Viskosität keine Humpingeefekte, sondern ausschließlich Einbrandkerben als Nahtunregelmäßigkeit festgestellt. Dabei zeigen die Versuche die Bedeutung der Gesamtenergieeinbringung, d. h. alle Schutzgasgemische mit He- bzw. H₂-Zumischungen ermöglichen höhere Schweißgeschwindigkeiten als mit Rein-Ar, vgl. Abbildung 4-39.

Jedoch hat bei diesen Gasgemischen auch die Verteilung der Energiedichte einen Einfluss. Dies wird beim untersuchten dreikomponentigen Mischgas deutlich. Durch die Zumischung von He wird das Energiedichteprofil breiter, so dass der Schmelzbadrand stärker erwärmt wird. Dies verringert die Viskosität der Schmelze und erhöht somit die Fließfähigkeit des flüssigen Materials, so dass die Gefahr von Einbrandkerben verringert wird und vergleichsweise hohe Vorschubgeschwindigkeiten möglich sind. So kann mit dem untersuchten dreikomponentigen Mischgas bei 300 A die gleiche Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden wie bei einem Schutzgas mit 70 % He oder mit 5 % H₂. Aufgrund des geringen He- und H₂-Anteils ist jedoch die Gesamtenergieeinbringung geringer, wodurch eine kleinere Schweißnahtquerschnittsfläche bei sonst konstanten Parametern entsteht.

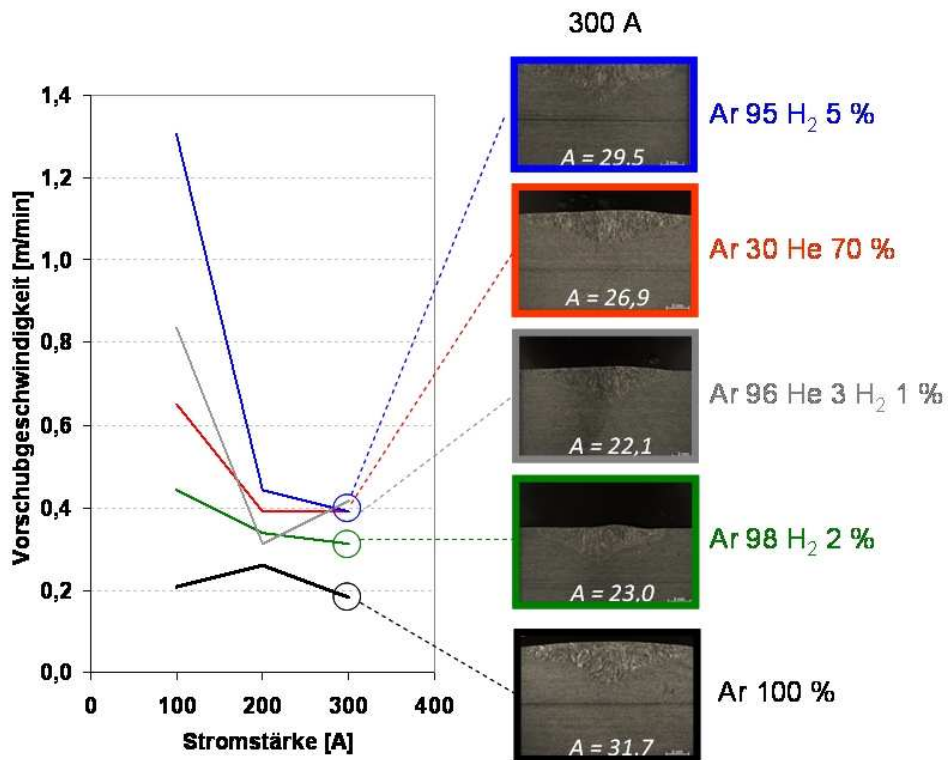


Abbildung 4-39: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für 1.4307

4.3.2.3 Duplexstahl 1.4462

Für den Duplexstahl 1.4462 zeigte sich hinsichtlich der Einbrandprofile bei konstanten Schweißparametern, dass das N₂-haltige Schutzgas die Schweißnahtbreite geringfügig, die Einbrandtiefe jedoch im Vergleich zu Rein-Ar stärker erhöht, vgl. Abbildung 4-40. Es ist zu vermuten, dass dieser Effekt auf den im Vergleich zum Rein-Ar erhöhten Staudruck zurückzuführen ist.

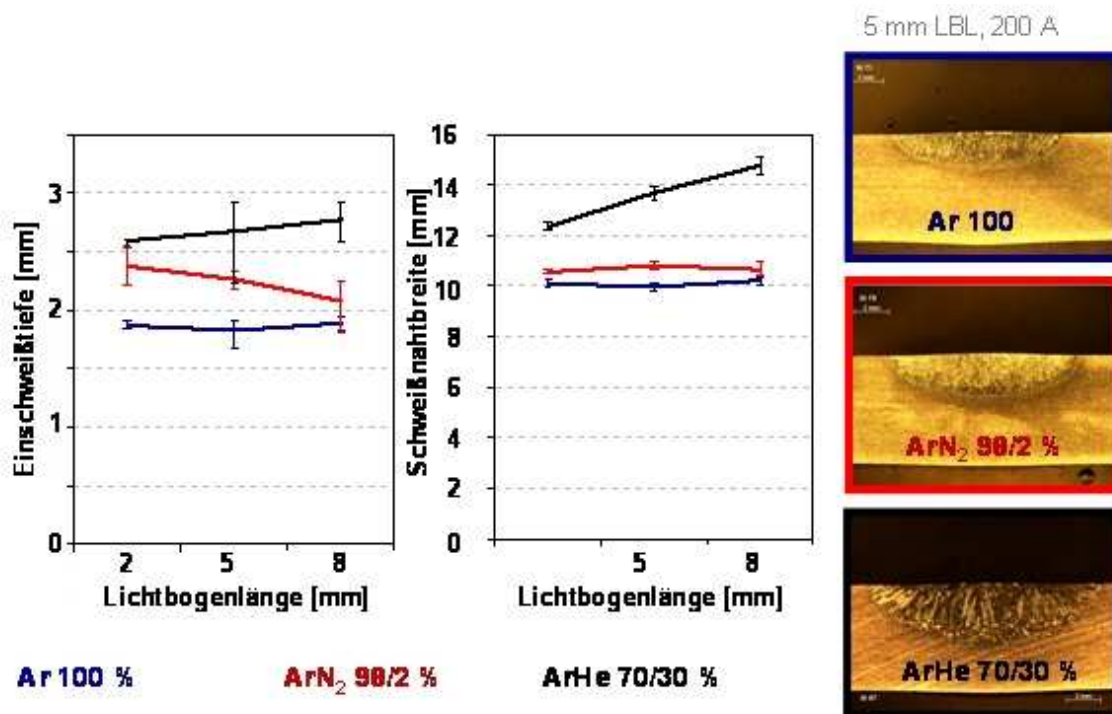


Abbildung 4-40: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge bei 1.4462, ausgewählte Probenquerschliffe (rechts)

Die Versuche zur maximalen Vorschubgeschwindigkeit bei dem Duplex-Stahl 1.4462 zeigen, dass die N₂-Zumischung aufgrund seiner im Vergleich zu Rein-Ar nur unwesentlich beeinflussten Energieeinbringung die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit nicht messbar beeinflusst, vgl. Abbildung 4-41.

Aus den Ergebnissen der praktischen Schweißversuche zum Einfluss des N₂ ist zu schließen, dass diese Schutzgasmischung vorrangig aus metallurgischen, jedoch weniger aus verfahrenstechnischen Gründen einzusetzen ist.

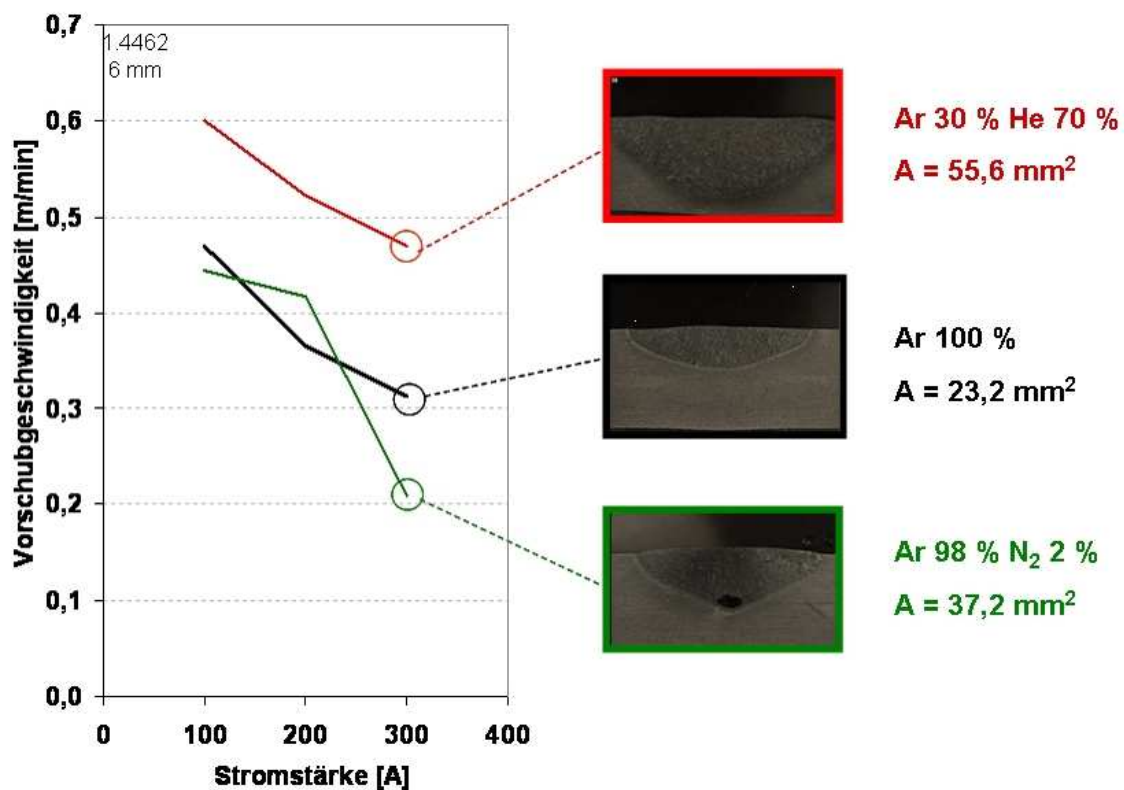


Abbildung 4-41: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für 1.4462

4.3.3 Nutzung der Erkenntnisse zur Auswahl einer neuen Gasmischung

Als Ergebnis der Schweißversuche wurde erkannt, dass sowohl durch Helium als auch durch Wasserstoffzumischungen der Einbrand sowie die Schweißgeschwindigkeit bei austenitischen Werkstoffen erheblich gesteigert werden können. Das größte Potential kann hierbei Wasserstoff zugeordnet werden. Jedoch sind die Möglichkeiten zur Erhöhung des Wasserstoffanteils begrenzt. Unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen werden Gasgemische mit Wasserstoffgehalten über 10 % selten angewendet. Aus den numerischen Untersuchungen ist jedoch bekannt, dass durch einen hohen Heliumanteil die Wärmeleitfähigkeit und der Energieeintrag ebenso erhöht werden. Dabei ist festzustellen, dass die Wärmeleitfähigkeit der beiden Gaszumischungen sich sehr gut ergänzen:

- Heliumzumischungen erhöhen die Wärmeleitung aus den heißen Lichtbogenkern in den Randbereich
- Wasserstoffzumischungen erhöhen den Wärmeübergang in das Werkstück.

Die Kombination dieser Gase ermöglicht somit einen besonders hohen Energieeintrag. Außerdem bewirkt der Heliumanteil eine signifikante Minderung des Staudrucks und dadurch eine Steigerung der Schweißstromstärke ohne die Ausbildung von Humping. Aufgrund dessen wurde eine Schutzgasmischung mit 70 % Helium, 10 % Wasserstoff und 20 % Argon hergestellt und getestet.

Die Versuche zeigen, dass bei der Standardvorschubgeschwindigkeit von 25 cm/min diese Schutzgasmischung zu einer Vergrößerung der Schweißnahtbreite im Vergleich zu ArHe 30/70 bzw. ArH₂ 90/10 führt, wobei die Schweißnahttiefe im Toleranzbereich der bereits angesprochenen Schutzgasmischungen liegt, vgl. Abbildung 4-42.

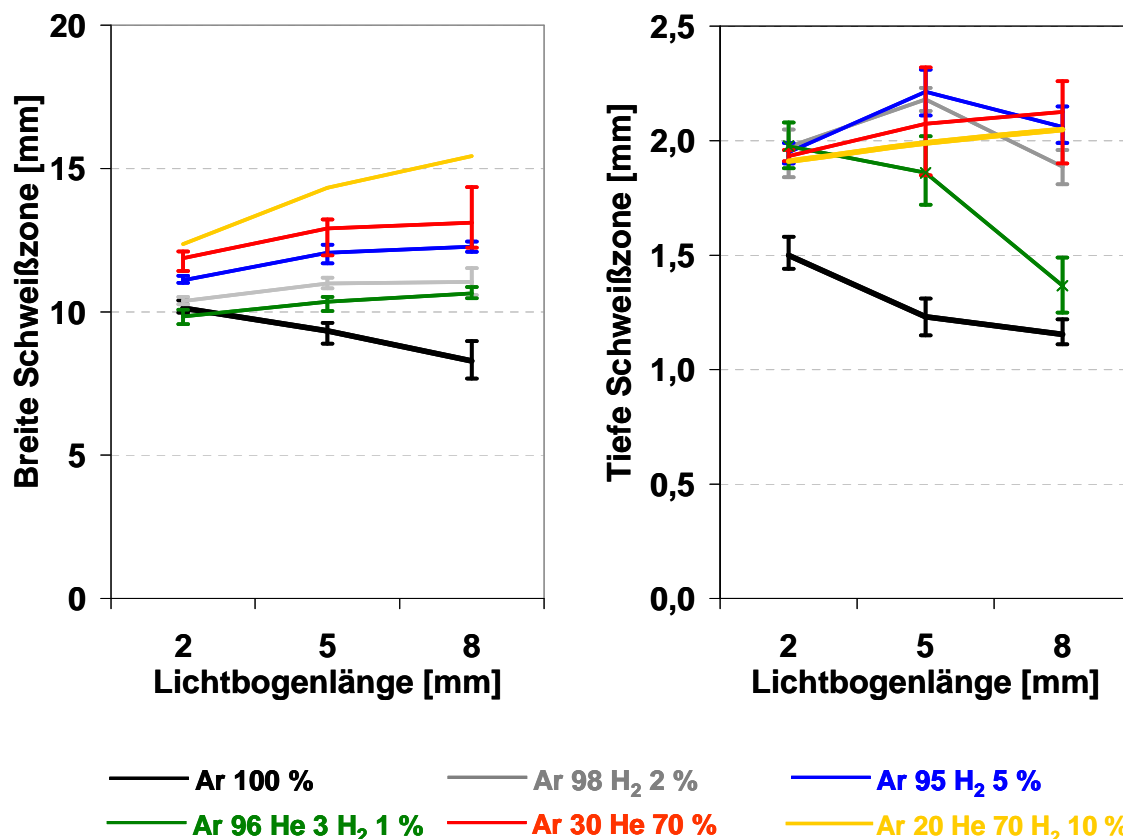


Abbildung 4-42: Vergleich Einfluss der Lichtbogenlänge auf Breite und Tiefe der Schweißnaht (I=200 A) bei 1.4307 – mit neuer Schutzgasmischung Ar 20 He 70 H₂ 10 %

Weitere Vorteile dieser Gaszusammensetzung konnte insbesondere in Bezug auf die maximale Schweißgeschwindigkeit erkannt werden. So wurde bei den bisherigen Schweißversuchen bei 200 und 300 A mit zweikomponentigen Gasen aus Argon und 70 % He- bzw. 10 % Wasserstoff eine maximale Schweißgeschwindigkeit von ca. 0,4 m/min erreicht werden, vgl. Abbildung 4-39. Bei einer weiteren Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit wurden Einbrandkerben verursacht. Das neue Schutzgas ermöglicht deutlich höhere Schweißgeschwindigkeiten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/min ohne Ausbildung von Einbrandkerben, vgl. Abbildung 4-43. Natürlich sind aufgrund der geringen Streckenenergie die Schweißnahtflächen kleiner als bei den Schweißversuchen mit ca. 0,4 m/min Vorschub in Kapitel 4.3.2.2, jedoch kann dieser Nachteil durch die Erhöhung der Schweißstromstärke teilweise ausgeglichen werden.

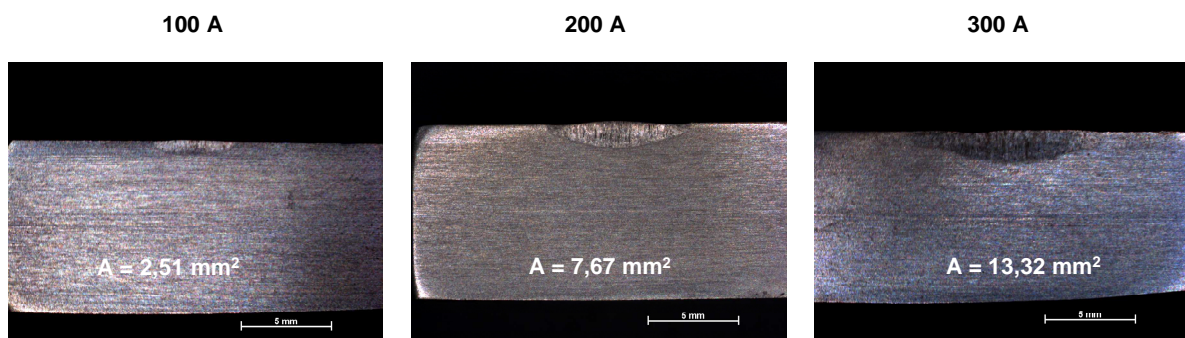


Abbildung 4-43: Einbrandprofile mit dem Schutzgas Ar 20 He 70 H₂ 10 % mit 1 m/min Vorschubgeschwindigkeit, 5 mm LBL, Werkstoff: 1.4307

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das erhöhte Verständnis über die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Schutzgaszusammensetzung, Lichtbogeneigenschaften und Schweißnahtausbildung die Generierung eines neuen leistungsfähigeren WIG-Prozessgases ermöglicht. Dieses Gas ist vor allem für das automatisierte Schweißen von austenitischen Werkstoffen einsetzbar, wobei festzustellen ist, dass diese Ergebnisse bei bzw. durch eine hohe Schweißstromstärke generiert werden.

4.3.4 Verbindungsschweißungen an komplexeren Bauteilen

4.3.4.1 Aufschmelzen einer Plasmaschweißnaht

Ein Anwendungsbeispiel für das WIG-Schweißen ist das Aufschmelzen einer Plasmaschweißwurzel, vgl. Abbildung 4-44. Dabei wird der Werkstoff 1.4301 mit einer Dicke von 9 mm zuerst mittels Plasma geschweißt. Um die Kerbwirkung infolge des Wurzeldurchgangs zu minimieren, muss die Wurzel in einem zweiten Arbeitsschritt aufgeschmolzen werden.

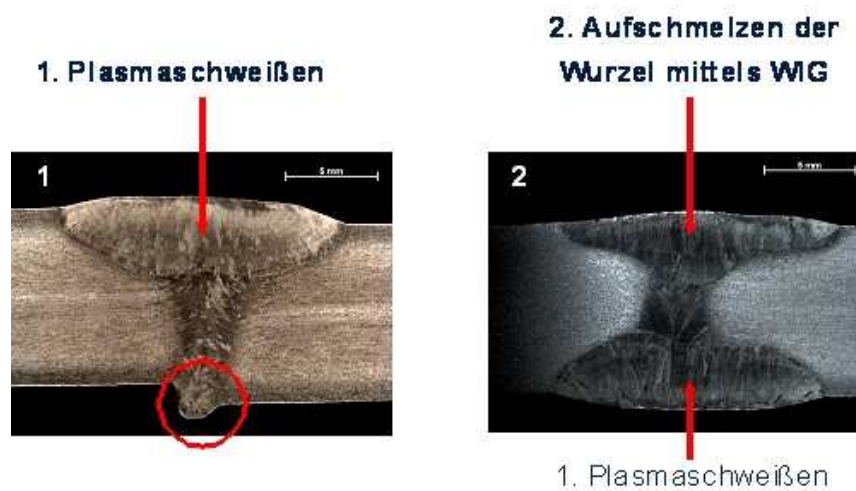


Abbildung 4-44: Darstellung Versuchsziel: Aufschmelzen einer mit Plasma geschweißten Nahtwurzel

Als Referenzwert wird das Aufschmelzen der Plasmawurzel mit Argon und einer Schweißgeschwindigkeit von 15 cm/min (LBL = 7 mm) durchgeführt. Dabei ergibt sich eine Schweißnahtbreite von 15,5 mm. Ziel der Untersuchungen war es, diese Breite auch unter Nutzung anderer Schutzgase, die eventuell eine höhere Schweißgeschwindigkeit erlauben, zu gewährleisten.

Für den hochlegierten austenitischen Werkstoff 1.4301 sind neben Argon auch ArHe sowie ArH₂-Gemische verwendbar. Die Verwendung von ArH₂ mit 10 % H₂ ermöglicht bei vergleichbarer Schweißnahtgeometrie eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit auf 40 cm/min, 70 % He im Schutzgas hingegen limitieren die Schweißgeschwindigkeit auf 29 cm/min, vgl. Abbildung 4-45. Durch dieses Beispiel wird wiederum der große Einfluss des H₂ auf den Energieeintrag deutlich. Bei austenitischen Werkstoffen ist das Anwendungspotential von H₂-haltigen Gasen deutlich höher als das von He-haltigen Schutzgasen.

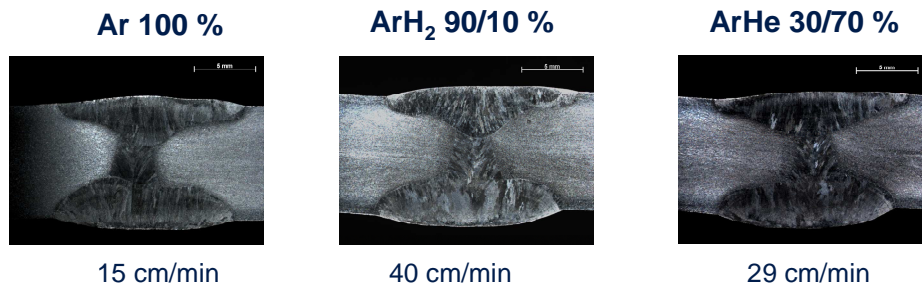


Abbildung 4-45: Maximale Schweißgeschwindigkeit beim Aufschmelzen einer Plasmawurzel mittels WIG unter Verwendung verschiedener Schutzgase

4.3.4.2 Rohr-Blech-Verbindung

Ein weiteres Anwendungsbeispiel, bei dem die verfahrenstechnische Bedeutung der unterschiedlichen Schutzgasgemische gezeigt werden soll, ist eine Rohr-Blech-Verbindung. Dabei besteht das Rohr aus dem austenitischen Werkstoff 1.4828 und das Blech aus dem unlegierten Stahl S355, vgl. Abbildung 4-46. Folglich können für diese Anwendung nur Rein-Ar bzw. ArHe-Gemische angewendet werden.

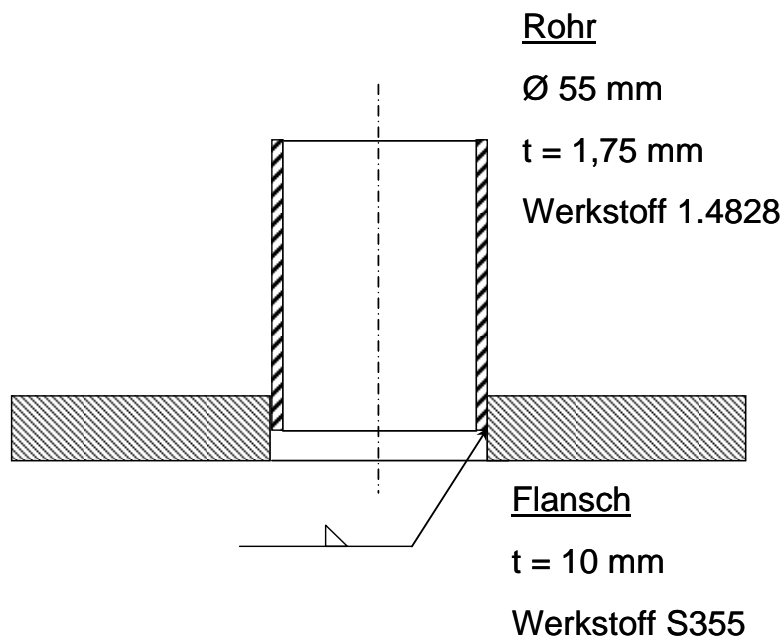


Abbildung 4-46: Aufbau Schweißversuch Blech-Rohr-Verbindung

Als Schweißzusatzwerkstoff wird ein Draht aus dem Werkstoff 1.4370 mit einem Durchmesser von 1,0 mm verwendet. Als Referenzgas wird Rein-Ar (Ar 4.6)

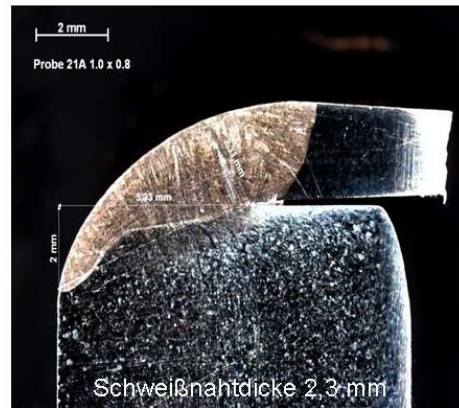
verwendet. Bei diesem Schutzgas ist eine maximale Schweißgeschwindigkeit ohne äußerlich erkennbare Nahtunregelmäßigkeiten von 55 cm/min möglich. Die Verwendung eines Schutzgases mit 70 % He ermöglicht hingegen die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit um fast 25 % auf 68 cm/min. Damit kann die Schweißzeit bei diesem Bauteil verringert werden und die Produktivität steigt, vgl. Abbildung 4-47.

Ar 100 %:

55 cm/min



Drahtvorschub: 2,3 m/min



Ar 30 He 70 %:

68 cm/min



Drahtvorschub: 3,3 m/min



Abbildung 4-47: Maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeiten bei Blech-Rohr-Verbindung (oben: Rein-Ar, unten ArHe mit 70 % He)

4.4 Schlussfolgerungen für methodisches Vorgehen bei der Gasauswahl

4.4.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Praxis ist neben der Prozessqualität und –stabilität für die Auswahl eines Schweißverfahrens die Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung. Das WIG-

Verfahren erzeugt zum einen Schweißnähte mit sehr hoher Nahtqualität, nachteilig sind jedoch die geringen erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten. Hinsichtlich der Schutzgasauswahl wird Argon aufgrund seines geringen Preises oftmals als Standardschutzgas eingesetzt. Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 beschriebenen Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass durch den Einsatz von Gasgemischen mit He-, H₂- oder N₂-Zumischungen die Schweißgeschwindigkeit sowie eventuelle Nacharbeit durch Verringerung von Einbrandkerben vermieden und somit die Gesamtprozesskosten verringert werden können. Im Folgenden soll eine Abschätzung der Gaskosten sowie eine Übersicht über mögliche Kosteneinsparungsmöglichkeiten beim Einsatz von Gasgemischen gegeben werden.

Zusammensetzung von Schweißnahtkosten

Durch TIPAJI et. al [32] wurde für das MIG-Schweißen ein ganzheitliches Kostenberechnungsmodell aufgestellt. Dabei werden folgende Kosten betrachtet:

- Zusatzwerkstoff
- Lohnkosten (Vorbereitungsaufwand + tatsächliche Schweißzeit)
- Strom
- Schutzgas
- Maschinen (Schweißgerät, Nahtvorbereitung, etc.)
- Werkzeuge

In [32] wurde für eine 0,229 m lange Überlappschweißnaht mit einer Schweißraupe ein Anteil des Schutzgases an den Gesamtkosten von 1 % ermittelt. Der größte Kostenfaktor sind in diesem Beispiel die Lohnkosten mit 78 %. Dahinter folgen die Kosten für den Schweißzusatz mit 20 %. Alle anderen Kosten betragen zusammen lediglich 1 %. Aus diesem Beispiel muss festgehalten werden, dass die Schutzgaskosten im Vergleich zu den Lohn- sowie Zusatzwerkstoffkosten einen sehr geringen Anteil haben und aufgrund dessen bei der gezielten Schutzgasauswahl auch die verfahrens- bzw. prozesstechnischen Vorteile betrachtet werden sollten.

Potential zur Kosteneinsparung beim Einsatz von Schutzgasgemischen

Die Schweißversuche in Kapitel 4.3 haben gezeigt, dass durch die Zumischung von He bzw. H₂ zum Schutzgas signifikante Erhöhungen der Schweißgeschwindigkeit möglich sind. Dieser Vorteil ist vorrangig für die automatisierte Fertigung mit hohem Anteil von Schweißzeiten im Vergleich zur Gesamtarbeitszeit von Interesse.

Des Weiteren wurde durch die Versuche erkannt, dass ArH₂- und ArHe-Gemische im Vergleich zu Ar bei konstanten Einbrandprofilen und Schweißgeschwindigkeiten mit geringeren Stromstärken arbeiten können. Dieser Effekt führt zum einen zu geringeren Stromkosten, zum anderen aber auch zu geringeren Anlaufzeiten, so dass der Nacharbeitsaufwand verringert bzw. vermieden werden kann.

4.4.2 Algorithmus für gezielte Gasauswahl

Ein Ziel des Projektes ist es, den Anwendern in der Praxis einen Algorithmus zur gezielten Schutzgasauswahl beim WIG-Schweißen von un- und hochlegierten Stählen zur Verfügung zu stellen.

Grundsätzlich gilt, dass als erstes die metallurgischen Restriktionen bei der Schutzgasauswahl berücksichtigt werden müssen, vgl. Tabelle 4-7 Zeile 1. Die metallurgischen Einschränkungen der Schutzgase ermöglichen dennoch für jeden Werkstoff mehrere Gaskomponenten. Aufgrund dessen muss in einem zweiten Schritt die Schutzgasauswahl nach verfahrenstechnischen und primär wirtschaftlichen Aspekten erfolgen. Den geringsten Kosten für Argon steht hierbei die höhere Produktivität der Gasgemische gegenüber.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben jedoch eine Vielzahl von Vorteilen der zusätzlichen Gaskomponenten hinsichtlich Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit oder Einbrand systematisch aufgezeigt. Im Folgenden werden diese verfahrenstechnischen Faktoren zusammen gefasst und als Hilfe zur Schutzgasauswahl zur Verfügung gestellt, vgl. Tabelle 4-7.

Tabelle 4-7: Algorithmus für gezielte Prozessgasauswahl

1 Metallurgische Effekte	
Werkstoffe	Unleg. Stähle Austenit, Ni-Basislegierungen Duplexstähle
Prozessgase	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> ↓ Ar, ArHe </div> <div style="text-align: center;"> ↓ Ar, ArHe, ArH₂, ArHeH₂ </div> <div style="text-align: center;"> ↓ Ar, ArHe, ArN₂ </div> </div>
2 Beeinflussung der Energieeinbringung	
2.1	Erhöhung Schweißgeschwindigkeit → He, H ₂ und N ₂ geeignet
2.2	Vermeidung von Einbrandkerben → Erhöhung der Energieeinbringung → H ₂ und He besonders geeignet bzw. Verringerung der N ₂ nur geringer Einfluss Schweißgeschwindigkeit
2.3	Vermeidung von Humpingeffekten → Verringerung der → He, H ₂ und N ₂ geeignet Schweißgeschwindigkeit → Verringerung Staudruck → He mit großer LBL

5 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung

Das Ziel des Projektes war es, durch die Kombination von diagnostischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen die Lichtbogeneigenschaften in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung beim WIG-Schweißen zu charakterisieren und das Verständnis über die Wirkungsweise der Gase zu erhöhen. Durch die umfassende Analyse des Einflusses der Schutzgase auf den Lichtbogen und die Schmelzbadausbildung konnten Hinweise für eine gezielte Schutzgasauswahl sowie zur Erhöhung der Prozesswirtschaftlichkeit gegeben werden.

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde zum einen festgelegt, die Untersuchungen auf das WIG-Schweißen zu konzentrieren und zum anderen neun verschiedene Schutzgase zu analysieren. Die untersuchten Gase werden beim WIG-Schweißen für un- und hochlegierte Stahlwerkstoffe angewendet. Als Referenzgas diente Rein-Ar. Der Einfluss von He- (mit 15 %, 30 %, 50 % und 70 % He), H₂- (mit 2 % und 5 % H₂), HeH₂- (mit 3 % He und 2 % H₂) und N₂- (mit 2 % N₂) wurde als Variationsparameter untersucht. Des Weiteren wurde festgelegt, dass vorrangig der Einfluss der praxisrelevanten Schweißparameter Lichtbogenlänge (2 mm, 5 mm und 8 mm) und Stromstärke (100 A, 200 A und 300 A) betrachtet werden soll (Arbeitspaket 1). Die Konzentration auf das WIG-Verfahren, die Gasgemische sowie die Grundwerkstoffe war notwendig, da während der Bearbeitung zusätzlicher Aufwand bei der Entwicklung und Validierung der numerischen Modelle resultierte.

Im Rahmen des Vorhabens wurde durch das Messen des Staudruckes und des Energieeintrages am Werkstück der Einfluss des Prozessgases auf den Lichtbogen in Abhängigkeit von der Stromstärke und der Lichtbogenlänge charakterisiert. Dadurch erfolgte erstmals eine umfassende Dokumentation der Beeinflussung des WIG-Lichtbogens durch das Prozessgas.

Die gewonnenen Ergebnisse wurden im zweiten Bearbeitungsschritt zur Validierung und Kalibrierung eines neuen numerischen Simulationsmodells unter Berücksichtigung der Fallgebiete verwendet (Arbeitspaket 3). Es wurde erkannt, dass die bisher in der Literatur vorhandenen Simulationsmodelle nicht geeignet sind, um unterschiedliche Schutzgaszusammensetzungen und die Fallgebiete zu

berechnen. Aufgrund dessen wurde ein neues Modell zur numerischen Beschreibung der Fallgebietsmechanismen entwickelt, das auch den Einfluss der Prozessgaszusammensetzung abbilden kann (Arbeitspaket 2). Mit diesem Modell wurden Sensitivanalysen durchgeführt, die die physikalischen Ursachen für den Einfluss des Schutzgases auf die Lichtbogeneigenschaften erklären.

In Absprache mit den PbA-Mitgliedern wurden anschließend für das Arbeitspaket 3 geeignete Werkstoffe und Bauteile für Verbindungsschweißnähte ausgewählt. An diesen Beispielen wurde der Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf das Einbrandverhalten bzw. auf die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit untersucht, so dass praxisrelevante Hinweise für die Schutzgasauswahl dargestellt werden konnten.

Abschließend wurden die numerischen, diagnostischen und experimentellen Ergebnisse zusammengefasst und ein Algorithmus für die gezielte Schutzgasauswahl erarbeitet (Arbeitspunkt 4). Die begleitend durchgeführten Präsentationen und Veröffentlichungen (Arbeitspunkt 5) führten zu angeregten Diskussionen und praxisnahen Ideen für das Forschungsprojekt.

Folgende Ziele waren geplant und konnten erfolgreich umgesetzt werden:

1. Wissenschaftliche Darstellung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessgasen, Lichtbogen und Werkstückoberfläche.
2. Untersuchung des Einflusses der thermodynamischen und Transporteigenschaften der Prozessgase auf die Lichtbogeneigenschaften mittels Sensitivanalysen. Dafür musste zusätzlich zu den geplanten Arbeitspunkten ein geeignetes Simulationsmodell erstellt werden.
3. Aufzeigen der Potentiale der Schutzgase zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des WIG-Schweißprozesses durch den erhöhten Energieeintrag:
 - a. Steigerung der Schweißgeschwindigkeit
 - b. Minderung der notwendigen Vor- und Nacharbeiten.
4. Minderung der notwendigen Schweißversuche durch gezielte Prozessgasauswahl.

6 Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

6.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projektes stellen einen neuartigen Ansatz für die Weiterentwicklung und die gezielte Anwendung der bekannten Schutzgase beim WIG-Schweißen dar. Durch die Kombination der numerischen und experimentellen Analysemethoden konnte das Verständnis zu den Einflussmöglichkeiten durch Schutzgase bei WIG-Prozessen erhöht werden. Die Erkenntnisse wurden in einem Algorithmus zur Schutzgasauswahl zusammengefasst und erleichtern dem Anwender die gezielte Schutzgasauswahl.

Des Weiteren wurde im Rahmen des Projektes ein Simulationsmodell entwickelt, das erstmalig die numerische Modellierung von WIG-Prozessen mit unterschiedlichen Schutzgasgemischen, Stromstärken und Lichtbogenlängen ermöglicht. Mit diesem Modell wurden Sensitivanalysen durchgeführt, die das Verhalten des Lichtbogens in Abhängigkeit von der Schutzgaszusammensetzung physikalisch erklären können.

Das entwickelte Modell steht für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum WIG-Schweißen zur Verfügung. Dies kann z. B. die zielgerichtete Mischung von neuen Schutzgasen und die Prozessentwicklung betreffen.

Außerdem wurde eine Schutzgasmischung (70 % He, 20 % Ar und 10 % H₂) abgeleitet, die im Vergleich zu den bisher für austenitische Werkstoffe eingesetzten Schutzgasen eine signifikante Erhöhung der Energieeinbringung ermöglicht. Diese Erhöhung kann beispielsweise zur Steigerung der Schweißgeschwindigkeit bei sonst konstanten Parametern genutzt werden. Aufgrund der hohen erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten ist der Einsatz in automatisierten bzw. vollmechanisierten Fertigungen zu empfehlen.

6.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Die vorgestellten Forschungsergebnisse können vorrangig in der Produktion der Fachbereiche Metallerzeugung und –bearbeitung, Maschinenbau und Fahrzeug-

bau angewendet werden. Ein Vorteil für die klein- und mittelständischen Unternehmen ist in dem erhöhten Prozessverständnis, welches eine gezielte Schutzgasauswahl ermöglicht, zu sehen. Außerdem wurden die Verfahrensvorteile der untersuchten Schutzgase für Typenvertreter von un- und hochlegierten Stahlwerkstoffen ermittelt. Diese Daten können bei der betriebswirtschaftlichen Auswahl von Schutzgasen, v. a. für Kosten-Nutzen-Rechnungen in KMU, verwendet werden. Dabei wurden die Ergebnisse in einem Auswahlalgorithmus zusammengefasst, der die Gasauswahl vereinfachen und den Versuchsaufwand für die Einführung neuer Gase verringern soll.

Für den Anwender ist dabei v. a. die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses von großer Bedeutung. Die Literaturrecherche zeigte, dass die Gaskosten lediglich einen Anteil von ca. 1-2 % an den Gesamtkosten haben. Durch die Schweißversuche wurde zudem erkannt, dass der Einsatz eines Gasgemisches zu einer Verdopplung bzw. sogar Verdreifachung der Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu Rein-Ar führen kann. Somit sinkt die Prozesszeit insgesamt und die Lohnkosten, die ca. 75 % der Gesamtkosten betragen, können durch den Einsatz von Gasgemischen mit erhöhter Energieeinbringung signifikant verringert werden. Eine weitere Möglichkeit der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch den gezielten Einsatz der Schutzgase ist, dass bei konstanter Schweißgeschwindigkeit die Stromstärke bei Einsatz eines Gases mit hoher Energieeinbringung verringert werden kann.

Neben den Anwendern profitieren vor allem die Hersteller technischer Gase von den Ergebnissen des durchgeführten Projektes. Sie können mit den nun wissenschaftlich belegten Zusammenhängen zwischen Schutzgas und Lichtbogeneigenschaften ihren Kunden das Potential der Gase aufzeigen. Zum anderen können die Erkenntnisse bzw. das Simulationsmodell für die Entwicklung neuer Gase genutzt werden. Hierfür exemplarisch ist die Entwicklung eines WIG-Prozessgases v. a. für das automatisierte Schweißen von austenitischen Werkstoffen. Das Gas ermöglicht eine erhebliche Steigerung der maximalen Schweißgeschwindigkeit gegenüber Ar und ArHe bzw. ArH₂. Es ist festzustellen, dass diese Ergebnisse bei bzw. durch eine hohe Schweißstromstärke generiert werden.

7 Erläuterungen zu Kostenaufteilung

7.1 Erläuterung zu Personaleinsatz

Die diagnostischen, numerischen und experimentellen Lichtbogenuntersuchungen wurden durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter geplant, koordiniert, vorbereitet, überwacht und ausgewertet. Bei der Durchführung wurde er durch die studentischen Hilfskräfte sowie das technische Fachpersonal unterstützt. Des Weiteren oblagen dem wissenschaftlichen Mitarbeiter die Erstellung der numerischen Modelle und deren Validierung. Zusätzlich war er für die Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse sowie die Außendarstellung des Projektstandes im Rahmen von PbA-Sitzungen, Vorträgen oder Veröffentlichungen verantwortlich. Das technische Personal war neben einigen experimentellen Untersuchungen für den Aufbau der Versuchsstände sowie die metallographischen Auswertungen verantwortlich.

7.2 Erläuterung zu den Leistungen Dritter

Zur Anschaffung der notwendigen Lizenzen für die Simulationssoftware ANSYS CFX mussten 19.516 € aufgewendet werden.

8 Veröffentlichungen

J. Zähr, U. Füssel, M. Sende, M. Lohse, M. Schnick: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Eigenschaften eines WIG-Lichtbogens und dessen Schmelzbadbeeinflussung. In: DVS-Berichte Band 267 (2010), S. 152 – 158.

J. Zähr, M. Schnick, M. Hertel, M. Lohse, M. Sende, U. Füssel: Numerical and experimental studies of the influence of process gases in TIG welding. SG 212 Meeting at the IIW Annual Meeting (2010) IIW Doc. No. XII-1984-10, Istanbul.

M. Hertel; J. Zähr; M. Schnick; U. Füssel: Innovative Lichtbogentechnologien zum Schweißen und Löten. In: Konferenz-Beitrag. Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2010, Dresden.

M. Lohse; M. Hertel; J. Zähr; M. Schnick; U. Füssel: Numerical analyses of the influence of the process gas composition on the arc properties. INTERNATIONAL DOCTORAL SEMINAR. AlumniPress, 2010, ISBN 978-80-8096-118-3; EAN 9788080961183.

Geplant bzw. eingereicht:

peer reviewed:

J. Zähr, M. Schnick, M. Hertel, M. Lohse, M. Sende, U. Füssel: Numerical and experimental studies of the influence of process gases in TIG welding. Welding in the world.

Eingereicht:

J. Zähr.; M. Schnick; U. Füssel; M. Lohse; M. Sende.: Numerical investigations of process gases and their influence on TIG-welding. Posterbeitrag: 9th Numerical Analysis of Weldability (2009), Graz.

Geplant:

J. Zähr, M. Hertel, U. Füssel; M. Schnick: Schutzgase beim WIG-Schweißen – Prozessbeeinflussung und Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Praktiker 2011.

Präsentation der Forschungsergebnisse zum Ergebnistransfer in die Industrie und wissenschaftliche Ausbildung

28.05.2010	Lehrveranstaltung im Rahmen eines SFI-Kurses
02.06.2010	Workshop mit der Fa. Binzel Abicor/ Kurt Haufe Schweißtechnik GmbH & Co. KG
03.06.2010	Sitzung der DVS-Kursstättenleiter Sachsen
15.09.2010	Veranstaltung DVS BV Dresden Arbeitsgruppe Hochlegierte Stähle
21.10.2010	Sitzung AG 2.3 Nichtabschmelzende Elektrode

9 Projektbegleitender Ausschuss

Aktive Unternehmen des PbA entsprechend Antrag

Messer Group GmbH

Dr.-Ing. B. Hildebrandt

Fütingsweg 34

47805 Krefeld

CFX Berlin Software GmbH

Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff

Mainzer Straße 23

10247 Berlin

Daimler Chrysler AG

Dipl.-Ing. W. Schweigert

Werk Hamburg

Postfach 910164

21160 Hamburg

EWM Hightec Welding GmbH

Dr.-Ing. S. Goecke

Dr.-Günter-Henle-Str. 8

56271 Mündersbach

Kjellberg Finsterwalde

Dipl.-Ing. V. Krink/Dipl.-Ing. H. Schuster

Leipziger Str. 82

03238 Finsterwalde

Linde AG

Dr.-Ing. G. Wilhelm

Geschäftsbereich Linde Gas

Carl-von-Linde-Straße 25

085716 Unterschleißheim

SMB Heidenau
Dipl.-Ing. (FH) A. Kupke
Siegfried-Rädel-Straße 3
01809 Heidenau

Sosta GmbH & Co. KG
Dipl.-Ing. A. Ehrich
Windrose 1-2
06420 Könnern

VW AG
Dipl.-Ing. V. Teßmar
Konzernforschung
Brieffach 177
38436 Wolfsburg

Weitere Firmen, die an einer oder mehreren PbA-Sitzungen teilgenommen haben

Air Liquide Deutschland GmbH
Dipl.-Ing. A. Pfeiffer
Schönauer Str. 111
04207 Leipzig

Herrenknecht AG
Dipl.-Ing. O. Werner
Hofmühlenstr. 5 – 15
01187 Dresden

Westfalen AG
Dipl.-Ing. U. Jenter
Schweißen und Schneiden
Industrieweg 43
48155 Münster

AIR LIQUIDE Technology Center
Dipl.-Ing. C. Kaya

Fuetingsweg 34
47805 Krefeld

RoB
Dipl.-Ing. W. Rosenfeld
Postfach 1324
88339 Bad Waldsee

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
Dr.-Ing. W. Scheller
Ehinger Strasse 200
47259 Duisburg

Fronius Deutschland GmbH
Dipl.-Ing. K.-P. Schmidt
Sparte Schweißtechnik
Am Stockgraben 3
36119 Neuhof-Dorfborn bei Fulda

INP Greifswald
Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e. V.
Dr.-Ing. H. Schöpp
Felix-Hausdorff-Str. 2
17489 Greifswald

REHM GmbH u. Co. KG Schweißtechnik
Dipl.-Ing. S. Reich
Ottostraße 2
73066 Uhingen

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!

Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] Lancaster, L. J. F.: The Physics of Welding. International Institute of Welding, Pergamon Press, 1984.
- [2] Allum, C. J.: Gas flow on the column of a TIG welding arc. Journal of Applied Physics D, 14, 1981, S. 1041-1059.
- [3] Lin, M. L.; Eager, T. W.: Pressures Produced by Gas Tungsten Arcs. Metallurgical Transactions B, Vol. 17 B, Sept. 1986, S. 601-607.
- [4] Nestor, O. H.: Heat Intensity and Current Density Distributions at the Anode of High Current, Inert Gas Arcs. Journal of Applied Physics, Vol. 33, May 1962, S. 1638-1648.
- [5] Tsai, N. S.; Eager, T. W.: Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs. Metallurgical Transactions B, Vol. 16 B, Dez. 1985, S. 841-846.
- [6] Mendez, P. F.; Eagar, T. W.: Penetration and defect formation in high-current arc welding. Welding Journal, Vol. 83, 2003, No. 10, S. 296s-306s.
- [7] Tanaka, M.; Terasaki, H.; Ushio, M.: Effect of Anode Heat Transfer on Melted Penetration in Welding Process by Free-burning Argon Arc. ISIJ International, Vol. 42, 2002, No. 9, S. 1005-1009.
- [8] Siewert, E.: Experimentelle Möglichkeiten der Lichtbogenuntersuchung. Großer Beleg, TU Dresden, Juni 2007.
- [9] Wendelstorf, J.; Decker, I.; Wohlfahrt, H.: TIG and Plasma Arc Modelling: a survey. H Cerjak (ed.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3, The Institute of Materials, pp. 848-897, 1997.
- [10] Schnick, M.; Füssel, U.; Zschetzsche, J.: Strömungsmessung und Simulation von Lichtbogen- und Plasmaprozessen., Aachen, GST 2006.
- [11] Lowke, J.J.; Tanaka, M.: LTE-diffusion approximation for arc calculations. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, pp. 3634-364, 2006.

-
- [12] Lago, F.; Gonzales, J.J.; Freton, P.; Gleizes, A.: A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part 1. The two-dimensional model. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp.883-897, 2004.
- [13] Lowke, J. J.; Morrow, R.; Haidar, J.: A simplified unified theory of arcs and their electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, pp. 2033-2042, 1997.
- [14] Sansonnens, L.; Haidar, J.; Lowke, J. J.: Predictions of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, pp. 2033-2042, 1997.
- [15] Murphy, A. B.; Tanaka, M.; Tashiro, S.; Sato, T.; Lowke, J. J.: A computational investigation of the effectiveness of different shielding gas mixtures for arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, pp.115205-115219, 2009.
- [16] Lowke, J. J.; Morrow, R.; Haidar, J.; Murphy, A. B.: Prediction of Gas Tungsten Arc Welding Properties of Argon and Hydrogen. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 925-930.
- [17] Frie, W.: Entmischungseffekte bei Gemischen ionisierender Atomgase. *Zeitschrift für Physik* Vol. 172, pp. 99-117, 1963.
- [18] Spille-Kohoff, A.: Implementierung von Entmischung in ANSYS CFX. CFX Berlin Software; July 2007.
- [19] Murphy, A. B.; Hiraoka, K.: A comparison of measurements and calculations of demixing in free-burning arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 33, pp. 2183-2188, 2000.
- [20] Murphy, A. B.: Cataphoresis in electric arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, pp.3383-3390, 1998.
- [21] DVS 0913: MIG-Schweißen von Aluminium - Anwendungstechnische Hinweise. Mai 2008.
- [22] Cressault, Y.; Gleizes, A.: Thermodynamic properties and transport coefficients in Ar-H₂-Cu plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics* 37, 2004, 560– 572.
- [23] Naghizadeh-Kashani; Y.; Cressault, Y.; Gleizes, A.: Net emission coefficient of air thermal plasmas. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 2002, 2925 – 2934.

- [24] Gleizes, A.; Gonzalez, J. J.; Liani, B.; Raynal, G.: Calculation of net emission coefficient of thermal plasmas in mixtures of gas with metallic vapour. *Journal of Physics D: Applied Physics* 26, 1993, 1921 – 1927.
- [25] Gleizes, A.; Gonzalez, J. J.; Liani, B.; Rahmani, B.: Calculation of net emission coefficient in Ar-Cu and SF₆-Cu thermal plasmas. *Colloque de physique*, 1990.
- [26] Murphy, A. B.: Thermal plasmas in gas mixtures (Topical Review). *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 34, pp. 151-173, 2001.
- [27] Devoto, R. S.: Transport coefficients of ionized argon. *The Physics of Fluids*, 16(5), 1973, 616–623.
- [28] Schnick, M.; Füssel, U.; Hertel, M.; Spille-Kohoff, A.; Murphy, A.B.: Metal Vapour Causes a Central Minimum in Arc Temperature in Gas-Metal Arc Welding through Increasing Radiation Emission. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 2010.
- [29] Schnick, M.; Fuessel, U.; Hertel, M.; Haessler, M.; Spille-Kohoff, A.; Murphy, A. B.: Modelling of gas–metal arc welding taking into account metal vapour. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 2010.
- [30] Schnick, M.; Fuessel, U.; Spille-Kohoff, A.: Numerical investigations of the influence of design parameters, gas composition and electric current in plasma arc welding (PAW). *Welding in the World*, 3/4, 2010.
- [31] Tashiro S, Tanaka M, Ushio M, Murphy A. B.; Lowke, J. J.: Prediction of energy source properties of free-burning arcs. *Vacuum*. 80, 1190–4, 2006.
- [32] Tipaji, P. K.; Allada, V.; Mishra, R.: A cost model for the metal inert gas (MIG) welding process. *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007-35795*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007.
- [33] Füssel, U.; Schnick, M.; Fuentes Munios, J. E.; Zschetzsche, J.; Siewert, E.: Experimental possibilities of gas tungsten arc analyses. *Welding and Cutting* 6, No. 5, pp. 282 – 287, 2007.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einfluss der Lichtbogenlänge auf die Staudruckmaxima für Ar und He [3].....	8
Abbildung 2-2: Einfluss der Lichtbogenlänge auf die Wärmestromdichte sowie elektrische Stromdichte für Ar-N ₂ (17,6 % N ₂), Ar-H ₂ (8,6 % H ₂) und Ar-He (98 % He) [4].....	9
Abbildung 2-3: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Anodenleistung [4]	10
Abbildung 2-4: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung (100 % Ar; 50 % Ar + 50 % He) und Lichtbogenlänge (links: 9 mm LBL, rechts: 2 mm LBL) auf die Wärmestromdichte (100 A, 75°Anspitzwinkel) [5] ...	11
Abbildung 2-5: Prinzipielle Darstellung eines WIG-Lichtbogens.....	13
Abbildung 3-1: Konzept zur Projektdurchführung.....	17
Abbildung 4-1: Prinzip der Staudruckmessung (links) und prinzipielles Verfahrensmuster (rechts)	18
Abbildung 4-2: Beispielhafter Staudruckverlauf über x-y-Ebene	19
Abbildung 4-3: Versuchsaufbau für Messung der elektrischen und Wärmestromdichte	20
Abbildung 4-4: Auswertung der mittels des Geteilten-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen.....	20
Abbildung 4-5: Einfluss von He-Zumischungen auf den Staudruck (links: Staudruckprofil in Abhängigkeit vom Lichtbogenradius, rechts: Zusammenfassung der Staudruckmaxima).....	24
Abbildung 4-6: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Staudruckmaximum (I = 200 A) 25	
Abbildung 4-7: Einfluss der Stromstärke auf Staudruckmaximum (LBL = 5 mm) .	27

Abbildung 4-8: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Gesamtwärme (links) und normierte Darstellung des Gesamtwärmestroms (rechts) ($I = 200 \text{ A}$)	29
Abbildung 4-9: Einfluss der Stromstärke auf die Gesamtwärme ($\text{LBL} = 5 \text{ mm}$)....	29
Abbildung 4-10: Einfluss der Lichtbogenspannung auf den Gesamtenergieeintrag (links), Einfluss der Lichtbogenspannung auf Lichtbogenlänge (rechts) ($I = 200 \text{ A}$)	31
Abbildung 4-11: Einfluss der Prozessgaszusammensetzung und Lichtbogenlänge auf den physikalischen Wirkungsgrad ($I = 200 \text{ A}$)	32
Abbildung 4-12: Einfluss der Prozessgaszusammensetzung und Stromstärke auf den physikalischen Wirkungsgrad ($\text{LBL} = 5 \text{ mm}$)	33
Abbildung 4-13: Einfluss des Elektrodenanspitzwinkels auf Lichtbogenstaudruck ($I = 200 \text{ A}$, $\text{LBL} = 5 \text{ mm}$, Elektrodendurchmesser: $3,2 \text{ mm}$)	34
Abbildung 4-14: Einfluss der Lichtbogenlänge bei ArHe-Gasen auf die Maxima der elektrischen Stromdichten ($I = 200 \text{ A}$)	35
Abbildung 4-15: Einfluss des Schutzgasvolumenstromes auf die Gesamtwärme (exemplarisch an Rein-Ar und ArHe30/70 mit $I = 200 \text{ A}$, $\text{LBL} = 5 \text{ mm}$)	36
Abbildung 4-16: Berechnungsdomain für WIG-Lichtbogensimulation	38
Abbildung 4-17: Notwendige Gitterauflösung für Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS et al. [14]	44
Abbildung 4-18: Notwendige Gitterauflösung für Fallgebietsmodellierung nach LOWKE und TANAKA [11]	45
Abbildung 4-19: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Staudrücke für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A , $\text{LBL} 5 \text{ mm}$)	46
Abbildung 4-20: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Gesamtwärmen für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A) ($\text{LBL} 5 \text{ mm}$)	47

Abbildung 4-21: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Stromdichten für die Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS (links) und LOWKE et al. (rechts) (200 A) (LBL 5 mm)	47
Abbildung 4-22: Fallgebietsmodellierung mit Hilfe von Widerständen für den elektrischen Stromfluss sowie den Wärmefluss vom Lichtbogenkern zu den Elektroden	48
Abbildung 4-23: Validierung des entwickelten Widerstandsmodells durch Vergleich mit experimentellen Daten.....	49
Abbildung 4-24: Sensitivanalyse für den Einfluss der Prozessgaseigenschaften auf den Staudruck. Der Einfluss der eingekreisten thermophysikalischen Eigenschaften wird nachfolgend diskutiert.	50
Abbildung 4-25: Sensitivanalyse für den Einfluss der Prozessgaseigenschaften auf die Gesamtwärme. Der Einfluss der eingekreisten thermophysikalischen Eigenschaften wird nachfolgend diskutiert.	51
Abbildung 4-26: links: Einfluss von Temperatur und He-Konzentration auf Viskosität von ArHe, rechts: Einfluss der Viskosität von He auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArHe-Gasgemischen	52
Abbildung 4-27: Einfluss von Temperatur und He-Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArHe, rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArHe-Gasgemischen	53
Abbildung 4-28: links: Einfluss von Temperatur und H ₂ -Konzentration auf spezifische volumetrische Wärmekapazität von ArH ₂ , rechts: Einfluss von ρ , c_p und M auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH ₂ -Gasgemischen	55
Abbildung 4-29: links: Einfluss von Temperatur und H ₂ -Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArH ₂ , rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH ₂ -Gasgemischen	56

Abbildung 4-30: Einfluss von Temperatur und H ₂ -Konzentration auf elektrische Leitfähigkeit von ArH ₂ , rechts: Einfluss von σ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH ₂ -Gasgemischen	57
Abbildung 4-31: links: Einfluss von Temperatur und H ₂ -Konzentration auf Viskosität von ArH ₂ , rechts: Einfluss von η auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArH ₂ -Gasgemischen	58
Abbildung 4-32: links: Einfluss von Temperatur und N ₂ -Konzentration auf spezifische volumetrische Wärmekapazität von ArN ₂ , unten: Einfluss von ρ , c_p und M auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArN ₂ -Gasgemischen	59
Abbildung 4-33: links: Einfluss von Temperatur und N ₂ -Konzentration auf thermische Leitfähigkeit von ArN ₂ , rechts: Einfluss von λ auf die Strömungsgeschwindigkeit sowie Temperaturverteilung in ArN ₂ -Gasgemischen	60
Abbildung 4-34: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge bei S355 mit Ar und ArHe-Gemische, ausgewählte Probenquerschliffe (rechts)	64
Abbildung 4-35: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Schweißstromstärke (LBL = 5 mm), ausgewählte Probenquerschliffe (rechts)	65
Abbildung 4-36: Einschweißtiefe (links) und –breite (rechts) in Abhängigkeit von Spannung ($I = 200$ A)	66
Abbildung 4-37: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für S355	67
Abbildung 4-38: Einfluss der Lichtbogenlänge auf Breite und Tiefe der Schweißnaht ($I=200$ A) bei 1.4307	68
Abbildung 4-39: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für 1.4307	70

Abbildung 4-40: Einschweißtiefe (links) und –breite (Mitte) in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge bei 1.4462, ausgewählte Probenquerschliffe (rechts)	71
Abbildung 4-41: Maximal erreichbare Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke (LBL = 5 mm) für 1.4462	72
Abbildung 4-42: Vergleich Einfluss der Lichtbogenlänge auf Breite und Tiefe der Schweißnaht (I=200 A) bei 1.4307 – mit neuer Schutzgasmischung Ar 20 He 70 H ₂ 10 %	73
Abbildung 4-43: Einbrandprofile mit dem Schutzgas Ar 20 He 70 H ₂ 10 % mit 1 m/min Vorschubgeschwindigkeit, 5 mm LBL, Werkstoff: 1.430774	
Abbildung 4-44: Darstellung Versuchsziel: Aufschmelzen einer mit Plasma geschweißten Nahtwurzel	75
Abbildung 4-45: Maximale Schweißgeschwindigkeit beim Aufschmelzen einer Plasmawurzel mittels WIG unter Verwendung verschiedener Schutzgase	76
Abbildung 4-46: Aufbau Schweißversuch Blech-Rohr-Verbindung	76
Abbildung 4-47: Maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeiten bei Blech-Rohr-Verbindung (oben: Rein-Ar, unten ArHe mit 70 % He)	77
Abbildung A-1: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArHe-Gemische.	XIX
Abbildung A-2: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArH ₂ -Gemische ..	XX
Abbildung A-3: Physikalische Eigenschaften praxisrelevanter ArH ₂ -Gemische ..	XXI
Abbildung A-4: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArN ₂ -Gemische	XXII
Abbildung A-5: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von He bei Zumischung zu Ar	XXIII
Abbildung A-6: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von H ₂ bei Zumischung zu Ar	XXIV
Abbildung A-7: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von N ₂ bei Zumischung zu Ar	XXV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht: Einsatzmöglichkeiten von Schutzgasen für das WIG-Schweißen in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff	6
Tabelle 4-1: Standard- und Variationsparameter für diagnostische, numerische und experimentelle Untersuchungen.....	21
Tabelle 4-2: Übersicht zum Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogeneigenschaften	37
Tabelle 4-3: Flächenrandbedingungen des Lichtbogenmodells	39
Tabelle 4-4: Zusätzliche Randbedingungen für die Elektronendichte zur Fallgebietsmodellierung nach SANSONNENS et al. [14].....	44
Tabelle 4-5: Ergebnisse der Sensitivanalysen: Erkennen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge	61
Tabelle 4-6: Für Schweißversuche eingesetzte Werkstoffe und geeignete Schutzgase	62
Tabelle 4-7: Algorithmus für gezielte Prozessgasauswahl	80

Anlagenverzeichnis

A1	Physikalische Eigenschaften von ArHe-Gasgemischen	XIX
A2	Physikalische Eigenschaften von ArH ₂ -Gasgemischen	XX
A3	Physikalische Eigenschaften von praxisrelevanten ArH ₂ -Gasgemischen	XXI
A4	Physikalische Eigenschaften von ArN ₂ -Gasgemischen	XXII
A5	Sensitivanalyse für ArHe	XXIII
A6	Sensitivanalyse für ArH ₂	XXIV
A7	Sensitivanalyse für ArN ₂	XXV

A1 Physikalische Eigenschaften von ArHe-Gasgemischen

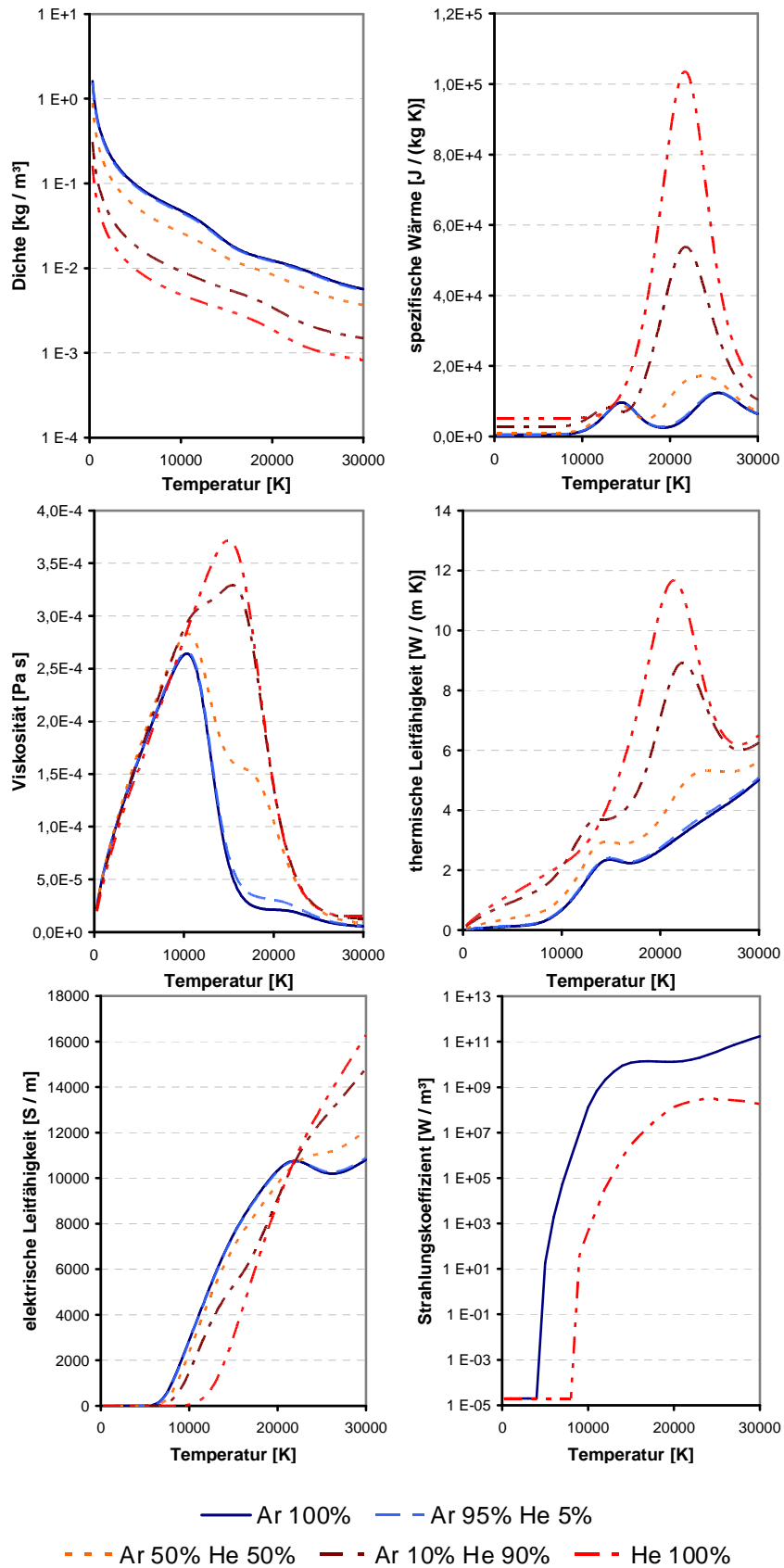


Abbildung A-1: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArHe-Gemische

A2 Physikalische Eigenschaften von ArH₂-Gasgemischen

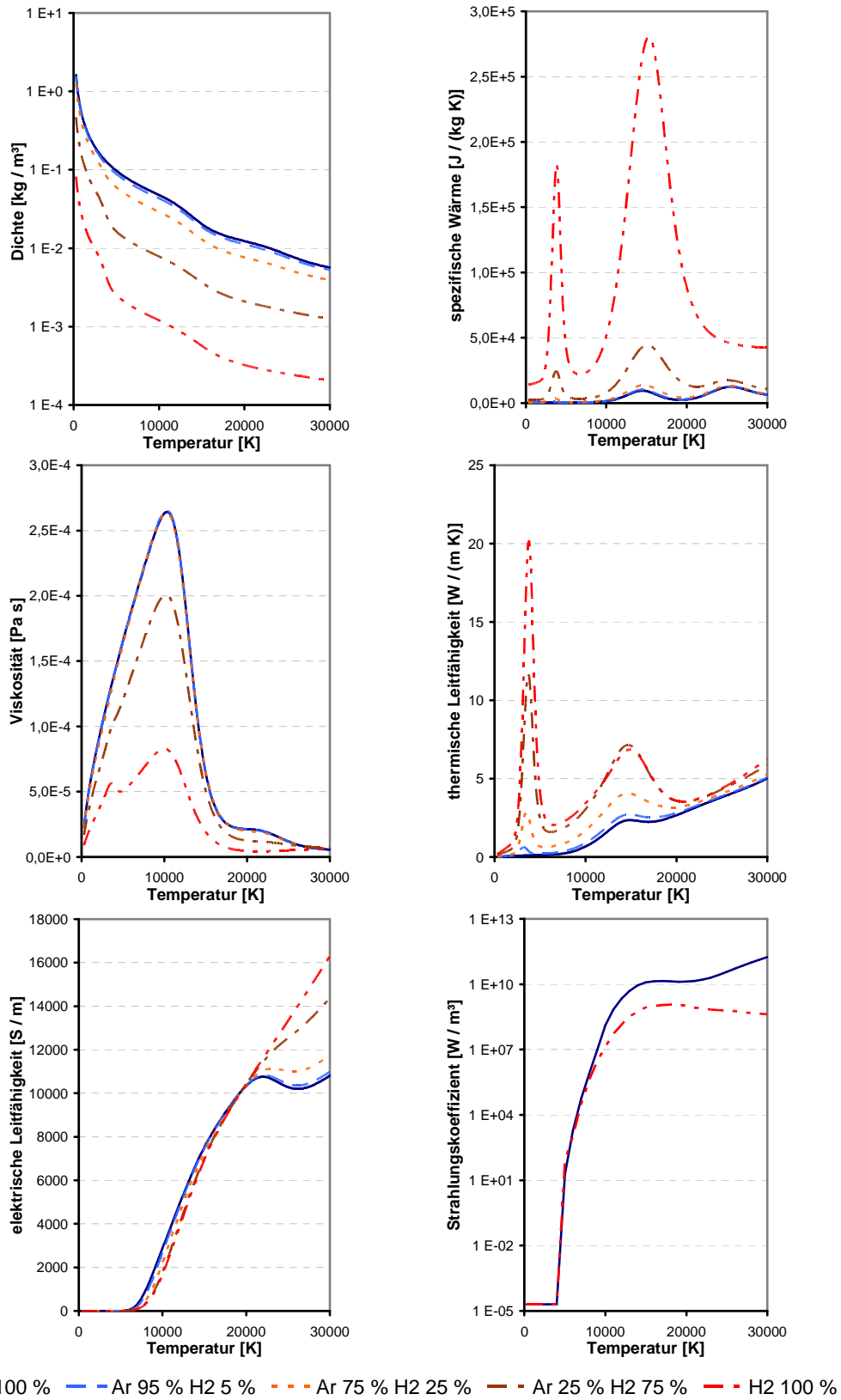


Abbildung A-2: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArH₂-Gemische

A3 Physikalische Eigenschaften von praxisrelevanten ArH₂-Gasgemischen

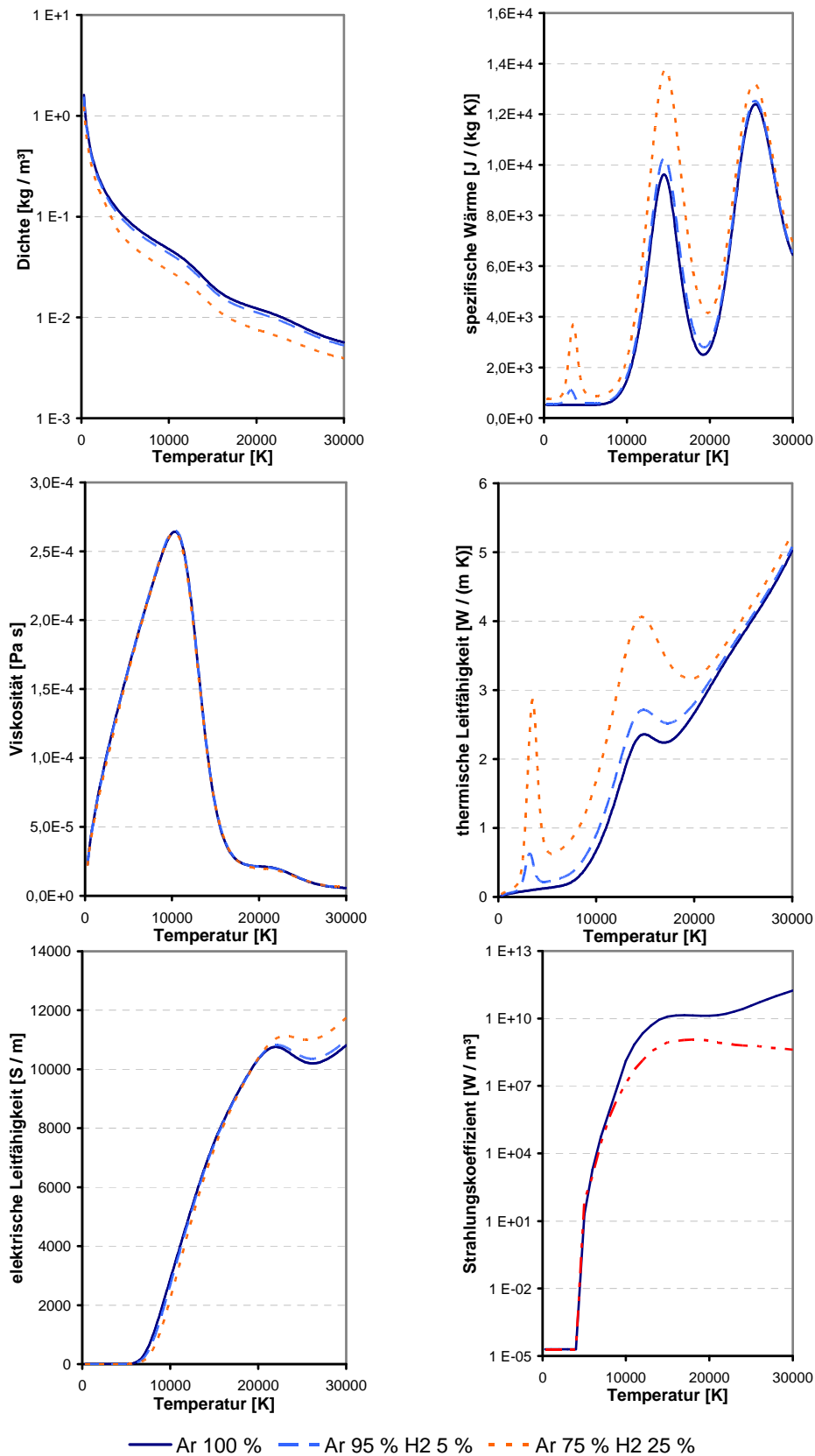


Abbildung A-3: Physikalische Eigenschaften praxisrelevanter ArH₂-Gemische

A4 Physikalische Eigenschaften von ArN₂-Gasgemischen

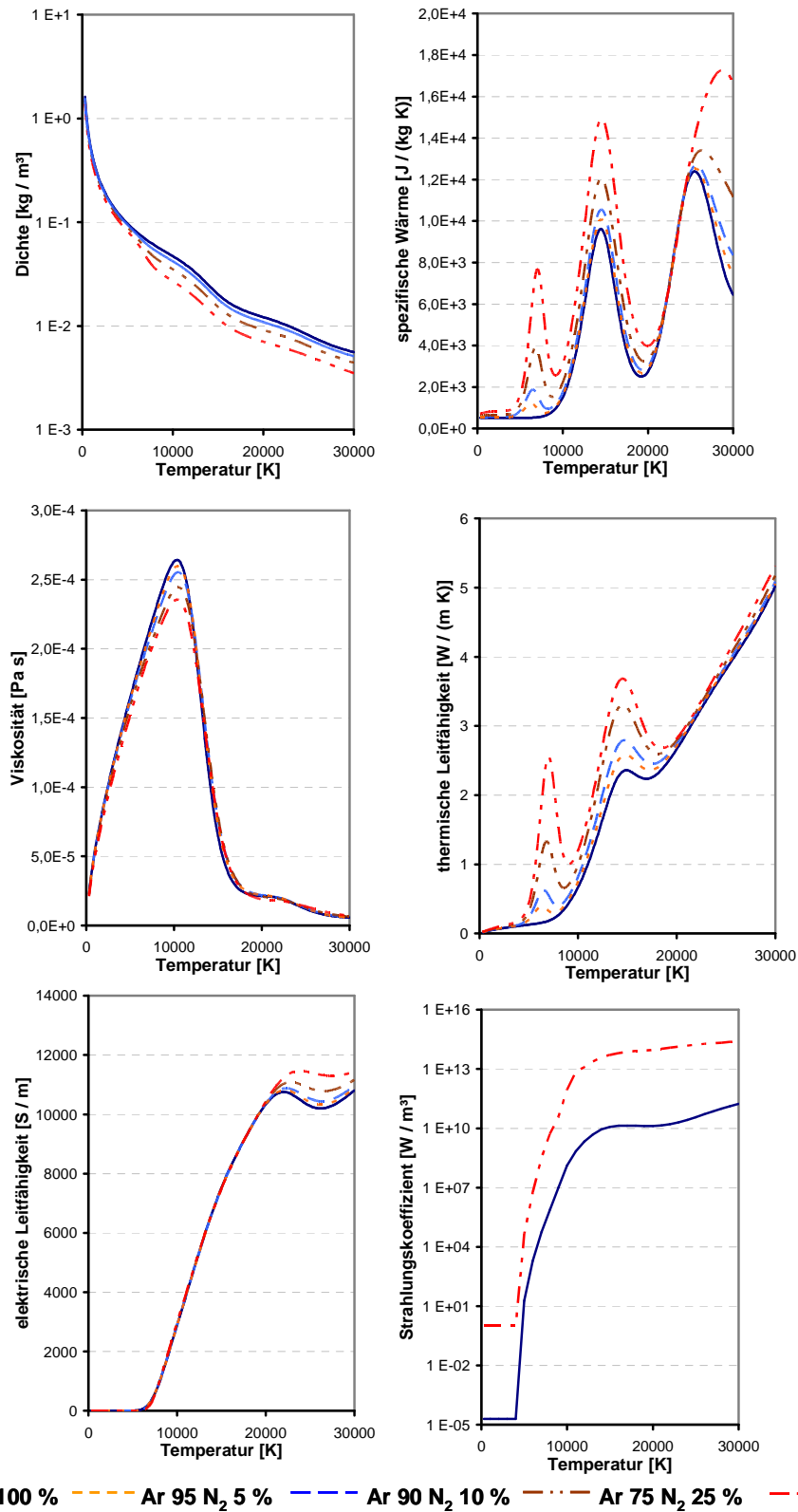


Abbildung A-4: Physikalische Eigenschaften für verschiedene ArN₂-Gemische

A5 Sensitivanalyse für ArHe

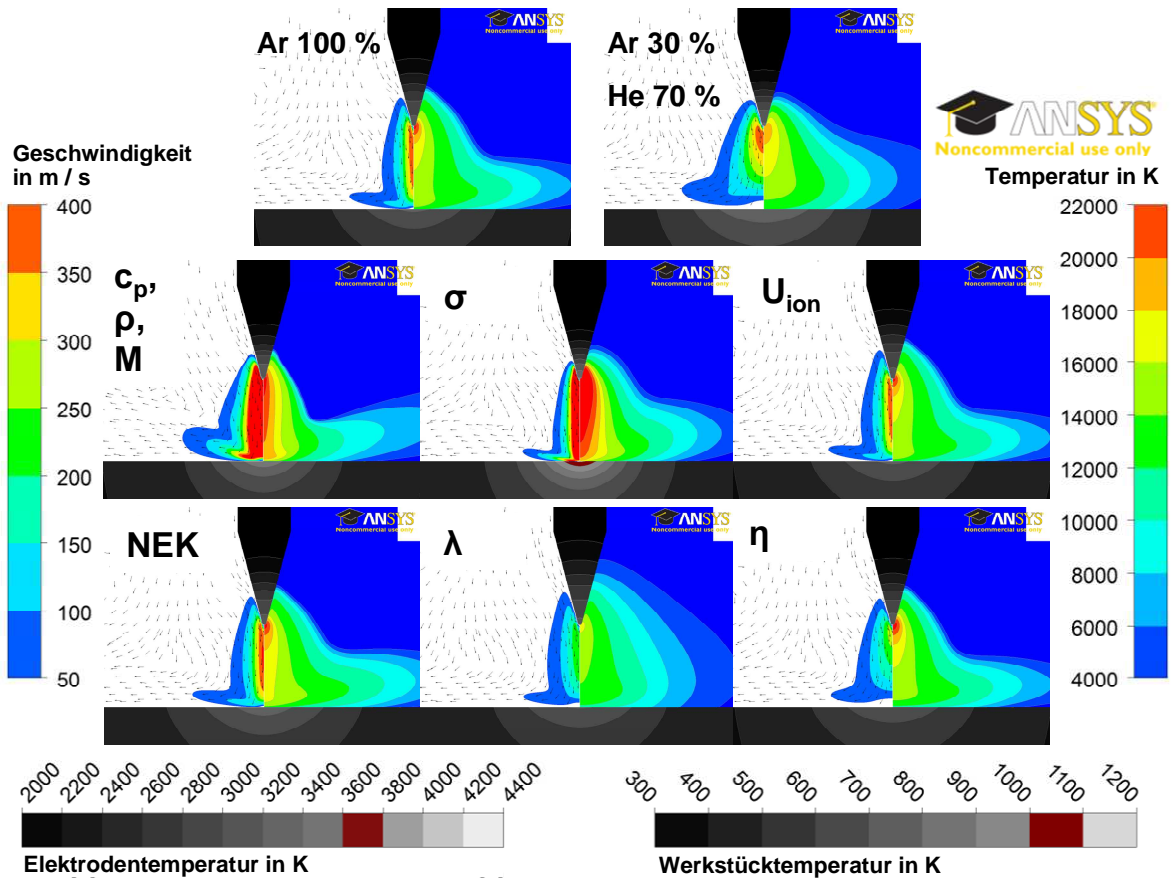


Abbildung A-5: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von He bei Zumischung zu Ar

A6 Sensitivanalyse für ArH₂

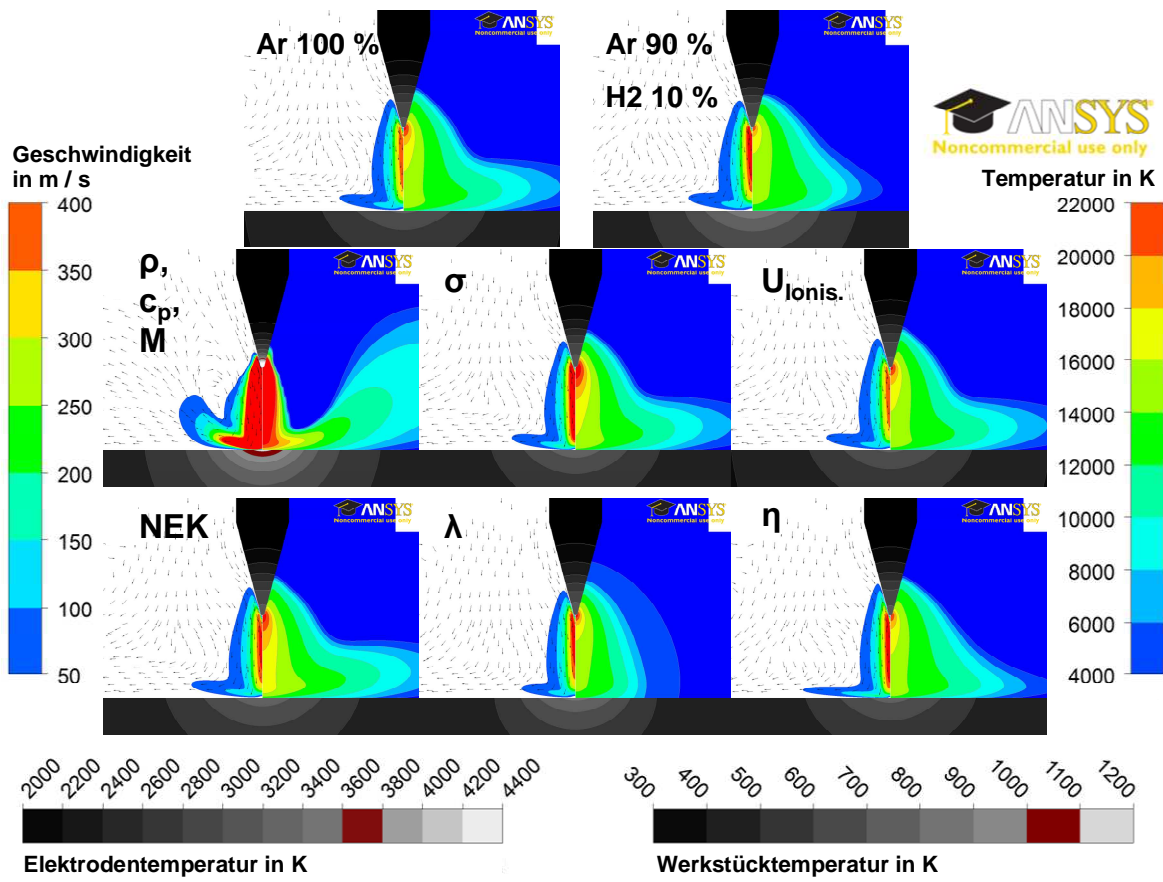


Abbildung A-6: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von H₂ bei Zumischung zu Ar

A7 Sensitivanalyse für ArN₂

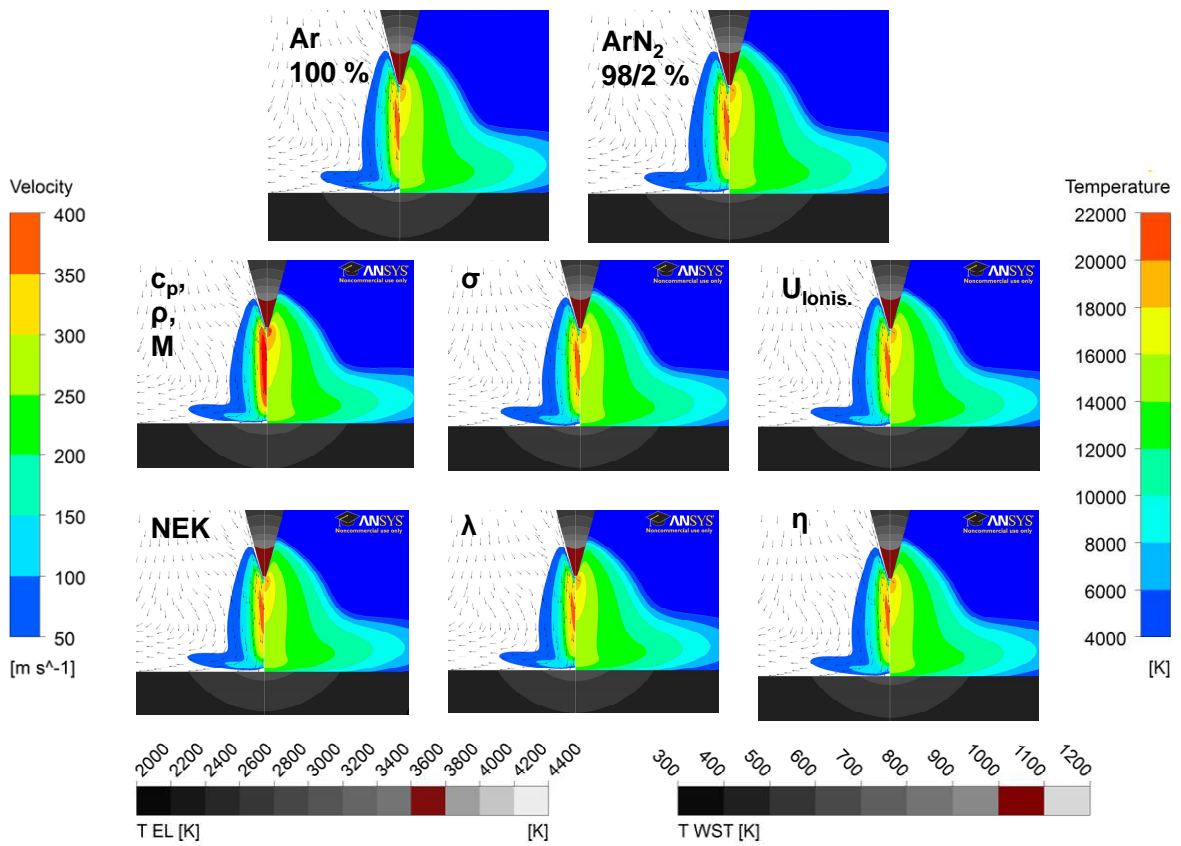


Abbildung A-7: Einfluss einzelner physikalischer Eigenschaften von N₂ bei Zumischung zu Ar