#### **Abschlussbericht**

Titel: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum

wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen

**IGF-Nr.:** 15.871 BR

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden

Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik

Professur Fügetechnik und Montage

01062 Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Dr.-Ing. M. Schnick

Dipl.-Ing. M. Dreher

**Laufzeit:** 01.11.2008 – 31.12.2011

Das IGF-Vorhaben Nr.: 15.871 B / DVS-Nr.: 03.090 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Projekt war Bestandteil des AiF/DFG-Cluster-Projektes "Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug".

Für die finanzielle Unterstützung unseres Vorhabens bedanken wir uns.

Dresden, 30.04.2012

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift Leiter der Forschungsstelle



## Inhaltsverzeichnis

Inhalts	verzeichnis	II
Verzeic	hnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	V
1	Zusammenfassung	1
2	Technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3	Stand von Technik und Forschung	6
3.1	Konstruktion und schweißtechnischer Einsatz von Brennersystemen	6
3.2	Analyse von Gasströmung und Schutzgasabdeckung	9
4	Zielstellung und Methodischer Ansatz	. 11
5	Methoden der Strömungsanalyse	. 13
5.1	Entwicklung eines Numerischen Modells	. 13
5.1.1	Physikalisches Modell und Randbedingungen	. 13
5.1.2	Netzentwicklung und Variation der Modellgeometrie	. 16
5.1.3	Erprobung Turbulenzmodell und Validierung	. 19
5.1.4	Empfehlungen für die Anwendung von Numerischen Modellen	. 21
5.2	Particle Image Velocimetry (PIV)	. 25
5.3	Schlierentechnik	. 29
5.4	Messung der Sauerstoffkonzentration	. 34
6	Untersuchungsumfang und Versuchsdurchführung	. 39
6.1	Schweißbrennersysteme	. 39



6.2	Durchführung von Schweißversuchen	40
7	Strömungstechnische Untersuchung von Brennersystemen	42
7.1	Brennerinterne Prozessgasführung	42
7.1.1	Entstehung turbulenter Strömungsstrukturen	42
7.1.2	Erarbeitung alternativer Gasverteilungskonzepte	50
7.2	Interaktion von Prozess und Schutzgasfreistrahl	52
7.2.1	Grundlegende Strömungscharakteristik	52
7.2.2	Erprobung gradierter Strömungsprofile	58
7.2.3	Einfluss von Gasdüsenform und -position	59
7.2.4	Einfluss der Brenner- bzw. der Schutzgastemperatur	63
7.3	Fertigungsbedingte Beeinflussung der Gasabdeckung	65
7.3.1	Einfluss des Brennerabstandes	65
7.3.2	Einfluss der Brennerneigung	67
7.3.3	Einfluss von pendelner Brennerführung	68
7.3.4	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit	69
7.3.5	Einfluss von Zugluft, Arbeitsplatzabsaugung oder Auftriebseffekten	71
8	Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung	75
9	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für kmU	79
9.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	79
9.2	Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse	80
10	Erläuterung zur Kostenaufteilung	81
10.1	Erläuterungen zu Personaleinsatz	81
10.2	Erläuterungen zu Geräteanschaffung	81



10.3	Erläuterungen zu Leistungen Dritter	81
11	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	82
12	Projektbegleitender Ausschuss	86
Quelle	enverzeichnis	I
Abbilo	dungsverzeichnis	IV
Tabell	enverzeichnis	IX
Anlag	enverzeichnis	x
Anlag	en	XI



## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Symbole

Formelzeichen	Einheit	Benennung
	%	Prozent
	0	Winkel
Ø	mm	Durchmesser
ρ	kg m <sup>-3</sup>	Dichte
δ	$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$	Elektrische Leitfähigkeit
$\mu_0$	N A <sup>-2</sup>	Magnetische Feldkonstante
ω	kg	Stoffmasse
B	Т	Magnetische Flussdichte
Ф	V	Elektrisches Potential
Ai	V s m <sup>-1</sup>	Magnetisches Vektorpotential
D <sub>AB</sub>	$m^2 s^{-1}$	Diffusionskoeffizient
f	Hz	Frequenz
h	J	Enthalpie
I <sub>S</sub>	А	Elektrische Stromstärke
$\vec{j}_i$	A m <sup>-2</sup>	Elektrische Stromdichte
I	m	Länge
$\overline{m}_{i}$	kg mol <sup>-1</sup>	Mittlere Molmasse Komponente i
m <sub>i</sub>	kg	Masse Komponente i
n	mol	Stoffmenge



R	Ω	Elektrischer Widerstand
S <sub>NEC</sub>	A Ω m <sup>3</sup>	Strahlungsquellterm (Nettoemission)
t	hh:mm:ss	Zeit
Т	K, °C	Temperatur
ū <sub>i</sub>	m s <sup>-1</sup>	Geschwindigkeit
Us	V	Elektrische Spannung
V <sub>D</sub>	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
х	m	Weg
Xi	kg/kg	Masseanteil Komponente i
Yi	mol/mol	Volumenanteil Komponente i

# Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Begriffe

Abkürzung	Benennung
Al	Aluminium
Ar	Argon
C1	Schutzgasbezeichnung nach DIN EN 439 - 100% CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CrNi	Chrom-Nickel-Stähle
DES	Detached Eddy Simulation (Turbulenzmodell)
div	Divergenz
EL	Elektrode
Fe	Eisen
fps	Einheit der Bildrate (Frames pro Second)



grad	Gradient
G	Gasgekühlt
GV	Gasverteiler
Hand	Handbrenner
ILB	Impulslichtbogen
<b>k-</b> ε	k-Epsilon (Turbulenzmodell)
<b>k</b> -ω	k-Omega (Turbulenzmodell)
KLB	Kurzlichtbogen
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LES	Large Eddy Simulation (Turbulenzmodell)
M21	Schutzgasbezeichnung nach DIN EN 439 - 5-25% CO <sub>2</sub> ,Rest Argon
MAG	Metallaktivgasschweißen
MHD	Magnetohydrodynamik
MIG	Metallinertgasschweißen
MSG	Metallschutzgasschweißen
NEC	Nettoemissionskoeffizient
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PA	Projektbegleitender Arbeitskreis
PIV	Particle Image Velocimetry
RT	Raumtemperatur
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
Rob	Roboterschweißbrenner
SD	Schutzgasdüse
SKD	Stromkontaktdüse



SLB	Sprühlichtbogen
SST	Shear Stress Transport (Turbulenzmodell)
u. A.	unter Anderem
W	Wassergekühlt
WIG	Wolframinertgasschweißen
WST	Werkstück
z. B.	zum Beispiel



### 1 Zusammenfassung

Der MSG-Schweißprozess wird neben der manuellen Fertigung auch in vielen Anwendungen des Stahlbaus oder der Automobilindustrie in automatisierter oder halb automatisierter Form eingesetzt. Eine gute Schutzgasabdeckung trägt entscheidend zu einem definierten, stabilen und reproduzierbarem Prozess sowie zu den gewünschten Eigenschaften der Fügeverbindung bei. Wird Schutzgasabdeckung durch Atmosphärengase verunreinigt entstehen Poren, Schweißspritzer, Schmauch oder Anlauffarben, welche durch kostenintensive Nacharbeit entfernt werden müssen oder sogar zur Unbrauchbarkeit des Bauteils führen. Ziel des Vorhabens war daher die strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen und Schweißprozess zur Verbesserung und Sicherstellung der Schutzgasabdeckung.

Im Projekt wurden vertiefende Untersuchungen der Schutzgasströmung beim MSG-Schweißen durchgeführt. Hierfür wurden in Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des AiF/DFG-Cluster-Projektes "Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug" sowohl numerische als auch experimentelle Methoden Strömungsanalyse entwickelt oder auf die speziellen Anforderungen Lichtbogenschweißprozessen angepasst. Mit Hilfe dieser Methoden wurden die Schutzgasströmung im Brenner und die Wechselwirkungen mit dem Prozess systematisch analysiert, SO dass sowohl konkrete Hinweise Brennerkonstruktion als auch für die schweißtechnische Fertigung abgeleitet werden konnten.

Erstmals wurden kontinuierliche, hochaufgelöste Aufnahmen der Particle Image Velocimetry (PIV) für MSG-Schweißprozesse realisiert und zur Prozessanalyse bzw. für die Entwicklung von Schweißbrennern eingesetzt. Neue Möglichkeiten sind auch der Anwendung der Schlierentechnik zuzuordnen. Durch strahlungsselektive Beleuchtungsquellen und auf den strahlungsintensiven MSG-Prozess abgestimmte Filtersysteme kann der Lichtbogen auch im Sprühlichtbogenbereich fast vollständig ausgeblendet werden. Weiterhin wird mit der Sauerstoffmessung am Werkstück eine



Methode beschrieben, die die qualitative Bewertung der Schutzgasabdeckung ermöglicht.

Außerdem wurde in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten G4 und G5 des AiF/DFG-Cluster-Projektes "Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug" ein numerisches Modell zur Analyse der Schutzgasabdeckung entwickelt. Das erarbeitete Modell beschreibt die Qualität der Schutzgasabdeckung erstmals unter Berücksichtigung von Diffusionseffekten, der Beeinflussung der Strömung durch den Lichtbogen, der Metalldampf und der komplexen Strömungsgeometrie von Schweißbrenner. Dieses Modell wurde mit Hilfe der entwickelten Diagnostiken umfassend validiert und ermöglicht neben der zeitlich und örtlich hochaufgelösten Beschreibung der Gasabdeckung am Werkstück auch die Untersuchung der brennerinternen Strömungseffekte, welche durch diagnostische Methoden der Strömungsanalyse nicht visualisiert werden können.

Durch Anwendung der entwickelten Methoden konnte festgestellt werden, dass derzeitige Brennerkonzepte teilweise zu turbulenten Strömungen führen, die die Qualität der Schutzgasabdeckung am Werkstück beeinträchtigen. Auf Grundlage der durchgeführten Analysen im Bereich des Gasverteilers wurden Konstruktionsvarianten erarbeitet, welche eine gleichmäßige Strömung und eine hochwertige Schutzgasabdeckung realisieren. Besonders für die Konstruktion gasgekühlter Systeme ist darauf zu achten, dass auf Grund hoher Strömungsgeschwindigkeiten entstehende Turbulenzen durch geeignete Gasverteilungskonzepte und ausreichend große Strömungsräume abgebaut werden können.

Neben den strömungstechnischen Vorgängen im Brennerinneren, wird die Gasabdeckung entscheidend durch die Wechselwirkungen mit dem Lichtbogen beeinflusst. Die Form und die Position der Schutzgasdüse zeigen in den Untersuchungen einen signifikanten Einfluss. Im Allgemeinen erzielen breite Gasdüsen im Vergleich zu stark konischen Düsen auch eine breitere, hochwertigere Schutzgasabdeckung. Es wurde jedoch festgestellt, dass Schutzgasdüsen auch zu breit dimensioniert werden können. Dies führt gerade bei hohen Gasmengen zu einer ungünstigen Lichtbogenanströmung und Verunreinigung der Schutzgasabdeckung. Zurückstehende Schutzgasdüsen bzw. große Abstände zwischen Schweißbrenner



und Werkstück führen ebenso zu verstärkter Kontamination und sind durch größere Schutzgasmengen zu kompensieren. Bei eingeschränkter Zugänglichkeit ist aus Sicht einer guten Schutzgasabdeckung eher das Zurücksetzen des kompletten Brenners zu empfehlen als kürzere Gasdüsen mit vorstehendem Stromkontaktrohr zu verwenden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch das Projekt neue experimentelle und numerische Methoden als Werkzeug für die Brennerentwicklung und die Auslegung von Schweißprozessen in der Fertigung zur Verfügung stehen. Diese ermöglichen die zeitlich und örtlich hochaufgelöste Beschreibung der Strömungseffekte im Schweißbrenner, im Schutzgasfreistrahl und im Lichtbogenbereich. Auf Grund der Vor- und Nachteile einzelner Methoden ist es sinnvoll, numerische und experimentelle Analysen miteinander zu kombinieren dadurch den Erkenntnisgewinn zu vervielfachen. Durch Anwendung der erarbeiteten Methoden wurden konkrete Hinweise für die Brennerkonstruktion und die schweißtechnische Fertigung in den Unternehmen abgeleitet.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.



## 2 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Bei der Anwendung des MSG-Prozesses wird ein definierter, reproduzierbarer angestrebt. Prozess Sporadisch, aber auch regelmäßig auftretende Unregelmäßigkeiten, B. Prozessstörungen führen zu wie Spritzer. Z. Oxidniederschläge, Schmauch oder Poren. Die angestrebte Prozessfähigkeit wird nicht erreicht und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses reduziert. Bei hochlegierten Stählen führt der ungenügende Schutz der Oberfläche vor Oxidation zu Anlauffarben und zu erhöhter Korrosionsanfälligkeit. Beim Schweißen von Aluminium bewirken kleinste Schutzgaskontaminationen Schmauchbildung neben der Naht und Poren. Werden Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht erkannt und überschreiten das zulässige Maß, ist aufwändige Nacharbeit notwendig.

In der Forschungsstelle durchgeführte Voruntersuchungen zeigten, dass turbulente, instationäre Strömungsmuster zur Kontamination der Prozessgasabdeckung mit atmosphärischen Gasen führen /9/. Obwohl bekannt ist, dass die Zusammensetzung und die Strömungsverhältnisse der Schutzgasströmung einen entscheidenden Einfluss auf den Prozessablauf, das Schweißergebnis und damit auch auf die Wirtschaftlichkeit bzw. die Anwendbarkeit von Lichtbogenprozessen ausüben, wurden diese Wechselwirkungen bisher nicht ausreichend untersucht. Grund hierfür ist, dass die aus der Strömungstechnik bekannten Methoden zur Analyse von Gasströmungen bisher nicht oder nur sehr eingeschränkt an strahlungsintensiven Lichtbogenprozessen anwendbar waren. Außerdem ist aus der Literatur kein Modell bekannt, welches die für den MSG-Prozess charakteristischen physikalischen Effekte abbildet und deren Wechselwirkung mit der Schutzgasströmung beschreibt. Dies betrifft sowohl das Strömungsverhalten im Brenner als auch die Ausbildung der Schutzgasabdeckung am Werkstück. Hier besteht Forschungsbedarf.

Andererseits erfüllen kommerziell erhältliche Brenner die hohen Anforderungen, die vor allem beim Schweißen von Aluminium, hochlegierten Stählen, Titan oder Mischverbindungen an die Schutzgasabdeckung gestellt werden zum Teil unzureichend /1/. Hier besteht Entwicklungspotential.



Durch Weiterentwicklung und Anpassung der diagnostischen und numerischen Methoden der Strömungsanalyse auf die Anforderungen und die Komplexität von MSG-Schweißprozessen ergibt sich die Möglichkeit, die Prozessgasströmung im Brenner und im Freistrahl sowie deren Interaktion mit dem Lichtbogen zu erforschen.



## 3 Stand von Technik und Forschung

#### 3.1 Konstruktion und schweißtechnischer Einsatz von Brennersystemen

Für die Auswahl des richtigen Brenners, einer geeigneten Gasdüse oder der einzustellenden Schutzgasmenge können der Literatur und den Lehrunterlagen verschiedene Hinweise entnommen werden. Empfehlungen für die Auswahl der Gasdüsengeometrie richten sich dabei fast ausschließlich nach Schweißstromstärke und werden in der Praxis aus Gründen der Zugänglichkeit oft nicht umgesetzt. Empfehlungen zur Wahl des geeigneten Gasvolumenstroms werden in den Lehrunterlagen an den Gasdüsendurchmesser oder an die Stromstärke gekoppelt, Abbildung 3.1, rechts. Weiterhin werden Hinweise für das Einstellen des richtigen Brennerabstandes oder der Brennerneigung gegeben. In der Praxis bestimmt in vielen Fällen jedoch die Zugänglichkeit die Positionierung des Brenners, so dass Hinweise fehlen, mit welchen Maßnahmen ein Abweichen von den allgemein empfohlenen Angaben kompensiert werden kann so dass in der Folge eine hochwertige Schutzgasabdeckung gewährleistet ist. /15/

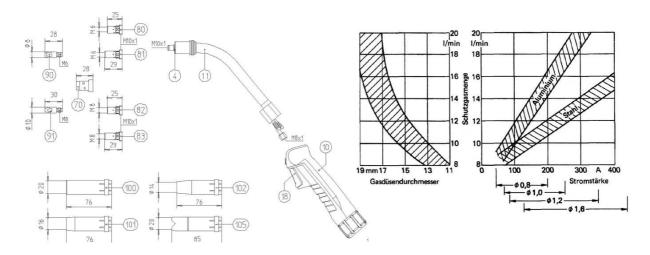
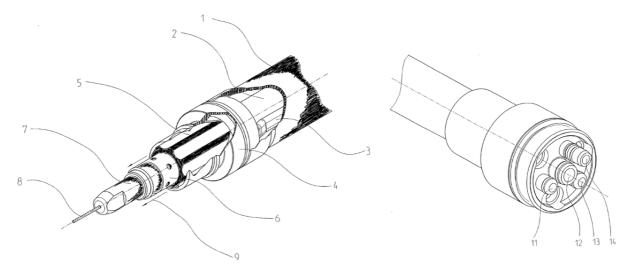


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines MSG-Schweißbrenners /14/ und Auswahl der Schutzgasmenge in Abhängigkeit von Gasdüsendurchmesser und Stromstärke /15/

Neben der Gasmenge und dem Düsendurchemesser wird die Qualität der Schutzgasabdeckung vor allem von der Gestaltung der Strömungsgeometrie im



Schweißbrenner bestimmt. Hier haben sich seit vielen Jahren verschiedene Gestaltungsvarianten etabliert, die seitdem im Wesentlich unverändert angewendet werden. Das Schutzgas wird radial zum Brennerkopf geführt und strömt durch den Düsenstock (Abbildung 3.1, Teile 80 - 83) und einen Gasverteiler (Abbildung 3.1, Teil 70) radial nach außen in eine Schutzgasdüse (Abbildung 3.1, Teile 100-105), die den Freistrahl axial auf die Werkstückoberfläche lenkt. Eine Ausnahme stellt die in /16/ patentierte Lösung dar.



- 1 Außenrohr
- 2 Brennerrohr
- 3 Äußerer Wasserkühlkreislauf
- 4 Gasdüsenaufnahme
- 5 Hülse mit Längsführung
- 6 Düsenstock
- 7 Stromdüse
- 8 Schweißdraht
- 9 Schutzgasströmung
- 11 Wasserkühlung
- 12 Mittlere Schutzgaszuführung
- 13 Wasserkühlung
- 14 Zweite Schutzgaszuführung

Abbildung 3.2: MIG/MAG-Schweißbrenner mit zwei Schutzgaszuführungen /16/

Die Besonderheit dieses MSG-Brenners ist die getrennte Zuführung von zwei Schutzgasteilströmen. Einer dieser Teilströme kann dabei als Reinigungsgas nach dem Schweißen eingesetzt werden. Es ist aber auch die Verwendung von beiden Teilströmen zur Anströmung des Lichtbogens während des Schweißens vorgesehen. Durch ein Gasreservoir und das Abströmen über Längsnuten zwischen Brennerinnen- und -außenrohr sollen Schwankungen in der Gasmenge und ein laminares Ausströmen des Schutzgases erreicht werden. Aufgrund des Brenneraufbaus soll ca. 50 % weniger Schutzgas benötigt werden. Dieses Patent zeigt das Verbesserungspotential zwar auf, fraglich ist jedoch, ob der beschriebene Effekt auch anders erreicht, vereinfacht oder sogar weiter verbessert werden kann.



Problematisch ist die getrennte Zuführung und Regelung von zwei separaten Schutzgasvolumenströmen zu sehen.

Die Entwicklung und Auslegung der Strömungsgeometrie des Brenners erfolgt bisher nach dem Prinzip "Trial & Error". Die Qualität der Schutzgasabdeckung wird durch Schweißversuche bewertet.

Es gibt daher viele ungeklärte Fragen:

- Wie hoch ist die tatsächliche Kontamination der Prozessgasatmosphäre bzw.
   des Lichtbogens mit Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff?
- Welche Konzentrationen der oben genannten Gase sind maximal zulässig?
- Mit welchem Strömungsprofil ist der Lichtbogen am besten anzuströmen?
- Welchen Einfluss üben die Schweißparameter (Strom- bzw. Pulsverlauf), die Werkstoffe bzw. die geometrischen Randbedingungen (Stoß-, Nahtart, Brennerstellung, Position) aus?
- Welchen Einfluss hat die Brennerbewegung (z. B. Pendeln, hohe Geschwindigkeit)?



#### 3.2 Analyse von Gasströmung und Schutzgasabdeckung

Zur Analyse und Visualisierung von Schutzgasströmungen an Schweißprozessen können sowohl numerische als auch experimentelle Methoden angewendet werden. Durch die numerische Simulation können komplexe physikalische Prozesse zeitlich und örtlich hochaufgelöst beschrieben werden. In den bisherigen MSG-Prozess-Simulationen steht jedoch nicht die Schutzgasströmung sondern die Charakterisierung des Lichtbogens im Mittelpunkt. Dabei werden der Lichtbogen, der Tropfenübergang oder die Metallverdampfung berücksichtigt, allerdings werden dabei keine Aussagen über die Schutzgasabdeckung getroffen. Stattdessen wird eine idealisierte Argon-Atmosphäre vorausgesetzt /2/-/6/. Bereits vorhandene Modelle zur Beschreibung der Schutzgasabdeckung /7//8/ vereinfachen dagegen die Geometrie des Schweißbrenners oder die physikalischen Effekte im Lichtbogen so stark, dass der Bezug zur Praxis nicht mehr gewährleistet ist. Daher ist es notwendig ein Modell zu entwickeln, welches die Qualität der Schutzgasabdeckung unter Berücksichtigung von Diffusionseffekten, der Beeinflussung der Strömung durch den Lichtbogen, der Bildung von Metalldampf und der komplexen Strömungsgeometrie im Schweißbrenner beschreibt.

Für die Überprüfung der Aussagefähigkeit numerischer Modelle ist es notwendig, die Ergebnisse experimentell zu validieren. Zur Bestimmung von Strömungsfeldern können partikelbasierte Verfahren wie die Laser Doppler Anemometrie (LDA) oder die Partikel Image Velocimetry (PIV) verwendet werden. Durch Zschetzsche /9//10/ wurde die PIV bereits zur Analyse der Schutzgasströmung beim MSG-Schweißen angewendet. Auf Grund der damaligen Anlagentechnik war es allerdings nur möglich, Einzelbilder im einstelligen Hz-Bereich auszuwerten. Dabei wurde zur Berechnung von Strömungsfeldern der Mittelwert vieler Einzelbilder bestimmt, wodurch die Qualität der Ergebnisse deutlich gesteigert werden konnte. Dynamische und instationäre Strömungsmuster können auf diese Weise jedoch nicht untersucht werden. Hier ist auf neue Möglichkeiten durch verbesserte Kameratechnik und leistungsfähigere Beleuchtungslaser hinzuweisen.

Eine weitere Möglichkeit der Strömungsvisualisierung bietet die Schlierentechnik, eine bewährte Methode für die Analyse von Gasströmungen in der



Fahrzeugaerodynamik, der Ballistik oder der Lüftungstechnik /11/. Zur Analyse von Lichtbogenprozessen wird die Schlierentechnik bisher jedoch nur sehr eingeschränkt eingesetzt, u. A. zur Strömungsvisualisierung beim Plasmaschneiden /12/. Vereinzelte Arbeiten aus den Bereichen des Lichtbogenschweißens beziehen sich auf Grund der überblendenden Lichtbogenstrahlung entweder auf die Untersuchung von Brennern ohne Lichtbogen bzw. WIG-Prozesse in niedrigen Leistungsbereichen.

Neben den Methoden der Strömungsvisualisierung kann mit Hilfe der Sauerstoffmessung unter Nutzung des Lambda-Sonden-Verfahrens der Verunreinigungsgrad des Schutzgases gemessen werden. In /13/ wurde diese Methode für die Untersuchung von WIG-Brennern verwendet.



## 4 Zielstellung und Methodischer Ansatz

Ziel des Vorhabens ist das Schaffen verbesserter Vorraussetzungen für das Schweißen von Werkstoffen, die hohe Anforderungen an die Qualität der Schutzgasabdeckung stellen.

Dies beinhaltet zum Einen die Entwicklung und Bereitstellung neuer Methoden zur Visualisierung und Analyse von Schutzgasströmungen an Lichtbogenprozessen, die sowohl in der Brennerentwicklung als auch zur Bewertung der Strömungsverhältnisse in der Fertigung eingesetzt werden können.

Die Prozessgasströmung und deren Beeinflussung durch den Lichtbogen werden mit dem Lichtbogenmodell in ANSYS CFX und mit experimentellen Methoden beschrieben. Das Lichtbogenmodell ist geeignet die Prozessgasströmung und die diffusive bzw. turbulente Vermischung der Prozess- und Atmosphärengase an komplexen Brennergeometrien und unter Berücksichtigung der Effekte des Lichtbogens abzubilden. Die experimentelle Untersuchung und die Validierung des Modells erfolgen mit den Diagnosemethoden der Schlierentechnik, der Particle Image Velocimetry (PIV) und der Sauerstoffmessung am Werkstück. Die Bearbeitung der Thematik erfolgt entsprechend dem in Abbildung 4.1 dargestellten Vorgehen.

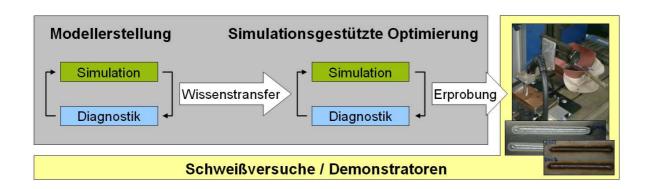


Abbildung 4.1: Methodische Vorgehensweise für die Modellbildung und Validierung durch Diagnostik mit dem Ziel einer verbesserten Prozessgasabdeckung

Zum Anderen sollen mit Hilfe dieser Methoden die Mechanismen der Prozessgasströmung numerisch und experimentell systematisch analysiert und



charakterisiert werden. Das betrifft sowohl die Strömung im Schweißbrenner, die bisher nicht untersucht werden konnte als auch die Interaktionen zwischen dem Verfahren und dem Schutzgasfreistrahl. Dabei sollen u. A. die Abhängigkeiten der Schutzgasabdeckung von

- Konstruktionsmerkmalen (Gasverteilung, Gasdüsenform und -position),
- Schweißparametern (Stromstärke, Schweißgeschwindigkeit) sowie
- Randbedingungen (Stoßart, Schweißposition, Brennerabstand und -neigung) geklärt werden.

Auf Grundlage des erzielten Wissens sollen Gestaltungsmerkmale für die Prozessgasführung von Schweißbrennern abgeleitet und in Demonstratoren erprobt werden. Den Verfahrensanwendern werden potentielle Fehlerquellen hinsichtlich der Auslegung von Schweißprozessen in der Fertigung und Lösungsansätze zu deren Behebung aufgezeigt.

Als Lösungsansatz wird auch ein Strömungskonzept des Schweißbrenners mit einer gradierten Prozessgasströmung betrachtet. So sollen z. B. durch eine langsame Randströmung turbulente Vermischungen vermindert und mit einer schnellen Kernströmung dem Ansaugverhalten des Lichtbogens entsprochen werden.



## 5 Methoden der Strömungsanalyse

#### 5.1 Entwicklung eines Numerischen Modells

#### 5.1.1 Physikalisches Modell und Randbedingungen

Für die numerischen Untersuchungen der Schutzgasströmung beim MSG-Lichtbogenschweißen wird die Software ANSYS CFX 12 verwendet. Die Grundlage für die Berechnung der Strömung bilden die Gleichungen von Energie-, Masse- und Impulserhaltung (Gleichungen 1-3). Zur Modellierung der Vermischung von Schutzgas mit Atmosphärengasen (Gleichung 4) sind sowohl die Diffusion als auch die turbulente Vermischung zu berücksichtigen. Hierbei ist es notwendig, die Diffusion in Abhängigkeit der Gastemperatur zu berücksichtigen. Es werden die temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten von Argon-Luft-Gemischen nach /18/ verwendet, vgl. Anlage 1. Das Gleichungssystem der Strömungsmechanik muss für die Untersuchung von Lichtbogenprozessen erweitert werden, so dass auch die Lichtbogensäule und der Plasmaströmung (Elektrodynamik) berücksichtigt werden. Hierzu wird ein MHD-Modell verwendet. Die zugrunde liegenden Gleichungen (Gleichungen 5-8) sind nachfolgend aufgeführt und können detailliert in /17/ nachgelesen werden.

Gleichungen der Strömungsmechanik:

• Massebilanz: 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho \vec{u}\right) = 0$$

• Energiebilanz: (2) 
$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + S_{NEC} + \frac{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2}{\sigma}$$



• Impulserhaltung: (3)

$$\frac{\partial \left(\rho u_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u_{j} u_{i}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}}\right) + \left(\vec{j} \times \vec{B}\right)_{i}$$

Masseanteil der Komponenten:
 (4)

$$\frac{\partial \rho Y_{\rm B}}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho \,\vec{u} \, Y_{\rm B}\right) + \operatorname{div}\left(\frac{n^2}{\rho} \overline{m}_{\rm A} \,\overline{m}_{\rm B} \, D_{\rm AB}^X \, \operatorname{grad} X_{\rm B}\right) = 0$$

Gleichungen der Elektrodynamik:

Ladungsträgererhaltung: (5)

$$\operatorname{div}\left(\sigma \operatorname{grad}\phi\right) = 0$$

• Stromfluss (Ohm`sches Gesetz): (6)

$$\vec{j} = -\sigma \operatorname{grad} \phi$$

Magnetisches Vektorpotential:

$$\operatorname{div}\left(\operatorname{grad}A_{i}\right)=-\mu_{0}j_{i}$$

Magnetische Flussdichte:
 (8)

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$$

Aus dem Kreuzprodukt von Magnetischer Flussdichte und Stromdichte wird die Lorentzkraft berechnet. Der Einfluss der Lorentzkraft auf das Geschwindigkeitsfeld wird durch einen Quellterm in den Impulserhaltungsgleichungen (Gleichung 3)

(7)



berücksichtigt. Des Weiteren wird die Widerstandserwärmung, durch einen Quellterm in der Energieerhaltungsgleichung (Gleichung 2) implementiert.

Zur numerischen Lösung des Gleichungssystems in einem abgeschlossenen Simulationsbereich sind an dessen Grenzflächen Randbedingungen zu definieren. Unabhängig von der geometrischen und konstruktiven Abstraktion wurden prinzipiell identische oder ähnliche Randbedingungen definiert. In Abbildung 5.1 bzw. in Tabelle 5.1 sind die für das rotationssymmetrische 6°-Modell verwendeten Randbedingungen exemplarisch aufgeführt. Alle im Projekt untersuchten Modellgeometrien sind in Anlage 1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Randbedingungen 6°-Modell

Region (Typ)	Masse und Momente	Energie	Elektrisches Potential	Magnetfeld	Metall- dampf
F-G Inlet	$\dot{m}_{Gas}$	$T_{Gas}$	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$	0
D-E Wall	20	$T_{Elektrode}$	$\Phi = 1 \text{ V}$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$	_
E-F Wall	<b>a</b> i	$T_{Kontaktrohr}$	-	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$	
G-H Wall		$T_{Gasd\"{u}se}$	-	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$	-
C-M Interface	u = 0  m/s	flux	flux	flux	$\dot{m}_{Dampf}$
B-K Interface	u = 0  m/s	flux	flux	flux	$\frac{\partial Y_{\rm B}}{\partial n} = 0$
G-P-H Interface	u = 0  m/s	$T_{Gasd\"{ ildu}se}$	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	flux	$\frac{\partial Y_{\rm B}}{\partial x} = 0$
M-F Interface	u = 0  m/s	$T_{Kontaktrohr}$	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	flux	$\frac{\partial n}{\partial Y_{\rm B}} = 0$
E-M Interface	-:	$T_{Elektrode}$	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	flux	
H-I-J-K Opening	$p_0$	T = 300  K	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$A_i = 0 \text{ Tm}$	$\frac{\partial Y_{\rm B}}{\partial n} = 0$
K-L Wall	=	T = 600  K	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$A_i = 0 \text{ Tm}$	-
A-L Wall	-2	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\Phi = 0 \text{ V}$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$	-



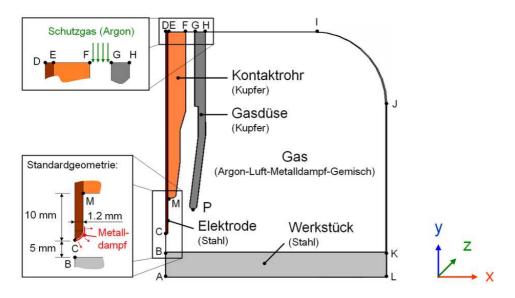


Abbildung 5.1: Geometrie und Randbedingungen 6°-Mod ell

#### 5.1.2 Netzentwicklung und Variation der Modellgeometrie

Die Netzerstellung erfolgte in ANSYS ICEM CFD 12. Die Software ermöglicht die Vernetzung durch tetraedrische oder hexaedrische Elemente. Tetraedrische Netze können von der Software für eine vorgegebene Geometrie automatisch generiert werden, sind aber auf Grund der hohen Anzahl von Knotenpunkten im Hinblick auf die Rechenzeit problematisch. Weiterhin weisen tetraedrische Netze in den Grenzschichten zu Festkörpern Nachteile auf. Anwendung findet dieser Vernetzungstyp vor allem bei sehr komplizierten Strukturen oder bei sehr ungünstigen Winkeln in der durch das Modell abzubildenden Geometrie. Die Erstellung eines Hexaedernetzes hat erhebliche strömungstechnische rechentechnische Vorteile, muss jedoch manuell durchgeführt werden. Hierfür wird die Strömungsgeometrie in einzelne Blöcke unterteilt (Blocking), welche im Anschluss in kleine Hexaeder zerlegt werden (Meshing). Für die Untersuchung der Schutzgasströmung an Schweißbrennern wurden im Projekt ausschließlich Hexaedernetze entwickelt und eingesetzt.

Das Netz und die Gitterauflösung bestimmen wesentlich die Qualität und die Rechenzeit des numerischen Modells. Im Allgemeinen ist bekannt, dass die finiten Elemente / Volumen so klein sein sollten, dass diese die wesentlichen Gradienten im



Gleichungssystem adäquat abbilden können. Andererseits bestimmt die Anzahl der Elemente die Rechenzeit. Dieser grundsätzliche Widerspruch in den Anforderungen an das numerische Gitter ist nur durch lokal angepasste Gitterauflösung (nichtäquidenside Gitter) zu entsprechen.

Die systematische Herleitung einer geeigneten Gitterauflösung erfolgte an einem rotationssymmetrischen Modell mit nur einer Elementen-Schicht in Umfangsrichtung (6º-Modell, Geometrie 1), vgl. Abbildung 5.2. Dabei werden das Stromkontaktrohr, die Drahtelektrode, die Schutzgasdüse, das Werkstück und der Strömungsraum abgebildet. Bereits dieses erste Gitter war ein strukturiertes nicht-äquidensides Gitter. Von diesem Gitter ausgehend wurde nun schrittweise die Anzahl der finiten Elemente erhöht. Zu jedem Gitter wurden die Eigenschaften des Lösers (mittleren und maximalen Residuals der Erhaltungsgleichung) und die Sauerstoffkonzentration an Referenzpunkten verglichen.

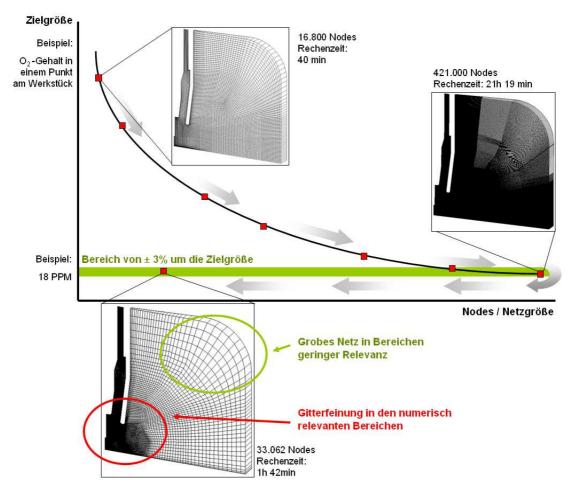


Abbildung 5.2: Netzentwicklung am Beispiel eines 6°-Modells



Für ein Netz mit ca. 420.000 Elementen wurde festgestellt, dass sich alle maximalen Residuals unter 10<sup>-4</sup> und alle mittleren unter 10<sup>-6</sup> befinden sowie gleichzeitig bei Verdopplung der Gitterauflösung im Vergleich zum vorhergehenden Netz die Änderung der Sauerstoffkonzentration in den Referenzpunkten geringer als 3 % ist. Im Sinne der Modellierung wurde von einer gitterunabhängigen Lösung ausgegangen. Auf Basis der im Modell berechneten Gradienten erfolgte anschließend eine Ausdünnung des Gitters. Dies erfolge vor allem in den Randbereichen des Simulationsraumes. Die Anzahl der nötigen Elemente sowie der benötigten Rechenzeit konnte auf diesem Weg um Faktor zwölf reduziert werden, vgl. Abbildung 5.2.

Um die Aussagefähigkeit des Modells zu bewerten, wurden die Ergebnisse der Simulation mit gemessenen Sauerstoffkonzentrationen im Schutzgasfreistrahl bei verschiedenen Schutzgasmengen verglichen. Hierfür wurde das in Kapitel 5.4 beschriebenen Lambda-Sonden-Verfahren eingesetzt. Es konnte festgestellt werden, dass die durch das 6°-Modell (Geometrie 1 in Abbild ung 5.3) berechneten Sauerstoffkonzentrationen in den Randbereichen deutlich unter den gemessenen Werten lagen, vgl. Abbildung 5.3.

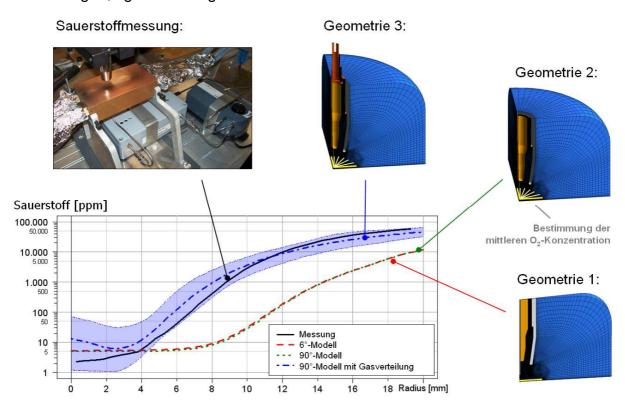


Abbildung 5.3: Variation der Modellgeometrie und Vergleich mit Sauerstoffmessungen



Aus diesem Grund wurde die für das 6°-Modell optimi erte Netzstruktur im nächsten Schritt auf ein rotationssymmetrisches 90°-Modell (Geometrie 2 in Abbildung 5.3) übertragen. Mit dieser nach wie vor rotationssymmetrischen Abstraktion können prinzipiell auch dreidimensionale Wirbelstrukturen abgebildet werden. Im Ergebnis zeigten sich bei Verwendung des SST-Turbulenzmodells jedoch keine signifikanten Unterschiede zu einem rotationssymmetrischen 6°-Mod ell. Es wurde deshalb vermutet, dass die Qualität der Gasabdeckung am Werkstück entscheidend durch die Strömungsgeometrie und die daraus resultierenden Strömungseffekte im Brenner beeinflusst wird, welche sowohl durch Geometrie 1 als auch durch Geometrie 2 vernachlässigt werden.

Die Modellgeometrie wurde daher erneut erweitert und es erfolgte am 90°-Modell die Integration der brennerinternen Strömungsräume im Bereich des Gasverteilers sowie dessen Anströmung (Geometrie 3 in Abbildung 5.3). Es handelte sich nun nicht mehr eine axialsymmetrische Strömungsgeometrie, so dass eine doppeltum spiegelsymmetrische Randbedingung vorgegeben wurde. Wie in Abbildung 5.3 ersichtlich, zeigen Modell und Messungen durch die Berücksichtigung der Gasverteilung eine gute Übereinstimmung. Der in Abbildung 5.3 für Geometrie 3 blau Bereich ergibt sich durch die Ausbildung einer gefärbte Strömungsstruktur bei Verwendung eines LES-Turbulenzmodells. Die Erprobung der in ANSYS CFX zur Verfügung stehenden Turbulenzmodelle wird in Kapitel 5.1.3 näher beschrieben.

#### 5.1.3 Erprobung Turbulenzmodell und Validierung

Zur Modellierung der Turbulenz stehen in ANSYS CFX je nach Anwendungsfall bis zu 20 Turbulenzmodelle zur Verfügung, die jeweils benutzerdefiniert kalibriert werden können. Im Rahmen des Projektes wurde deren Anwendbarkeit untersucht und ausgewählte RANS sowie LES-Turbulenzmodelle bewertet (Anlage 3). Es konnte gezeigt werden, dass das beste Anwendungsvermögen für axialsymmetrische Modelle dem k-ε-Modell bzw. dem Shear Stress Transport (SST) Modell zuzuordnen ist. Das von Menter entwickelte SST-Turbulenzmodell kombiniert die Vorteile des k-ε-Modells in den wandfernen Bereichen mit den Vorteilen des k-ω-Modells in der



Grenzschicht. In stationären Untersuchungen wird mit dem SST-Modell eine mittlere Turbulenz im Gas berechnet, auf deren Basis Vermischungsprozesse durch eine turbulente Diffusion abgeschätzt werden. Bei komplexeren 3-dimmensionalen Modellen bietet sich neben dem SST-Modell die Large Eddy Simulation (LES) an. Diese ermöglicht die zeitaufgelöste Modellierung der Bildung, des Transports und der Auflösung von Wirbelfeldern im Brenner und im Schutzgasfreistrahl. Durch die Wirbelfelder können Vermischungen direkt berechnet werden.

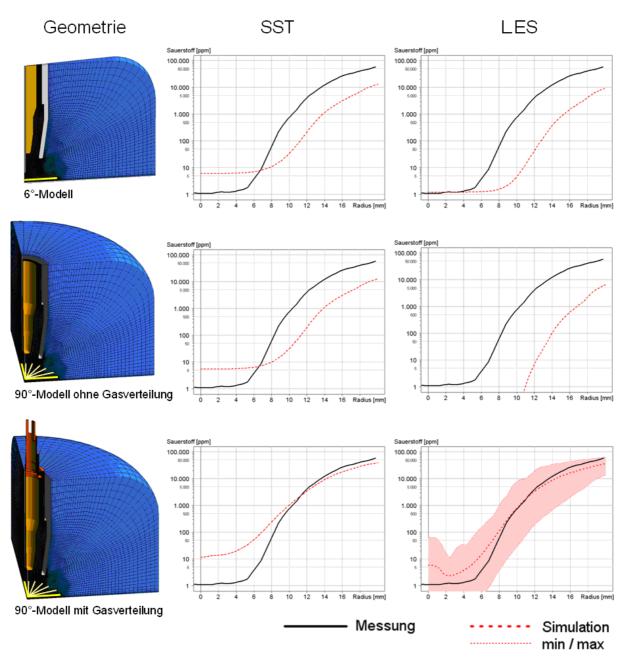


Abbildung 5.4: Gegenüberstellung von SST- und LES-Turbulenzmodell an verschiedenen Modellgeometrien (Freistrahlströmung ohne Lichtbogen, Argon 18 I/min)



In ANSYS CFX können die Vorteile von RANS und LES auch kombiniert angewendet werden. Durch das zur Verfügung stehende DES bzw. SAS-SST-Turbulenzmodell wird die wandnahe Grenzschicht und Wirbel mit einem Durchmesser unter der Gitterauflösung durch das U-RANS-Modell abgebildet, während die freien wandfernen Strömungen durch ein LES-Modell beschrieben werden. Im Wesentlichen besteht die Hauptaussage für die Bewertung der Schutzgasströmung an Schweißbrennern darin, dass zeitliche Änderungen im Strömungsverhalten durch turbulente Effekte nur durch die Anwendung von LES abgebildet werden können, vgl. Abbildung 5.4.

#### 5.1.4 Empfehlungen für die Anwendung von Numerischen Modellen

Auf Grundlage der durchgeführten Netzentwicklung, der Analyse verschieden komplexer Geometrien und der iterativen Modellentwicklung und Validierung können grundsätzliche Empfehlungen für die Anwendung und Auslegung numerischer Modelle für die Brenner- und Verfahrensentwicklung abgeleitet werden.

- Anforderungen an Geometrie und Vernetzung:
- 1. Die rotationssymmetrischen "Tortenstück"-Modelle setzen eine Vernachlässigung der Gasverteilung im Brenner voraus. Diese Modelle eignen sich auf Grund der relativ kurzen Rechenzeiten für die Allgemeine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Schutzgasfreistrahl sowie für Geometrievariationen der Schutzgasdüse, Untersuchung verschiedener Brennerabstände oder die Erprobung gradierter Strömungsprofile. Aus den durchgeführten Vergleichen von Geometrie 1 und Geometrie 2 kann bei vorliegender Symmetrie zur y-Achse und über den Brennerumfang gleichmäßigen Einströmbedingungen im Allgemeinen die Verwendung eines 21/2-dimensionalen "Tortenstück"-Modells mit nur einem Gitterelement in Umfangsrichtung empfohlen werden. Weiterhin wurde an Geometrie 2 nachgewiesen, dass es für die Ausbildung der Schutzgasströmung, unter den Bedingungen, keinen Unterschied zwischen genannten einer rotationssymmetrischen und einer spiegelsymmetrischen Randbedingung gibt.



Durch die rotationssymmetrischen "Tortenstück"-Modelle ohne Berücksichtigung der brennerinternen Gasverteilung werden Turbulenzen und ungleichmäßige Strömungen nur unzureichend abgebildet. Verunreinigungen in den Randbereichen des Freistrahls werden daher deutlich geringer dargestellt als in der Realität.

- 2. Um in der Brennerentwicklung die Entstehung von Turbulenzen und ungleichmäßigen Strömungsprofilen im Brenner zu untersuchen, ist es notwendig die Geometrie des Gasverteilers und dessen Anströmung im Modell abzubilden. Die Rechenzeiten können durch die Berücksichtigung von geeigneten Spiegel-Symmetrierandbedingungen gegenüber einer 360°-Vernetzung reduziert werden.
- 3. Der Strömungsraum in Prozessumgebung sollte ausreichend groß vernetzt werden, so dass Randbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Freistrahlströmung bzw. das über das Werkstück nach außen abströmende Schutzgas haben. Für axialsymmetrische Modelle (z.B. Geometrie 1-3) sollte die Abmessung in x-Richtung (vgl. Abbildung 5.1) mindestens dem 5fachen Für Gasdüsendurchmesser betragen. Modellgeometrien, die die Vorschubgeschwindigkeit oder die Brennerneigung berücksichtigen kann sich der abzubildende Bereich deutlich vergrößern. Maßgebend ist in jedem Fall die sich ausbildende Strömung, so dass der für das Modell notwendige Strömungsraum, wie in Abbildung 5.2 für die Gittergröße beschrieben, ggf. auch iterativ erarbeitet werden sollte.
- 4. Die maximale Maschenweite für Strömungsquerschnitte im Brenner sollte nicht größer sein als 0,3 mm. In Gebieten großer Gradienten ist eine feine Vernetzung (Maschenweite ca. 0,1 mm) erforderlich. Dies betrifft z. B. den Lichtbogenansatz an Drahtelektrode und Werkstück, die Strömungsablösung an der Gasdüse und den Freistrahlbereich. Wird das in Kapitel 5.1.1 beschriebene Lichtbogenmodell verwendet, sollte die minimale Maschenweite an der Elektrode und am Werkstück nicht kleiner sein als 0,1 mm. In den Außenbereichen kann das Gitter wesentlich gröber strukturiert werden (Maschenweite bis zu 4 mm).



- Anforderungen an das Physikalische Modell:
- Die Vermischung von Schutzgas mit Umgebungsluft wird erheblich von der temperaturabhängigen Beweglichkeit der Teilchen bestimmt. Diese Beweglichkeit wird durch den Diffusionskoeffizienten beschrieben und muss bei Modellen mit Lichtbogen immer temperaturabhängig berücksichtigt werden. Im Projekt wurden hierfür die Daten von Murphy verwendet /18/.
- 2. Einen entscheidenden Einfluss auf die Vermischung von Gasen haben turbulente Strömungseffekte. Diese sind gekennzeichnet durch dreidimensionale, chaotische sowie instationäre Strömungen und können nur bei extrem feiner Gitterauflösung von wenigen Mikrometern direkt approximiert werden. Da diese Gitterauflösung für die Brenner- und Verfahrensentwicklung auf Grund extremer Rechenzeiten und bestimmter Modellanforderungen oft nicht zielführend ist, muss die Turbulenz durch Modelle abgebildet werden. Für 2½-dimensionalen "Tortenstück"-Modelle kann die Verwendung des SST-Turbulenzmodells sowohl für stationäre als auch für zeitbestimmte Rechnungen empfohlen werden. Auch für 3-dimensionale Strömungsgeometrien kann grundlegend das SST-Modell empfohlen werden. Gerade für zeitbestimmte Prozesse und die Darstellung turbulenter Strukturen oder Wirbelablösungen ist jedoch ein LES-basiertes Turbulenzmodell wie das DES oder das SAS-SST-Modell vorzuziehen. Da diese Turbulenzmodelle immer transient gerechnet werden müssen, bietet sich daher eine mit dem SST-Modell berechnete Startlösung an. Für die Auswertung zeitbestimmter Prozesse wurde im Projekt ein Zeitraum von mindestens 0,2 Sekunden ausgehend von einer parametergleichen Startlösung berechnet. Auswertung des zeitbestimmten Strömungsverhaltens sollte nicht zu Beginn der Rechnung erfolgen, da sich die Strömungseigenschaften der Startlösung erst im Laufe der transienten Rechnung abbauen. Im Projekt erfolgte die Auswertung daher erst nach einer berechneten Zeit von 0,1 Sekunde.
- 3. Für die Untersuchung der Schutzgasströmung an Lichtbogenprozessen ist es notwendig die aus der Elektrodynamik resultierenden Kräfte (Lorentzkraft) und Energien (Wärme durch elektrischen Widerstand) im Modell zu



berücksichtigen. Der Lichtbogen beeinflusst die Charakteristik Gasströmung entscheidend und kann zur Verfahrensentwicklung nicht auf seine thermischen Eigenschaften reduziert werden. Brennerentwicklung ist die Integration eines MHD-Modells vor allem dann sinnvoll, wenn durch die Gestaltung der brennerinternen Strömungsräume der Lichtbogen in einer bestimmten Form angeströmt werden soll und die Wechselwirkungen zwischen Gasströmung und Prozess visualisiert werden müssen. Die Untersuchung der Gasverteilung und die Analyse daraus resultierender Strömungseffekte können auch an einem Freistrahlmodell ohne Lichtbogen erfolgen.

4. Der MSG-Prozess ist durch die Verdampfung von abschmelzendem Zusatzwerkstoff gekennzeichnet. Diese Verdampfung kann im Modell durch einen an die Stromdichte gekoppelten Verdampfungsmassenstrom am Tropfen vorgegeben werden. Die Untersuchungen im Projekt zeigen, dass die Integration des Metalldampfes für die realitätsnahe Abbildung eines MSG-Lichtbogens zwar sinnvoll ist, für die Untersuchung der Gasströmung aber auch vernachlässigt werden kann.



#### 5.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

Beim PIV werden hoch schmelzende Keramikoxid-Partikel in die Schutzgasströmung durch einen Laser belichtet und mit Hilfe einer schwindigkeitskamera aufgenommen. Die Belichtung erfolgt mit Hilfe einer speziellen Optik, die das Laserlicht in einer Ebene auffächert. Somit werden lediglich Partikel belichtet, die sich in dieser Ebene befinden. Die anschließende, statistische Auswertung Position einzelner Partikelgruppen der durch spezielle Auswertealgorithmen ermöglicht die quantitative Berechnung von Strömungsfeldern Bewertung der Schutzgasströmung, vgl. Abbildung entscheidenden Einfluss auf die Abbildung der Gasströmung hat die Partikelgröße. Sind die Partikel zu groß, können sie auf Grund ihrer Trägheit der Strömung nicht ausreichend folgen. Sind die Partikel zu klein, werden sie unzureichend beleuchtet und sind für die Auswertung nicht nutzbar.

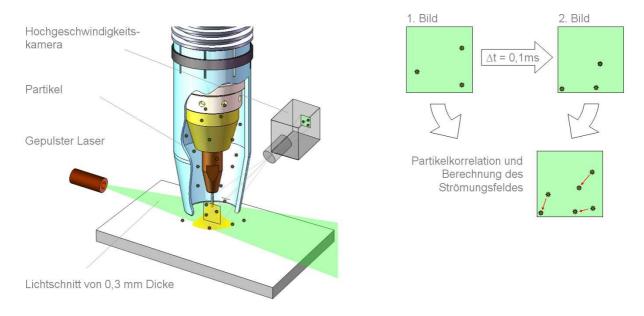
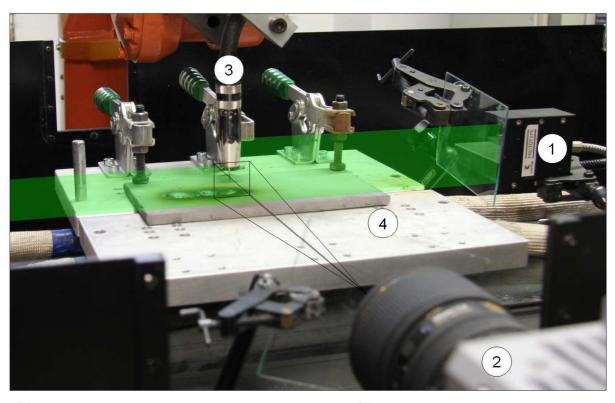


Abbildung 5.5: Prinzip und Datenverarbeitung der Particle Image Velocimetry (PIV)

Die von Zschetzsche /9//10/ durchgeführten Untersuchungen ermöglichten bisher die Aufnahme und Auswertung gemittelter Einzelbilder zu phasengleichen Pulszeitpunkten. Über die Zuordnung der Bilder zu einzelnen Prozessphasen wurden Schutzgasströmungen beim Kurz-, Sprüh- und Impulslichtbogenschweißen erstmals quantitativ analysiert. Die Regelung von Schweißprozessen, die Abfolge einzelner



Prozessphasen und damit auch die Beeinflussung der Schutzgasströmung beim MSG-Schweißen erfolgen jedoch innerhalb weniger Mikrosekunden. Die Untersuchung und Dokumentation der Prozesse muss daher kontinuierlich und mit einer weitaus höheren Frequenz erfolgen, als dies zum damaligen Zeitpunkt technisch umsetzbar war.



- (1) Lichtschnittoptik des gepulster Diodenlasers
- (2) Hochgeschwindigkeitskamera Photron SA4
- 3 Robotergeführter Schweißbrenner
- 4 Linear bewegtes Werkstück

Abbildung 5.6: Versuchsaufbau der Particle Image Velocimetry (PIV)

Ausgehend vom bisherigen Versuchsaufbau wurde die Methode daher weiterentwickelt. Das experimentelle Setup ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Dabei wird der Schweißbrenner durch einen Roboter geführt, so dass er nach dem Schweißzyklus aus der Schweißposition in eine Reinigungsposition fährt. Die Reinigung erfolgte nach jedem Schweißzyklus mechanisch durch Entfernen und Reinigen von Gasdüse, Stromkontaktrohr, Düsenstock und Gasverteiler sowie durch Ausblasen mit Druckluft. So wurde sichergestellt, dass Strömungsquerschnitte vor Beginn der Messung nicht durch Pulverrückstände beeinträchtigt wurden. Während



des Schweißens wird der Brenner nicht verfahren. Die jeweilige Vorschubgeschwindigkeit wird durch die Bewegung des Werkstücks realisiert, so dass die Kameraposition und damit der Bildausschnitt immer konstant gehalten werden kann. Durch eine spezielle Mischvorrichtung erfolgt die Zugabe von Partikeln in den Schutzgasvolumenstrom kontinuierlich. Die jeweilige Partikelmenge im Schutzgas kann variiert werden. Es wurden Magnesiumoxidpartikel mit Partikelgrößen von 0,5-50 µm, einer Schmelztemperatur von 2640 ℃ und einer Dichte von 3,65 g/cm<sup>3</sup> verwendet. Durch die Nutzung eines gepulsten Beleuchtungslasers (Cavilux 500HF, 810 nm) und die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera (Photron SA4) mit Bildraten von bis zu 1.000.000 Hz werden auch kontinuierliche, hochaufgelöste Aufnahmen z.B. eines MSG-Impulslichtbogens ermöglicht. In den durchgeführten Versuchen wurde mit einer Bildrate von 10.000 fps und einer Belichtungszeit von 2,4 µs sowie der daraus resultierenden maximalen Bildgröße von 768 x 512 Pixel gearbeitet. Kamera und Laser sind dabei so aufeinander abgestimmt, dass während jeder Belichtungszeit der Kamera genau ein Laserimpuls von 2 µs Pulszeit und einer Pulsenergie von 1 mJ ausgelöst wird. Für eine Bildrate von 5000 Hz wurden eine Belichtungszeit von 5,6 µs, eine Laserpulsdauer von 4 µs und einer Pulsenergie von 2 mJ gearbeitet. Um die Beleuchtung der Partikel nur durch den Laser zu realisieren und die Strahlung des Lichtbogens auszublenden wurde ein Schmalbandfilter von 808 ±3,1 nm verwendet. Entscheidend für die qualitativ hochwertige Beleuchtung der Partikel ohne Überblendungen ist dabei dieses Verhältnis von Belichtungszeit, Pulsdauer, Intensität und der spektralselektiven Eigenschaften der eingesetzten Filtertechnik sowie die Qualität des Lichtschnittes, welcher durch die Lichtschnittoptik in einem Bereich von 0,5 x 40 mm aufgespannt wurde. Nur optimal beleuchtete Partikelgruppen sind durch die Korrelationssoftware auswertbar und können in Strömungsprofile umgerechnet werden. Für die im Projekt durchgeführten Untersuchungen ist neben der von der Firma DANTEC® angebotenen Software FlowManager 4.7 auch eine eigene, MATLAB-LabVIEW basierte Auswertesoftware entwickelt worden, die neben einer definierten Skalierung der Strömungsvektoren Geschwindigkeitsanalyse auch eine farbliche ermöglicht. drei Verfeinerungsschritten wird dabei der Bereich der Partikelkorrelation von 64 x 64 Pixel auf 16 x 16 Pixel reduziert.



In Abbildung 5.7 ist die Dynamik der Gasströmung am Beispiel des MAG-Impulsschweißens dargestellt. Während und nach der Hochstromphase wird das Gas stark zur Lichtbogenachse beschleunigt. Es können Wirbelfelder nachgewiesen werden, die während des Stromanstieges entstehen und im Anschluss nach außen transportiert werden. Es wird gezeigt, dass die Strömung dem Pulsprofil folgt und sich die Schutzgasabdeckung in sehr kurzen zeitlichen Abständen ändert. Die Kombination der PIV mit synchronisierten Messsignalen im MHz-Bereich ermöglicht die Bewertung der Schutzgasströmung in Abhängigkeit von der Prozessphase, von definierten Parametervariationen sowie die Beurteilung des Einflusses von Prozessstörungen, beispielsweise während des Kurzschlusses. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die PIV zur zeitlich und örtlich hochaufgelösten quantitativen Beschreibung des Strömungsfeldes im Schutzgasfreistrahl bzw. der Lichtbogenumgebung von MSG-Schweißprozessen sehr gut eignet.

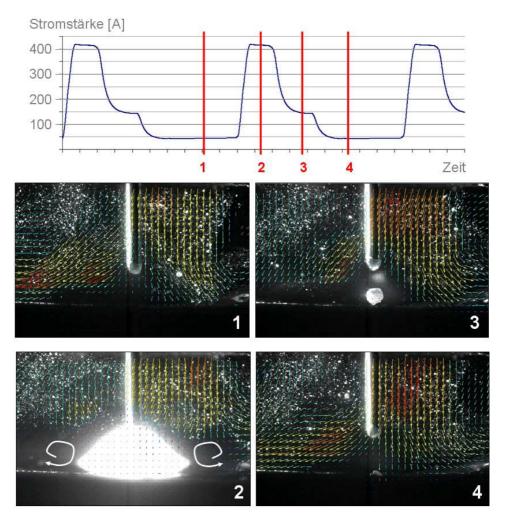


Abbildung 5.7: Analyse verschiedener Pulsphasen beim MSG-Schweißen



#### 5.3 Schlierentechnik

Die Schlierenmesstechnik visualisiert die in der Strömung vorkommenden Dichteunterschiede bzw. den von der Dichte linear abhängigen Brechungsindex, um die Ablenkung von Lichtstrahlen zu erfassen. Ursachen für einen geänderten Brechungsindex sind kompressible Wirbel, unterschiedliche chemische Zusammensetzung oder Temperaturunterschiede im Gas. Stand der Technik /11/ ist der kompakte Aufbau in der Töpplerschen Z-Schlierenanordnung, Abbildung 5.8. Zwischen zwei Parabolspiegeln wird ein paralleler Strahlengang erzeugt und durch eine Schlierenblende geführt. Auf Grund der Dichteunterschiede werden die Lichtstrahlen abgelenkt und führen damit nicht mehr durch den Brennpunkt des Spiegels bzw. werden von der Schlierenblende blockiert. In der Folge ergeben sich Helligkeitsunterschiede im Bild, die das Strömungsverhalten charakterisieren.

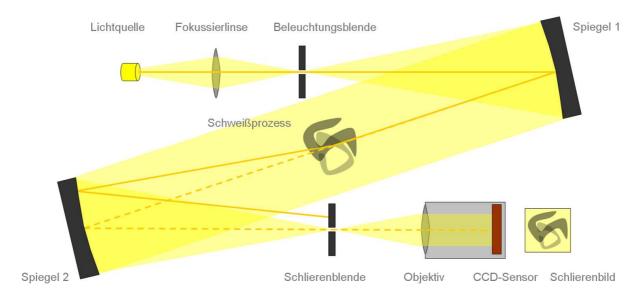
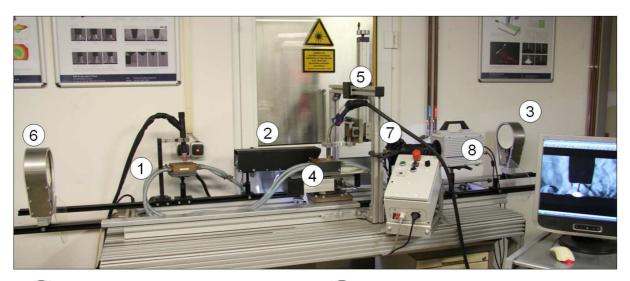


Abbildung 5.8: Prinzip Schlierentechnik in Töpplerscher Z-Anordnung

Wie in Kapitel 3.2 bereits erwähnt ist die Schlierentechnik eine bewährte Methode für die Analyse von Gasströmungen in den Anwendungen der Fahrzeugaerodynamik, der Ballistik oder der Lüftungstechnik /11/. Die Anwendbarkeit der Schlierentechnik zur Analyse von Gasströmungen an strahlungsemittierenden Prozessen, wie z.B. den Lichtbogenverfahren, war bisher nur sehr eingeschränkt möglich. Die hohe Strahlung des Lichtbogens überblendet die für die Auswertung nötigen Schlieren, so



dass eine qualitativ hochwertige Beurteilung des Strömungsverhaltens gerade bei strahlungsintensiven Prozessen nicht möglich war.



- 1 Beleuchtung durch einen WIG-Lichtbogen
- (2) Beleuchtung durch eine LED
- (3) Spiegel 1
- 4 Drehbare Linearachse und Werkstückaufnahme
- (5) Höhenverstellbare Brenneraufnahme
- (6) Spiegel 2
- (7) Filteraufnahme und Schlierenblende
- 8 Hochgeschwindigkeitskamera

Abbildung 5.9: Versuchsaufbau Schlierentechnik

Im Projekt wurde die Schlierenmethode im Hinblick auf die Anforderungen von Lichtbogenprozessen weiterentwickelt. In Abbildung 5.9 ist die Versuchsanordnung dargestellt. Der Aufbau der optischen Komponenten entspricht im Wesentlichen der Töpplerschen Z-Schlierenanordnung, welche in Abbildung 5.8 dargestellt ist. Die verwendeten Hohlspiegel haben eine Brennweite von 1600 mm und einen Abstand von ca. 3 m zueinander, welcher aber flexibel eingestellt werden kann. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass auf die Fokussierung der Beleuchtungsquelle durch Fokussierlinse und Beleuchtungsblende verzichtet werden kann, so dass die Beleuchtungsquelle genau in den Brennpunkt des ersten Hohlspiegels gesetzt wird. Diese Anpassung wird ermöglicht, indem an der Kamera ein Objektiv mit einer Brennweite von 360 mm verwendet und auf den Schweißprozess scharf gestellt wird. Der Schweißprozess wird etwa mittig zwischen den beiden Hohlspiegeln im parallelisierten Strahlengang ausgeführt. Der Lichtbogen brennt auf einem bewegten Werkstück. Brennerposition SO dass die immer unverändert Die



Vorschubgeschwindigkeit kann durch eine drehbar gelagerte Linearachse in beliebigen Winkeln zum Strahlengang eingestellt werden.

Um Überblendungen im Schlierenbild zu vermeiden wurden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wird mit einer hohen Intensität der Beleuchtung gearbeitet, so dass die Belichtungszeit der Kamera (Photron SA4) reduziert werden kann. In den durchgeführten Untersuchungen wurde dabei je nach Prozess mit Bildraten zwischen 3.000 und 10.000 fps und Belichtungszeiten von 2 bis 80 µs gearbeitet. Das Verhältnis von Beleuchtungsintensität und Strahlung des Prozesses wird somit erhöht und Überblendungen im Bild werden reduziert. Zum Anderen werden für die Beleuchtung Wellenlängen verwendet, die sich von der Strahlung des Prozesses abgrenzen. Die starke Strahlung des MSG-Lichtbogens wird durch die Strahlung des Metalldampfkerns dominiert. Die emittierten Wellenlängen des Eisendampfes beim MAG-Schweisen von Stahl sind kleiner als 650 nm. Für die Beleuchtung von MSG-Prozessen wird daher ein Argon-WIG-Lichtbogen verwendet, der auf einer wassergekühlten Kupferplatte gezündet wird. Die zur Beleuchtung verwendeten Stromstärken liegen zwischen 150 und 400 A. Starke Argonlinien sind u.a. bei 750 nm zu finden, so dass vor dem Objektiv ein Bandfilter von 750 ±10 nm verwendet wird. Durch diesen Versuchsaufbau ist es möglich, die starke Strahlung des Lichtbogens auch beim MSG-Schweißen nahezu auszublenden. Dadurch wurden erstmals hochqualitative Aufnahmen an realen MSG-Schweißprozessen im Kurz-, Sprüh- und Impulslichtbogenbereich durchgeführt. Für die Untersuchung von Strömungen ohne Lichtbogen wurde eine LED mit einer Leistung von 12 W eingesetzt. In Abbildung 5.9 sind beide Lichtquellen hintereinander angeordnet. Je nach Beleuchtungsanforderung wird die jeweils bevorzugte Lichtquelle in den Brennpunkt des ersten Spiegels gesetzt.

Durch die Analyse des Schutzgasfreistrahls können Aussagen über den Turbulenzgrad der Strömung gewonnen werden, vgl. Abbildung 5.10, oben links. Es ist möglich, die Einflüsse von Geometrieänderungen der Schutzgasdüse oder die Auswirkungen geänderter Strömungsquerschnitte im Brenner zu untersuchen. Für die Untersuchung von Freistrahlströmungen ist die chemische Zusammensetzung des Schutzgases von entscheidender Bedeutung. Besonders durch Kohlendioxid oder Mischgase mit hohem Kohlendioxidanteil lassen sich Dichtegradienten gut



visualisieren. Um Dichtegradienten an Freistrahlströmungen mit Argon zu visualisieren muss die Schlierenblende den Strahlengang stark beschneiden, was auf Grund von Beugungseffekten an den Kanten der Blende auch zu Unschärfe im Bild führen kann.

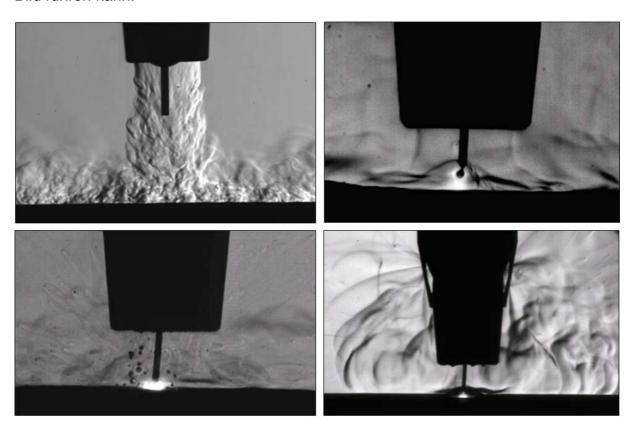


Abbildung 5.10: Schlierenaufnahmen an einem Schutzgasfreistrahl (oben links), an einem MIG-Sprühlichtbogen (oben rechts), Aufreißen des Kurzschlusses an einem MSG-Prozess (unten links) und Abbildung einer Absaugströmung (unten rechts)

Bei der Untersuchung realer Schweißprozesse sind Dichteunterschiede infolge der Schutzgaszusammensetzung von untergeordneter Bedeutung und die Charakteristik des Schlierenbildes wird von thermischen Effekten dominiert. In den Aufnahmen lässt sich das Ablösen der Strömung an der Schutzgasdüse sowie die Gebiete hoher Temperaturgradienten im äußeren Lichtbogenbereich hervorragend erkennen, Abbildung 5.10, oben rechts. Je nach Einstellung der Schlierenblende ist es möglich, die Sensibilität des Messaufbaus zu ändern und die Intensität der abgebildeten Schlieren zu beeinflussen. Wird die Schlierenblende weit geöffnet, entstehen fast ausschließlich Schattenbilder, welche beispielsweise die Bildung von Metalldampf durch Prozessunregelmäßigkeiten visualisieren, Abbildung 5.10, unten links.



Weiterhin ist die Schlierenmethode hervorragend geeignet um Strömungen zu charakterisieren, die sich nicht unmittelbar zwischen Schutzgasdüse und Werkstück ausbilden. So können beispielsweise verschiedene Rauchgasabsaugsysteme untersucht und die Effektivität der Absaugung optisch bewertet werden, Abbildung 5.10, unten rechts.

Der kompakte und in der Dimensionierung flexible Aufbau sowie das den Prozess nicht beeinflussende Messverfahren ermöglichen den Einsatz der Schlierentechnik in fast jeder Fertigung. Es ist jedoch zu beachten, dass Rückschlüsse auf die exakte Position einer turbulenten Strömungsstruktur nur sehr eingeschränkt getroffen werden können, da es sich im Gegensatz zu PIV um ein Durchlichtverfahren handelt.



#### 5.4 Messung der Sauerstoffkonzentration

Um die Qualität der Schutzgasabdeckung zu bewerten, ist die Kenntnis über die Kontamination des Schutzgases durch Umgebungsluft von großer Bedeutung. Zur Messung des Sauerstoffgehaltes im Schutzgasfreistrahl und im Lichtbogen kann das Lambda-Sondenverfahren genutzt werden, vgl. Abbildung 5.11 /13/.

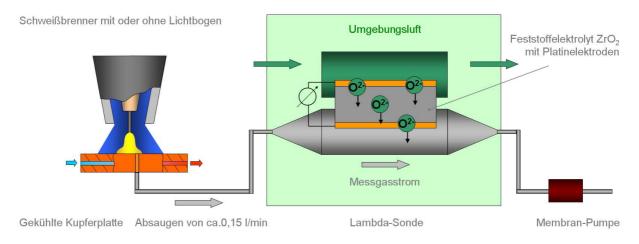


Abbildung 5.11: Sauerstoffmessung am Werkstück durch Nutzung des Lambda-Sondenverfahrens

Hierzu wird der Lichtbogen über eine wassergekühlte Kupferplatte geführt, in der sich eine Messbohrung mit 0,5 mm Durchmesser befindet. Der extrahierte Massestrom beträgt ca. 0,15 l/min. Die Analyse erfolgt durch eine spezielle Lambda-Sonde, die auch Messungen im einstelligen ppm- Bereich ermöglicht. Das Messprinzip basiert auf der Ionisation von freien Sauerstoffatomen durch aus den geheizten Platinelektroden austretenden Elektronen. Die Zirkoniumdioxidschicht zwischen den Elektroden ist für diese Sauerstoffionen leitfähig, so dass ein Ionendrift entsteht. An den Elektroden kann in Abhängigkeit des Konzentrationsgefälles von freiem Sauerstoff eine Spannung gemessen werden.

Im Rahmen des Projektes wurde die Methodik der Sauerstoffmessung Lichtbogenschweißbrennern von /13/ aufgegriffen und für Linienund automatisiert, Abbildung 5.13. Flächenmessungen vgl. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Der Schweißbrenner wird durch 3-Achsen-Flachbetteinheit über eine einer feststehenden, wassergekühlten



Kupferplatte bewegt. Durch die Linearachsen der Flachbetteinheit können minimale Schrittweiten von 12 µm erreicht werden, so dass auch die Randbereiche des Schutzgasfreistrahls mit hoher Genauigkeit analysiert werden können.



(1) 3-Achsen Flachbetteinheit

- 4 Membranpumpe
- 2 Wassergekühlte Kupferplatte mit Messbohrung
- 5) Steuerung von Sonde und Messablauf

3 Lambda-Sonde

Abbildung 5.12: Versuchsstand zur Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück

Analog der in Abbildung 5.13 aufgeführten Vorgehensweise wird der Brenner über der Messbohrung ausgerichtet und die Messung gestartet. Nach dem Anfahren eines Messpunktes wird durch eine Haltezeit von 15 Sekunden gewährleistet, dass die am Werkstück extrahierte Gasmenge die Elektroden der Sonde erreicht und sich ein Gleichgewicht des zu analysierenden Sauerstoffgehaltes im Messgasvolumenstrom eingestellt hat. Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Messmethode haben gezeigt, dass diese Haltezeit mindestens 10 Sekunden betragen sollte, da der Messwert andernfalls verfälscht wird. Für die Führung des Messgases wurden diffusionsdichte Swagelok®-Verschraubungen sowie Edelstahlrohre verwendet. Untersuchungen zur Auslegung dieser Gasführung zeigten, dass von der



Verwendung von Kunststoffschläuchen im Messkreislauf abzusehen ist, da es auf Grund des durch die Pumpe verursachten Unterdruckes zu Kontaminationen des Messgases mit Umgebungsluft kommen kann.

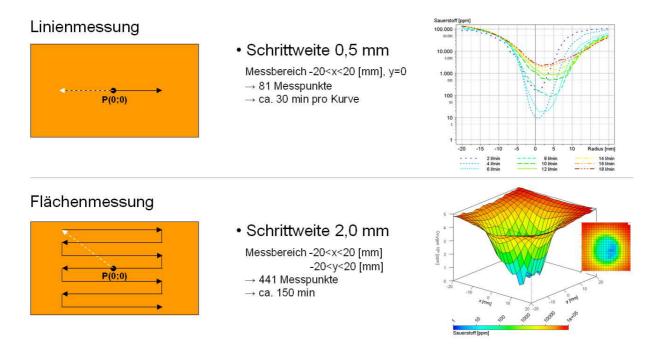


Abbildung 5.13: Programmablauf und Ergebnisdarstellung der Linien- und Flächenmessung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Brennersysteme für Schweißprozesse mit abschmelzender Elektrode untersucht. Für die Analyse dieser Brenner ist daher eine Anpassung notwendig um das Verstopfen der Messbohrungen durch den im Lichtbogen abschmelzenden Zusatzwerkstoff zu vermeiden. Daher werden kurze Wolframstifte mit einem Durchmesser von 1,6 mm in die Stromkontaktrohre eingepresst. Diese Wolframstifte sind an der Spitze abgerundet und können am DC-Minuspol mit bis zu 150 A belastet werden. Die Sauerstoffmessung wird derzeit ausschließlich mit Argon durchgeführt und kann je nach Brenner auch bei hohen Stromstärken von bis zu 400 A angewendet werden. Es gilt aber zu beachten, dass in vielen Schweißbrennern Kunststoffteile verarbeitet werden, die bei Erwärmung zur Bildung von Kohlenwasserstoffen neigen. Diese Kohlenwasserstoffe reagieren mit dem freien Sauerstoff, so dass dieser besonders im Zentrum des Lichtbogens reduziert wird.



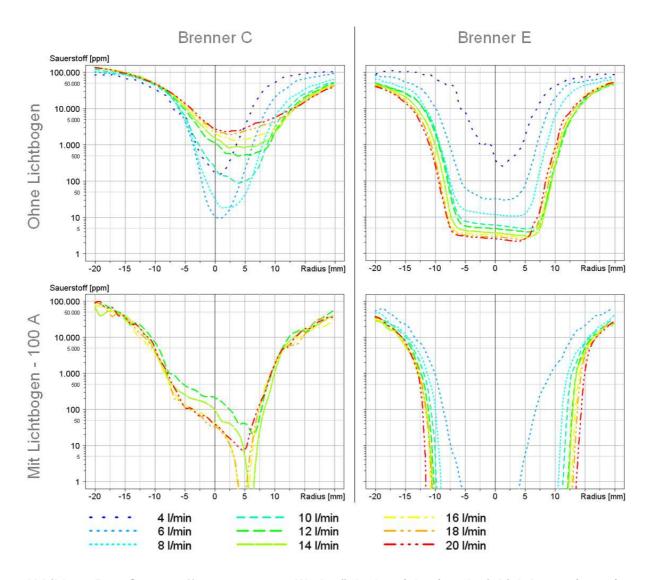


Abbildung 5.14: Sauerstoffmessungen am Werkstück ohne (oben) und mit Lichtbogen (unten)

In Abbildung 5.14 sind Messkurven ohne und mit Lichtbogen für zwei MSG-Schweißbrenner mit eingepresster Wolframelektrode gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Gasabdeckung von Brenner C gegenüber Brenner E ohne Lichtbogen deutlich schlechter ausgebildet ist. Aufgrund dieser Charakteristik sind Messungen mit Lichtbogen an Brenner C erst ab 12 l/min möglich, da bei kleineren Gasmengen die Oberfläche der Kupferplatte auf Grund der schlechten Schutzgasabdeckung verzundert und die Messbohrung zerstört wird. Für Brenner E sind Messungen mit Lichtbogen bereits ab 6 l/min möglich. Es kann daher zum Einen abgeleitet werden, dass hohe Sauerstoffkonzentrationen im Schutzgasfreistrahl ohne Lichtbogen auch zu schlechten Gasabdeckungen mit Lichtbogen führen. Zum anderen wird an den Messergebnissen von Brenner C deutlich, dass die



Gasmengen, die die beste Schutzgasabdeckung ohne Lichtbogen bewirken (ca. 6mit Lichtbogen ausreichen. Messungen nicht Obwohl Sauerstoffkonzentrationen im Schutzgasfreistrahl ohne Lichtbogen bei 12 l/min zwar größer sind als bei 6-8 l/min, ist die Qualität der Gasabdeckung mit Lichtbogen hochwertiger. Dies führt zu der Annahme, dass der Lichtbogen durch seine Wechselwirkung mit der Gasströmung ungleichmäßige und turbulente Strömungsstrukturen zu einem bestimmten Grad beruhigt aber diese Eigenschaft in Wechselwirkung mit einer dafür minimal benötigten Gasmenge steht. Im Allgemeinen korrelieren die Untersuchungen ohne und mit Lichtbogen jedoch sehr gut, so dass zur grundlegenden Bewertung von Brennersystemen im Rahmen des Projektes vorwiegend Untersuchungen ohne Lichtbogen durchgeführt werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse nachzuweisen bzw. um Unterschiede zwischen Einstellparametern oder Brennern beurteilen zu können, wurden in regelmäßigen Abständen Referenzmessungen an einem Beispielprozess (Brenner B, 10 l/min, Schutzgasfreistrahl ohne Lichtbogen) durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit der Messmethode kann als sehr gut eingeschätzt werden.



# 6 Untersuchungsumfang und Versuchsdurchführung

## 6.1 Schweißbrennersysteme

Im Rahmen des Projektes wurden sieben aktuelle Brennersysteme für die Untersuchungen genutzt und miteinander verglichen. Die Brenner wurden im Wesentlichen im Bezug auf den Brennertyp (Hand- oder Roboterschweißbrenner), die Art der Kühlung (G - gasgekühlt oder W - wassergekühlt) und die jeweilige Baugröße (Gasdüsendurchmesser) ausgewählt, so dass eine möglichst große Bandbreite kommerziell verfügbarer Brennersysteme betrachtet werden konnte.

Tabelle 6.1: Übersicht über die im Projekt verwendeten Schweißbrenner

Bezeichnung	Тур	Kühlung	Draht		Einschaltdauer						Standard- bestückung	
eic F					M21			C1				
eze			von	bis	100	60	40	100	60	40	SD	GV
<u> </u>			[mm]	[mm]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[mm]	[mm]
Brenner A	Hand	G	0,8	1,2	150	200	250	190	240	300	13	6x1,8
Brenner B	Hand	G	0,8	1,2		220			250		13	8x1,5
Brenner C	Hand	G	0,8	1,0		200			250		13	6x1,5
Brenner D	Hand	W	0,8	1,6	500			650			17	12x2,0
Brenner E	Hand	G	0,8	1,2		290			320		16	6x2,9
Brenner F	Rob	G	0,8	1,4	250			300			14	6x2,4
Brenner G	Rob	W	0,8	1,2	290	_					13	6x2,0



### 6.2 Durchführung von Schweißversuchen

Die Versuche wurden mit dem Schweißgerät EWM Phoenix 521 Expert Puls force arc + Expert Drive durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Inverter-DC-Schweißgerät zum MIG/MAG- Standard-, WIG-Liftarc- und E-Hand-Schweißen. Die Stromquelle verfügt über ein internes Kühlaggregat, sodass auch wassergekühlte Brenner betrieben werden können. Die Realisierung einer konstanten Schweißgeschwindigkeit erfolgte durch eine Linearachse. Dabei wurde der Brenner über das auf einer wassergekühlten Kupferplatte gespannte Werkstück verfahren.

Es wurden Schweißversuche an Aluminium und CrNi-Stählen durchgeführt. Die verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffe sind in Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 angegeben. Die jeweiligen Schweißparameter können Tabelle 6.4 entnommen werden. Eine Versuchsübersicht ist in Anlage 4 enthalten.

Tabelle 6.2: Grund- und Zusatzwerkstoff für Schweißversuche an Aluminium

Bezeio	Schmelzenanalyse [% Massenanteil]										
Werl	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti			
Grundwerkstoff											
AlMg3Mn	3.3537	<0,25	<0,4	<0,1	0,50- 1,00	2,40 - 3,00	0,05 - 0,20	<0,25	<0,2		
Zusatzwerkstoff											
SG-AISi5	5,0	<0,4	ı	<0,05	-	-	<0,1	-			

Tabelle 6.3: Grund- und Zusatzwerkstoff für Schweißversuche an CrNi

Bezeio	Schmelzenanalyse [% Massenanteil]										
Werl	Werkstoff		Si ≤	Mn ≤	P≤	S≤	Cr≤	Mo ≤	Ni≤	N≤	
Grundwerkstoff											
X5CrNi18-10	1.4301	0,07	1,0	2,0	0,045	0,015	17,0 - 19,5	-	8,0 - 10,5	0,11	
Zusatzwerkstoff											
SG X2CrNi199	0,02	0,8	1,7	-	-	20	-	10	-		



Tabelle 6.4: Parameter für die durchgeführten Schweißversuche

Werkstoff	Licht- bogen	Schutzgas	V <sub>D</sub> [m/min]	I <sub>s</sub>	U <sub>s</sub> [V]	Kontaktrohr- abstand [mm]	Schweißge- schwindigkeit [m/min]
Aluminium	KLB	Ar 4.6	5,6	85	18,7	15	0,3
Aluminium	ILB	Ar 4.6	5,6	120	18,7	15	0,3
CrNi	KLB	97,5 % Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub>	4	134	20,7	15	0,25
CrNi	ILB	97,5 % Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub>	5,6	161	22,8	15	0,25
CrNi	SLB	97,5 % Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub>	7,8	230	30	15	0,4



# 7 Strömungstechnische Untersuchung von Brennersystemen

#### 7.1 Brennerinterne Prozessgasführung

#### 7.1.1 Entstehung turbulenter Strömungsstrukturen

Der Aufbau von MSG-Schweißbrennern wird im Wesentlichen mit dem Ziel ausgelegt, dass eine möglichst gleichmäßige und laminare Schutzgasströmung und damit eine qualitativ hochwertige Gasabdeckung entstehen. Es konnte sowohl durch Schlierenaufnahmen als auch durch Sauerstoffmessungen nachgewiesen werden, dass verschiedene Brennersysteme bei gleicher Gasmenge und gleichem Gasdüsendurchmesser zu unterschiedlichem Turbulenzverhalten und ungleichen Kontaminationen durch Umgebungsluft führen. Der Vergleich von Brenner B und C in Schlierenuntersuchungen zeigt, dass der Übergang von einem weitgehend laminaren Schutzgasfreistrahl zu einem turbulenten Strömungsverhalten trotz gleichen Gasdüsendurchmessers bei unterschiedlichen Gasmengen erfolgt. Während der Bereich unter der Gasdüse bei Brenner B auch bei 12-16 l/min Schutzgas noch weitgehend ruhig ist, sind bei Brenner C bereits bei etwa 8 l/min turbulente Strömungseigenschaften zu erkennen, vgl. Abbildung 7.1.

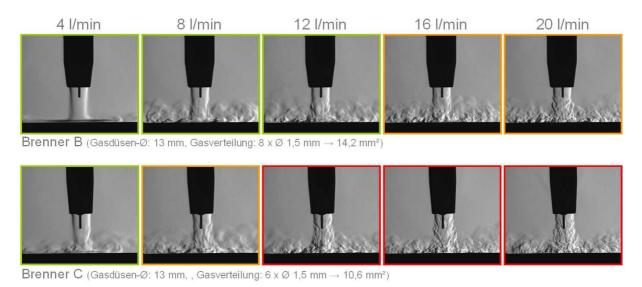


Abbildung 7.1: Schlierenaufnahmen am Schutzgasfreistrahl (100% CO<sub>2</sub>) der Brenner B und C bei verschiedenen Schutzgasmengen



Diese Turbulenzen führen zu einer verstärkten Kontamination der Schutzgasabdeckung. Dies konnte durch die Messung der Sauerstoffkonzentration im
Schutzgasfreistrahl nachgewiesen werden, Abbildung 7.2. Die Gasabdeckung von
Brenner C ist über den kompletten Gasmengenbereich sehr schmal ausgeprägt.
Turbulente Strömungseffekte führen vor allem in den Randbereichen des Freistrahls
zur verstärkten Einwirbelung von Umgebungsluft. Im Gegensatz dazu ist die
Gasabdeckung von Brenner B sehr gleichmäßig und wesentlich breiter ausgebildet.
Eine Verschlechterung der Gasabdeckung, konnte auch bei hohen Gasmengen nicht
festgestellt werden.

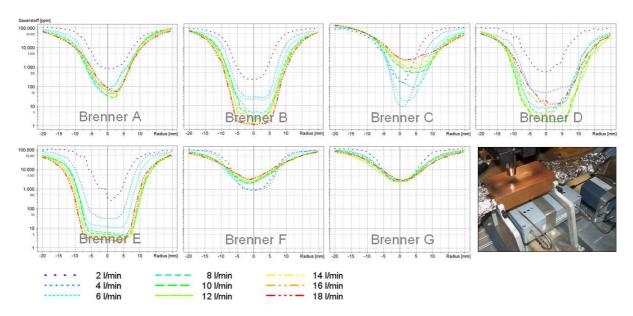


Abbildung 7.2: Untersuchung der Schweißbrenner durch Messungen der O<sub>2</sub>-Konzentration am Schutzgasfreistrahl

Die diagnostisch nachgewiesene Vermischung von Schutzgas und Umgebungsluft wird auch durch die Auswertung von Schweißversuchen bestätigt. In Abbildung 7.3 sind neben und zum Teil auch auf der Naht, der mit Brenner C geschweißten Aluminiumprobe, deutliche Schmauchablagerungen zu sehen.





Brenner B - Impulslichtbogen 120 A - 20 I/min



Brenner C - Impulslichtbogen 120 A - 20 I/min

Abbildung 7.3: Schweißergebnis beim Impulsschweißen mit Brenner B und C

Bereits aus dem experimentellen Vergleich der verschiedenen Brennersysteme können erste Gestaltungsempfehlungen abgeleitet werden. Besonders Brenner mit kleinen Strömungsquerschnitten, kurze Roboterbrenner oder Brenner mit zurückstehenden bzw. nicht konzentrisch zum Stromkontaktrohr angeordneten Gasdüsen zeigten in Sauerstoffmessungen eine starke Verunreinigung im Schutzgasfreistrahl.



Abbildung 7.4: Allgemeine Empfehlungen für die Gestaltung von MSG-Schweißbrennern

In Abbildung 7.2 wird deutlich, dass es bei vielen Schweißbrennern eine kritische Schutzgasmenge gibt, die bei Überschreitung zu einer deutlichen Verschlechterung der Schutzgasabdeckung führt. Die Ursachen für diese Effekte sind mit der Entstehung ungleichmäßiger und turbulenter Strömungsprofile zu begründen. Um die Strömung in Schweißbrennern zu verbessern ist es daher nötig, zum einen die



Entstehung dieser ungünstigen Strömungseffekte einzuschränken und zum anderen eine ausreichende Laminarisierung der Schutzgasströmung zu gewährleisten.

Die Laminarisierung einer turbulenten Strömung erfolgt über die Zeit, in der immer werdende Wirbel abgebaut werden können. In der Folge Strömungsräume nach dem Gasverteiler, d.h. zwischen Düsenstock Schutzgasdüse, in Schweißbrennern möglichst groß, behindernde ohne Geometrieelemente und über den Brennerumfang gleich auszulegen. Dabei ist es von wesentlicher Bedeutung, dass das Stromkontaktrohr auch nach mehreren Schweißzyklen und entsprechender thermischer Belastung des Brennersystems noch konzentrisch zur Schutzgasdüse ausgerichtet ist.

Bisherige Brennerkonzepte realisieren die Anströmung des Gasverteilers im oberen Brennerbereich mit Hilfe einzelner Nuten oder Bohrungen. Die Aufgabe des Gasverteilers ist die gleichmäßige Verteilung dieser ungleichmäßigen Strömung über den Umfang der Schutzgasdüse. Hierzu wird der Druck innerhalb des Gasverteilers gegenüber dem Druck im Außenbereich angehoben. Dies wird durch einen geringen Querschnitt der Bohrungen im Verteiler realisiert.

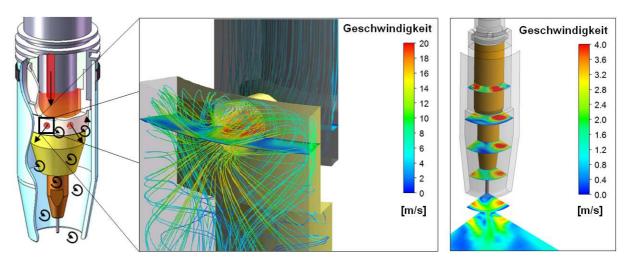


Abbildung 7.5: Strömung an einer Bohrung des Gasverteilers, links und Geschwindigkeitsunterschiede bis zum Werkstück, rechts (Brenner B, 90°-Modell mit Gasverteilung, Freistrahlströmung ohne Lichtbogen, Argon 18 l/min)

Um die Strömungseffekte am Gasverteiler zu visualisieren wurde die numerische Strömungssimulation angewendet. Wie in Abbildung 7.5 links dargestellt, entstehen auf Grund der durch den Gasverteiler bewirkten Druckdifferenz bzw, aufgrund des



geringen Strömungsquerschnitts hohe Strömungsgeschwindigkeiten in den Bohrungen des Gasverteilers. Diese Geschwindigkeiten können je nach Brennertyp und Gasmenge bis zu 80 m/s betragen. Simulationsrechnungen visualisieren weiterhin, inwieweit ungleichmäßige Strömungsprofile und Turbulenzen durch den Brenner zum Werkstück befördert werden und dort die Schutzgasabdeckung beeinträchtigen, vgl. Abbildung 7.5 rechts.

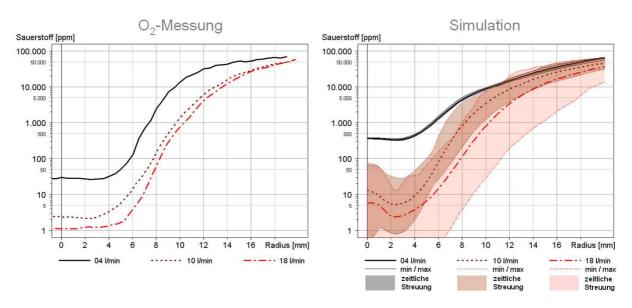


Abbildung 7.6: Messung und Simulation der Sauerstoffkonzentration am Werkstück in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90°-Mod ell mit Gasverteilung, Freistrahlströmung ohne Lichtbogen)

In Abbildung 7.6 sind die gemessenen und die durch das Modell berechneten Sauerstoffkonzentrationen am Werkstück in Abhängigkeit der Schutzgasmenge dargestellt. Zunächst ist auf die gute Korrelation von Messung und Simulation hinzuweisen. Sowohl Experiment als auch Simulation verdeutlichen, dass sich die Qualität der Gasabdeckung mit steigenden Gasmengen im Mittel verbessert. Die Strömung bildet sich sehr gleichmäßig aus und die Bildung von Turbulenzen ist gering. Mit steigender Schutzgasmenge nimmt das transiente Verhalten Wirbelfelder Turbulenzen und bestimmen in zunehmendem Maße Strömungscharakteristik, was durch die farblich gekennzeichneten Bereiche in den Ergebnissen der Simulation deutlich wird.



Um die Ursache für das transiente Verhalten bei hohen Gasmengen zu verstehen, muss die Gasströmung im Brenner analysiert werden, vgl. Abbildung 7.7. Es wird deutlich, dass hohe Schutzgasmengen zu einer zunehmend ungleichmäßigen Strömung im Brenner führen sowie einen erhöhten Turbulenzgrad erzeugen. Diese Effekte setzen sich bis zum Werkstück fort und bewirken dort eine unruhige Strömung, die nicht zur Ausbildung einer stabilen, gleichbleibenden Schutzgasabdeckung führt.

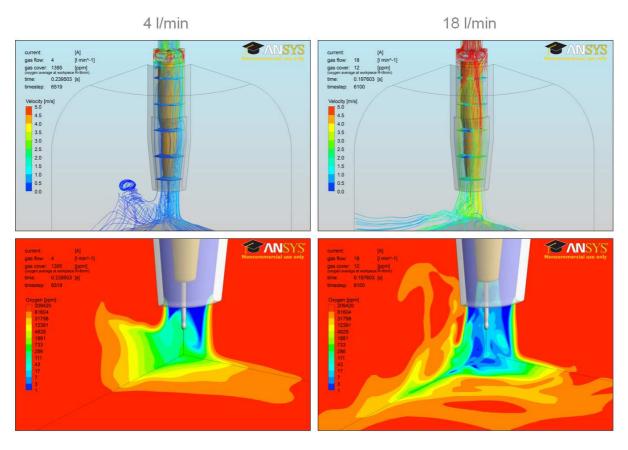


Abbildung 7.7: Simulation der Gasströmung im Brenner und der Schutzgasabdeckung am Werkstück in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90°-Modell mit Gasverteilung, Freistrahlströmung ohne Lichtbogen)

Messung und Simulation zeigen jedoch, dass die Strömungsgeometrie von Brenner B geeignet ist, auch hohe Schutzgasvolumenströme noch relativ gleichmäßig zu verteilen und Turbulenzen bis zum Werkstück so weit abzubauen, dass trotz des zeitbestimmten Verhaltens eine im Mittel hochwertige Gasabdeckung im Freistrahl realisiert werden kann. Maßgebend für diese Fähigkeit des Brenners ist die Geometrie der brennerinternen Strömungsräume und damit die in Abbildung 7.4



gegebenen Hinweise für die Brennerkonstruktion. Wird die Strömung zu ungleichmäßig über den Brennerumfang verteilt oder sind die Strömungsquerschnitte zu klein wird ein kritischer Turbulenzgrad überschritten was zu einer Verschlechterung der Schutzgasabdeckung mit steigenden Gasmengen führt. Dies ist in Abbildung 7.2 für die Brenner A, C, D und F festzustellen.

Durch Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück, vgl. Abbildung 7.8 und Auswertung von Simulationen, vgl. Anlage 4 konnte nachgewiesen werden, dass die Geometrie des Gasverteilers einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung von Schutzgasströmung und Gasabdeckung am Werkstück hat.

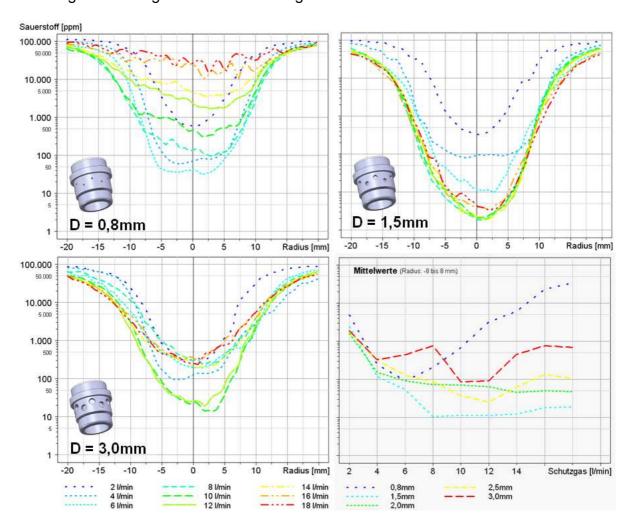


Abbildung 7.8: Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück in Abhängigkeit der Bohrungsgrößen am Gasverteiler und verschiedenen Gasmengen (Brenner D)

In Abhängigkeit der Brennergeometrie gibt es geeignete Durchmesser der Bohrungen im Gasverteiler, welche die Entstehung von Turbulenzen,



ungleichmäßiger Strömungsprofile und damit auch die Beeinträchtigung der Schutzgasabdeckung am Werkstück minimieren. Die Bohrungen sollten dabei groß genug sein um zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten und damit das Entstehen großer Turbulenzgrade zu vermeiden. Gleichzeitig müssen diese Durchmesser klein genug sein um eine Druckerhöhung oberhalb des Gasverteilers zu realisieren und damit die gleichmäßige Verteilung des Schutzgases über den Brennerumfang zu gewährleisten. Eine konkrete Angabe für eine optimale Bohrungsanzahl und -größe in Abhängigkeit der Gasmenge konnte nicht erarbeitet werden, da dies auf Grund der Brennerkonstruktion von Brenner zu Brenner variiert. Es lässt sich aber verallgemeinern, dass je gleichmäßiger der Gasverteiler angeströmt wird, die Bohrungen im Gasverteiler demnach umso größer ausgelegt werden können und die Kontamination des Schutzgases auf Grund turbulenter Strömungseffekte infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten umso geringer sind. Je besser die Verteilung des Schutzgases im Brenner erfolgt und je gleichmäßiger die Strömung aus dem Gasverteiler austritt umso weniger Zeit muss dem Gas zur Verfügung gestellt werden um sich zu laminarisieren und turbulente Strömungsstrukturen abzubauen. Für die Brennerkonstruktion heißt das, dass eine hochwertige Gasverteilung die Bedingung für die Konstruktion kurzer Brenner und damit eine gute Zugänglichkeit ist.

Gerade für Schweißaufgaben an empfindlichen Werkstoffen ist auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen zu diskutieren, ob durch das Einstellen unterschiedlicher Gasmengen infolge verschiedener Stromstärken Brennerhersteller eine Variation des Gasverteilers empfohlen werden kann. So könnten die Bohrungen im Verteiler beispielsweise für geringe Stromstärken und niedrigere Gasmengen kleiner ausgelegt werden um eine verbesserte Verteilung des Gases über den Brennerumfang zu realisieren. Der Effekt Geschwindigkeitserhöhung durch die Verkleinerung der Bohrungen tritt bei geringen Gasmengen nicht so stark in den Vordergrund. Für hohe Stromstärken und hohe Gasmengen sind die Bohrungen im Verteiler dagegen zu vergrößern, so dass zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten in den Bohrungen und die daraus resultierenden Turbulenzen vermieden werden. Durch das Angebot mehrerer Gasverteiler für einen Brenner könnte so ein Optimum aus gleichmäßiger Gasverteilung und Reduzierung von Turbulenzen erreicht werden.



#### 7.1.2 Erarbeitung alternativer Gasverteilungskonzepte

In Kapitel 7.1.1 wurde bereits erläutert inwiefern ungleichmäßige Strömungen bzw. hohe Turbulenzgrade auf Grund hoher Strömungsgeschwindigkeiten in den Bohrungen des Gasverteilers die Qualität der Gasabdeckung am Werkstück reduzieren können. Gerade für kurze Brenner mit guter Zugänglichkeit oder wassergekühlte Systeme mit begrenztem Bauraum im oberen Brennerbereich wurden daher Möglichkeiten entwickelt die Gasströmung bereits oberhalb des Gasverteilers gleichmäßig über den Brennerumfang zu verteilen, Abbildung 7.9.

Die erste Variante realisiert das Abbauen hoher Strömungsgeschwindigkeiten durch gleichmäßig über den Brennerumfang verteilte Entspannungsnuten oberhalb des herkömmlichen Gasverteilers. Dem Gas wird durch die Vergrößerung des Strömungsquerschnittes die Zeit gegeben, die für das Abbauen von Turbulenzen notwendig ist. Aus fertigungstechnischer Sicht ist die Umsetzung Entspannungsnuten allerdings mit hohem Aufwand verbunden und kann infolge von konstruktiven Restriktionen nicht bei allen Brennersystemen angewendet werden. In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde daher beschlossen dieses Konstruktionsprinzip im Rahmen des Projektes nicht weiter zu verfolgen.

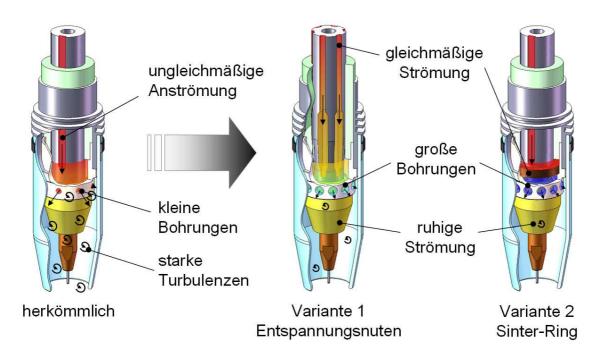


Abbildung 7.9: Konstruktionsvarianten zur Realisierung der gleichmäßigen Gasverteilung im oberen Brennerbereich



Die in Abbildung 7.9 als Variante 2 beschriebene Verwendung von porösen Materialien, z. B. von metallischen Schäumen oder Sinterwerkstoffen, fertigungstechnisch einfacher und universeller zu realisieren. Der Druck wird dabei in einer ausreichend groß dimensionierten Ringnut oberhalb des Sintereinsatzes aufgebaut und die Strömung gleichmäßig über den Umfang verteilt. Die Anströmung sehr ungleichmäßig dieser Ringnut kann dabei und Strömungsquerschnitten erfolgen, so dass die Anwendung des Konstruktionsprinzips auch für kurze, wassergekühlte Brenner von Vorteil ist. Der durch den porösen Werkstoff aufgebaute Druck ist relativ hoch und das Schutzgas tritt ohne große Geschwindigkeitsgradienten aus dem Sintermaterial aus. Die Bohrungen im Gasverteiler können demnach wesentlich größer oder in größerer Anzahl dimensioniert werden. Da die Gasverteilung jetzt bereits oberhalb des eigentlichen Gasverteilers erfolgt, ist die Aufgabe des herkömmlichen Gasverteilers nun vielmehr die eines Spritzerschutzes. Im Rahmen des Projektes wurde ein Demonstrator aufgebaut, der die Gasverteilung durch den Einsatz eines metallischen Schaumes realisierte. Messergebnisse an diesem Demonstrator belegen das Potential eines geschäumten Materials zur Strömungslaminarisierung an MSG-Schweißbrennern.

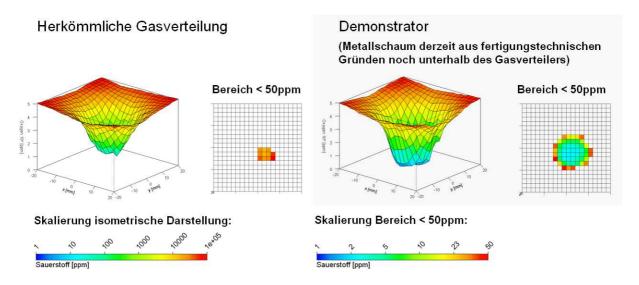


Abbildung 7.10: Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück an einem Beispielbrenner mit herkömmlichem Gasverteiler und nach Integration eines Metallschaums (Demonstrator auf Grundlage von Brenner D, 18 I/min Argon)



#### 7.2 Interaktion von Prozess und Schutzgasfreistrahl

#### 7.2.1 Grundlegende Strömungscharakteristik

Um die Ausbildung der Schutzgasströmung und der daraus resultierenden Gasabdeckung am Werkstück analysieren zu können, ist es notwendig die Wechselwirkung von Prozess und Gasströmung zu kennen und in den Schlussfolgerungen zu berücksichtigen. Durch PIV-Aufnahmen wird deutlich, dass sich im Schutzgasfreistrahl ohne Lichtbogen ein relativ großes Totwassergebiet unter dem Stromkontaktrohr ausbildet, vgl. Abbildung 7.11, links. Dieses Totwassergebiet wird auch durch die in der Sauerstoffmessung sichtbaren Bereiche niedriger Sauerstoffkonzentrationen gekennzeichnet, vgl. Abbildung 7.11 rechts. Bei Untersuchungen am realen Schweißprozess konnte dieses Totwassergebiet sowohl mit den diagnostischen Methoden als auch in der Simulation nicht mehr nachgewiesen werden, so dass geschlussfolgert werden kann, dass sich die Strömungsverhältnisse am Werkstück durch Wechselwirkungen mit dem Lichtbogen grundlegend ändern.

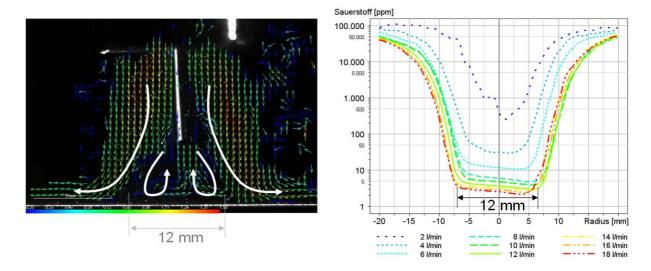


Abbildung 7.11: PIV-Aufnahme bei 18 l/min Argon ohne Lichtbogen, links und Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück, rechts (Brenner E)

Um diese Wechselwirkungen zwischen der Prozessgasströmung und dem Lichtbogen zu verstehen wurde das in Kapitel 5.1.1 beschriebene MHD-Modell angewendet um die Strömungseffekte zu visualisieren. Die Simulationsergebnisse



zeigen in Übereinstimmung mit den Messungen, dass sich ohne Lichtbogen unter dem Stromkontaktrohr ein relativ großes Totwassergebiet entwickelt, vgl. Abbildung 7.12 links. Kontaminationen mit Atmosphärengasen werden in diesem Totwassergebiet zum Teil sehr lange erhalten.

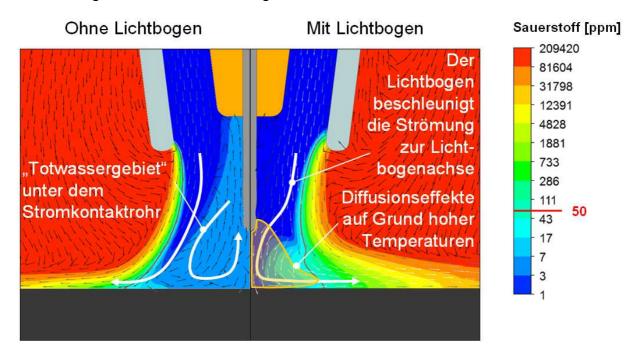


Abbildung 7.12: Schutzgasströmung am Werkstück ohne (links) und mit Lichtbogen (rechts) (6°-Modell, 200A, 10 l/min Argon)

Unter Berücksichtigung des Lichtbogens ändert sich das Strömungsfeld grundlegend, vgl. Abbildung 7.12, rechts. So wird durch die Widerstandserwärmung im Lichtbogen das Schutzgas erwärmt. Durch die Lorentzkraft wird das Gas zur Lichtbogenachse hin beschleunigt und erreicht Geschwindigkeiten von mehreren hundert Metern je Sekunde. Auf Grund der Druck- und Dichteverhältnisse im Plasma handelt es sich jedoch nicht um Überschallströmungen. Das ohne Lichtbogen nachgewiesene Totwassergebiet wird stark verkleinert und beschränkt sich auf einen sehr kleinen Bereich unter dem Stromkontaktrohr. In Abbildung 7.12, rechts ist besonders im unteren Lichtbogenbereich eine hohe Kontamination des Schutzgases zu erkennen, welche nicht durch die Strömung, sondern durch Diffusionseffekte verursacht wird. Diese Diffusionsprozesse sind im heißen Bereich des Lichtbogens um ein Vielfaches größer als bei Raumtemperatur. Die Verwendung der in Kapitel



5.1.1 beschriebenen temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten ist daher für die Betrachtung der Vermischung von entscheidendem Einfluss, vgl. Anlage 1.

Da die Gasströmung sehr stark durch den Prozess beeinflusst wird, wurde die Ausbildung der Schutzgasabdeckung in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für verschiedene Schutzgasmengen untersucht, Abbildung 7.13. Die Simulationsergebnisse aller Variationen von Gasmenge und Stromstärke sind in Anlage 6 dargestellt. Im Allgemeinen ist immer derselbe Effekt sichtbar. Mit zunehmender Stromstärke wird das Gas auf Grund der höheren Lorentzkräfte stärker zu Lichtbogenachse beschleunigt und die Qualität der Gasabdeckung wird vor allem bei kleineren Schutzgasmengen in den Randbereichen reduziert. Dies ist auch auf verstärkte Diffusionseffekte in Folge höherer Gastemperaturen zurückzuführen. Beeinträchtigungen der Gasabdeckung durch hohe Stromstärken sind daher in der Praxis mit höheren Schutzgasvolumenströmen zu kompensieren. Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen damit die allgemeinen Empfehlungen aus dem Stand der Technik, vgl. Kapitel 3.1, Abbildung 3.1.

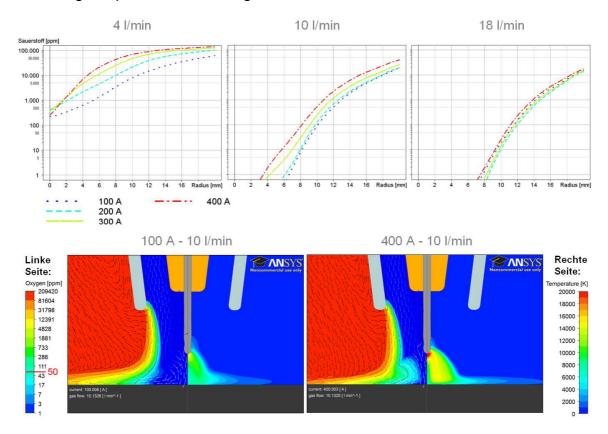


Abbildung 7.13: Beeinflussung der Schutzgasabdeckung durch die Variation der Stromstärke bei verschiedenen Gasmengen (6°-Modell)



Weiterhin wurde festgestellt, dass das zeitbestimmte, ungleichmäßige und turbulente Strömungsverhalten im Schutzgasfreistrahl, welches wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben Strömungsgeometrie im Schweißbrenner entsteht, Wechselwirkungen mit dem Lichtbogen gleichmäßiger wird und sich ein stationäres Strömungsverhalten einstellt. Auch durch ein LES-Turbulenzmodell konnten unter zeitbestimmten Berücksichtigung des Lichtbogens keine Strömungseffekte nachweisen werden, vgl. Abbildung 7.14. Die Ursache für diese Änderung im Strömungsverhalten kann auf Grundlage der modellbasierten Analysen mit der ansaugenden Wirkung des Lichtbogens und der temperaturbedingten Expansion der Gase abgeleitet werden, vgl. Abbildung 7.15. Der Lichtbogen stabilisiert damit die Strömungsablösung unter dem Stromkontaktrohr, so dass der Ausbildung von instationären Wirbelfeldern entgegengewirkt wird.

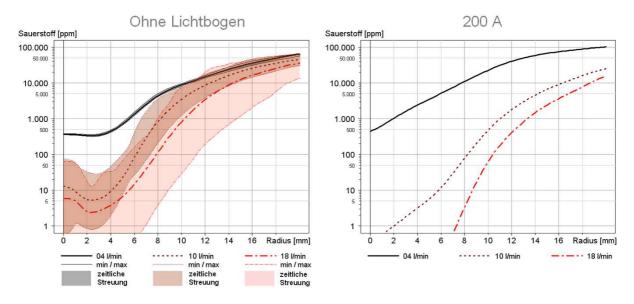


Abbildung 7.14: Simulation der Sauerstoffkonzentration am Werkstück für die Freistrahlströmung ohne Lichtbogen (links) und mit Lichtbogen (rechts) in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90°-Modell mit Gasvertei lung)

Durch die Simulation kann weiterhin gezeigt werden, dass auch durch die Umgebungsluft kontaminiertes Gas in die Lichtbogenachse und damit in den Prozessbereich beschleunigt wird, wenn dem Ansaugverhalten des Lichtbogens nicht mit einer ausreichend großen Schutzgasmenge entsprochen wird. Dieser Effekt ist in Abbildung 7.15, links für einen Schutzgasvolumenstrom von 4 l/min visualisiert. Es ist abzuleiten, dass Umgebungsluft nicht durch eine Injektorwirkung an der



Gasdüse bei hohen Gasmengen aus den Außenbereichen in die Schutzgasströmung eingesogen wird, sondern durch die Kräfte des Lichtbogens bei zu geringen Gasmengen in den Prozessbereich gelangt.

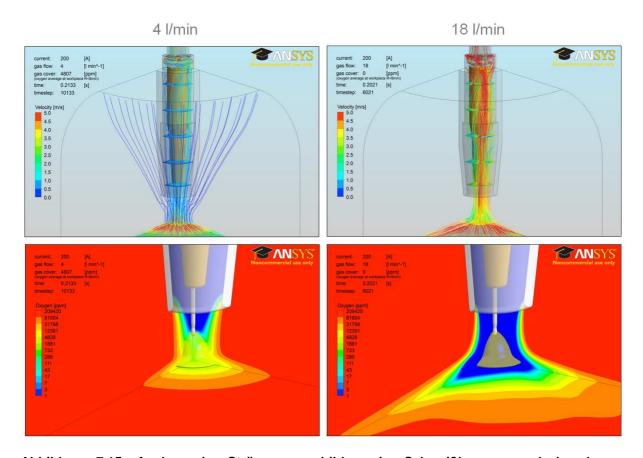


Abbildung 7.15: Analyse der Strömungsausbildung im Schweißbrenner und der daraus resultierenden Gasabdeckung am Werkstück bei Variation der Schutzgasmenge bei einer Stromstärke von 200 A (Brenner B, 90°-Modell mit Ga sverteilung)

Durch die in Diagnostik und Simulation durchgeführten Untersuchungen wird weiterhin visualisiert, dass die Schutzgasabdeckung während des Schweißprozesses keineswegs konstant bleibt, sondern Änderungen im Prozess folgt. Die Gasströmung wird durch Kurzschlüsse, den Werkstoffübergang oder parameterbedingte Änderungen im Stromverlauf entscheidend beeinflusst. Zeitbestimmte Berechnungen der Schutzgasabdeckung bei Impulsstromprozessen verdeutlichen, dass sowohl die Strömung als auch die Diffusion nicht nur von der mittleren Stromstärke sondern auch von der Stromstärke während des Pulses bestimmt werden. Das durch PIV bereits in Kapitel 5.2 beschriebene Strömungsverhalten kann durch die Anwendung des numerischen Modells bestätigt werden, Abbildung 7.16. Folglich können in



Zukunft für schutzgassensible Schweißaufgaben neue Pulsregime oder speziell an den Pulsprozess angepasste Schweißbrenner entwickelt werden. Im Projekt wurden exemplarisch verschiedene Pulsformen mit Hilfe der Simulation untersucht. Es konnten im ersten Schritt jedoch nur geringe Einflüsse auf die Qualität der Gasabdeckung am Werkstück festgestellt werden. Die durchgeführten Untersuchungen bzw. deren Ergebnisse sind in Anlage 7 aufgeführt.

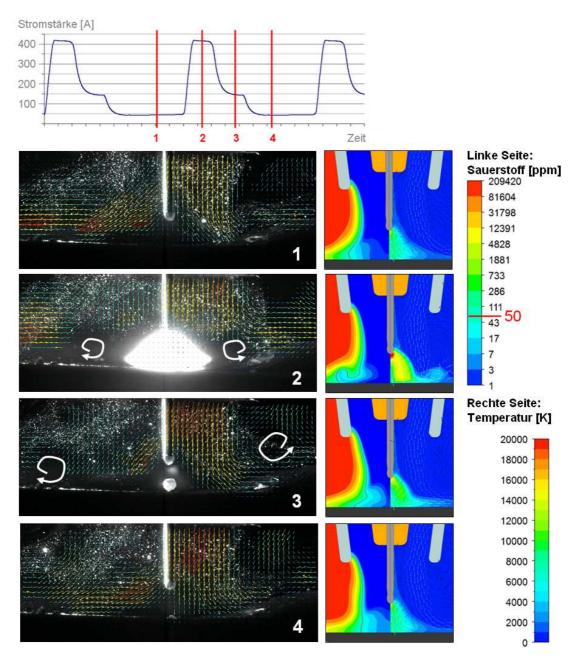


Abbildung 7.16: Beschreibung der Schutzgasströmung bzw. der Gasabdeckung am Werkstück durch PIV-Aufnahmen und durch die Simulation beim MSG-Impulsschweißen (6°-Modell)



#### 7.2.2 Erprobung gradierter Strömungsprofile

Aus den Wechselwirkungen zwischen Gasströmung und Prozess kann abgeleitet werden, dass die Anströmung des Lichtbogens, und demnach das Strömungsprofil zwischen Kontaktrohr und Gasdüse, einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der Schutzgasabdeckung hat. In der Simulation können solche Strömungsprofile als Randbedingung vorgegeben werden ohne das Strömungsprofil durch Geometrieänderungen des Brenners zu beeinflussen. Ziel ist es, den Lichtbogen durch verschiedene Strömungsprofile anzuströmen, die Strömungsausbildung zu visualisieren und die Auswirkung der Anströmung auf die Qualität der Gasabdeckung zu bewerten. Für die Untersuchungen wurden daher drei Strömungsprofile definiert und in Abhängigkeit verschiedener Gasmengen und Stromstärken mit Hilfe des numerischen Modells erprobt, vgl. Abbildung 7.17.

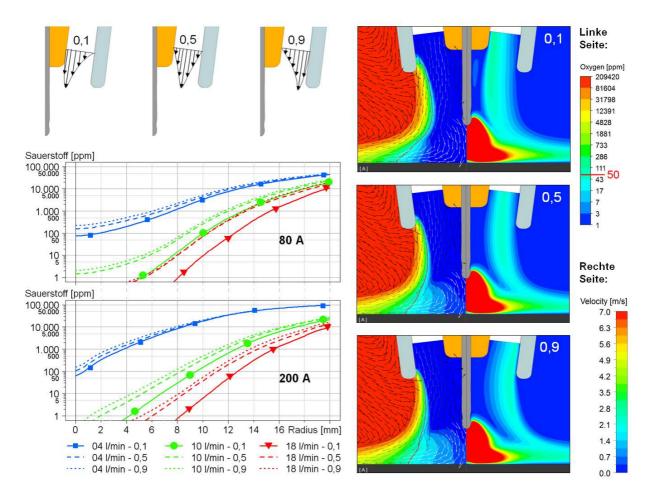


Abbildung 7.17: Simulation der O<sub>2</sub>-Konzentration am Werkstück bei Vorgabe verschiedener Geschwindigkeitsprofile, verschiedener Gasmengen und Stromstärken (6°-Modell)



Es kann gezeigt werden, dass durch eine langsame Randströmung und einer schnellen Kernströmung dem Ansaugverhalten des Lichtbogens am besten entsprochen werden kann. Hierfür konnte mit Hilfe des numerischen Modells nachgewiesen werden, dass dieses Strömungskonzept unabhängig von Gasmenge und Stromstärke zu einer verbesserten Schutzgasabdeckung führt.

#### 7.2.3 Einfluss von Gasdüsenform und -position

Die in der Simulation mit Hilfe von Randbedingungen vorgegebenen Strömungsprofile müssen in der Praxis durch die Geometrie von Düsenstock, Stromkontaktrohr und Schutzgasdüse realisiert werden. Um die Strömungsverhältnisse an in der Praxis gebräuchlichen Gasdüsen zu untersuchen, wurden die Geometrien herkömmlicher konischer Düsen unterschiedlichen Durchmessers sowie vier Sonderdüsen im Modell abgebildet, vgl. Anlage 2. Für alle Düsentypen wurden die Stromstärke sowie die Schutzgasmenge variiert.

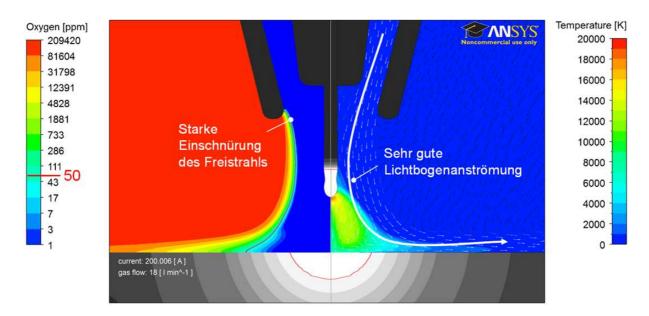


Abbildung 7.18: Simulation der Strömung und der Sauerstoffkonzentration am Werkstück bei Verwendung einer sehr schmalen Gasdüse (6°-Modell, Gasdüse 8 mm, 200 A, 18 l/min Argon)

Die durchgeführten Analysen bestätigen die zuvor grundlegend getroffenen Aussagen zur Lichtbogenanströmung, es wird jedoch deutlich, dass eine stark konisch geformte Düse den Lichtbogen zwar besser anströmt, aber gleichzeitig den



Gasschutz in den äußeren Bereichen auf Grund des geringeren Düsendurchmessers erheblich reduziert, vgl. Abbildung 7.18.

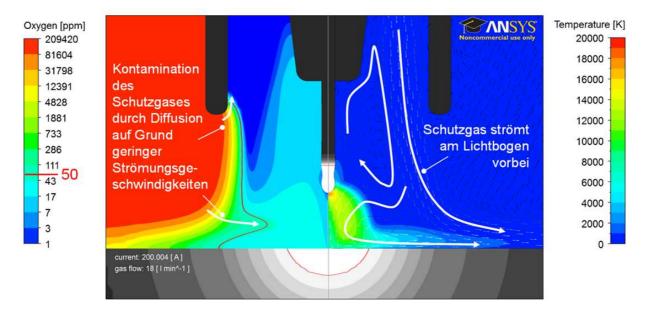


Abbildung 7.19: Simulation der Strömung und der Sauerstoffkonzentration am Werkstück bei Verwendung einer breiten Gasdüse (6°-Modell, Gasdüs e 18 mm, 200 A, 18 l/min Argon)

Im Allgemeinen erzielen breite Gasdüsen im Vergleich zu stark konischen Düsen breitere, hochwertigere Schutzgasabdeckung. Es wurde jedoch festgestellt, dass Schutzgasdüsen auch zu breit dimensioniert werden können, vgl. Abbildung 7.19 und Abbildung 7.20. Dies lässt sich auch durch erhöhte Gasvolumenströme nicht kompensieren. Das Schutzgas strömt am Lichtbogen vorbei, so dass sich unter dem Stromkontaktrohr große Wirbelfelder ausbilden. Das zum Teil kontaminierte Gas wird aus den Randbereichen in den Lichtbogenkern beschleunigt, so dass die gesamte Umgebung des Schweißprozesses kontaminiert wird, vgl. Abbildung 7.19. In Abbildung 7.20 ist die Abhängigkeit der Gasabdeckung vom Durchmesser der Gasdüse dargestellt. gerade für hohe Schutzgasvolumenströme ist eine Verschlechterung der Gasabdeckung durch eine Verbreiterung der Schutzgasdüse festzustellen. Dem Diagramm können prinzipielle Aussagen zum Einfluss von Gasmenge und Gasdüsendurchmesser auf die Breite der Gasabdeckung entnommen werden. Der auf der y-Achse aufgeführte Radius kennzeichnet dabei einen Bereich, bei dem die Konzentration von Sauerstoff in der Simulation kleiner 50 ppm ist.



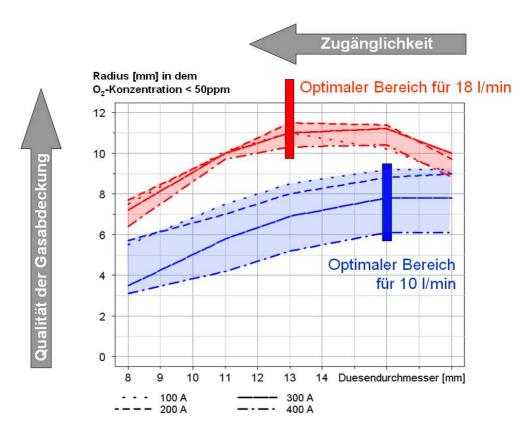


Abbildung 7.20: Einfluss des Gasdüsendurchmessers im Hinblick auf die Zugänglichkeit und die Qualität der Gasabdeckung (Simulation, 6°-Model I)

Für die Auswahl von Gasdüsen in der Fertigung können daher folgende Aussagen zusammengefasst werden:

Ist eine möglichst breite Schutzgasabdeckung erforderlich, kann um den Schweißbrenner mit schlanker Gasdüse eine weitere Gasdüse, ähnlich bekannten Schleppgasdüsen, verwendet werden. Die Lichtbogenanströmung und die äußere Schutzgasabdeckung können auf diese Weise getrennt voneinander realisiert werden, so dass durch die schnelle Kernströmung dem Ansaugverhalten des Lichtbogens entsprochen werden kann ohne den Freistrahl einzuschnüren.

Besteht aus Gründen der Zugänglichkeit das Interesse eine möglichst schlanke Gasdüse einzusetzen, sollte dies mit erhöhten Gasvolumenströmen kompensiert werden, vgl. Abbildung 7.20. Es ist aber darauf zu achten, dass für derartige Anwendungen ein Brenner ausgewählt wird, der durch die Gasverteilung und die brennerinterne Strömungsgeometrie eine möglichst gleichmäßige und laminare Schutzgasströmung auch bei hohen Gasmengen gewährleisten kann.



Neben der Schutzgasdüsenform beeinflusst der Abstand zwischen Gasdüse und Qualität der Schutzgasabdeckung. die Um den Einfluss Gasdüsenposition bei konstantem Brennerabstand zu untersuchen wurden drei Demonstratoren mit verschieden langen Gasdüsen angefertigt, welche diagnostisch und durch Schweißversuche untersucht sowie im Modell abgebildet wurden. Durch Anwendung des numerischen Modells, vgl. Abbildung 7.21 als auch durch Sauerstoffmessungen und Schweißversuche, vgl. Abbildung 7.22 nachgewiesen werden, dass die Vergrößerung des Abstandes zwischen Werkstück und Schutzgasdüse bei gleichbleibender Lichtbogenlänge zu einer Reduzierung der Schutzgasabdeckung führt. Dieser Effekt konnte für alle untersuchten Gasmengen und Schweißstromstärken nachgewiesen werden. Detaillierte Abbildungen aller simulationsgestützten Untersuchungen sind in Anlage 9 aufgeführt.

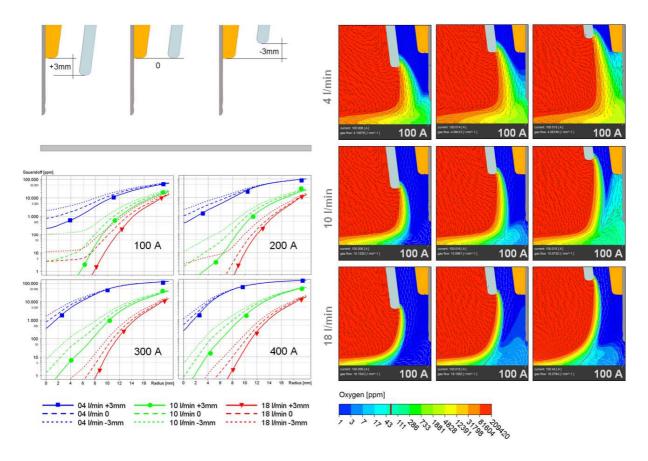


Abbildung 7.21: Einfluss der Schutzgasdüsenposition auf die Sauerstoffkonzentration am Werkstück in Abhängigkeit der Gasmenge und der Stromstärke (6°-Modell)



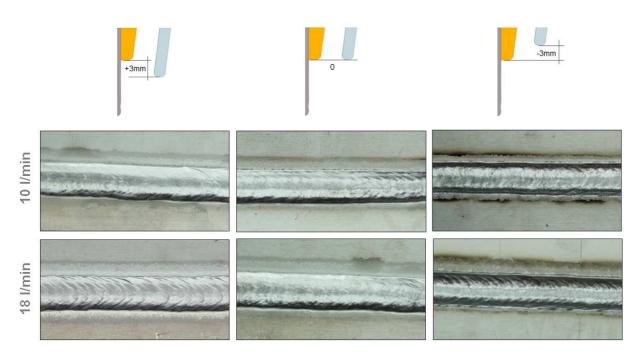


Abbildung 7.22: Einfluss der Schutzgasdüsenposition auf die Qualität der Nahtoberfläche beim Aluminiumschweißen (Impulsprozess, 120 A)

Für die Praxis ist demnach zu empfehlen, den Abstand zwischen Gasdüse und Werkstück so gering wie möglich zu halten. Kann dies auf Grund strahlungsintensiver Prozesse oder Zugänglichkeitsproblemen nicht gewährleistet werden, ist ein vergrößerter Abstand mit höheren Schutzgasmengen zu kompensieren.

#### 7.2.4 Einfluss der Brenner- bzw. der Schutzgastemperatur

Die Erwärmung des Schutzgases im Brenner ist je nach Brennersystem und Kühlkonzept verschieden. Auf Grund der Abhängigkeit von Diffusion und Gastemperatur, vgl. Anlage 1, ist zu erwarten, dass eine erhöhte Gastemperatur auch zu einer Verschlechterung der Gasabdeckung führt. Um diese Vermutung zu bestätigen, ist daher der grundlegende Einfluss der Gas- bzw. der Brennertemperatur auf die Ausbildung der Schutzgasabdeckung zu untersuchen und zu bewerten. Durch Messung der Temperatur von Schutzgasdüsen während des Schweißens ist bekannt, dass sich diese je nach Bauart und Einsatzbedingungen um mehrere hundert Kelvin erwärmen. Aus diesem Grund wurde die Abhängigkeit der



Gasabdeckung für Gasdüsentemperaturen von bis zu 650℃ untersucht. In den Untersuchungen konnte auch bei sehr heißen Gasdüsen keine signifikante Verschlechterung der Gasabdeckung festgestellt werden, vgl. Abbildung 7.23, links. Auch eine Erwärmung des einströmenden Schutzgases um bis zu 300 K zeigte nur einen geringen Einfluss auf die Schutzgasabdeckung, vgl. Abbildung 7.23, rechts.

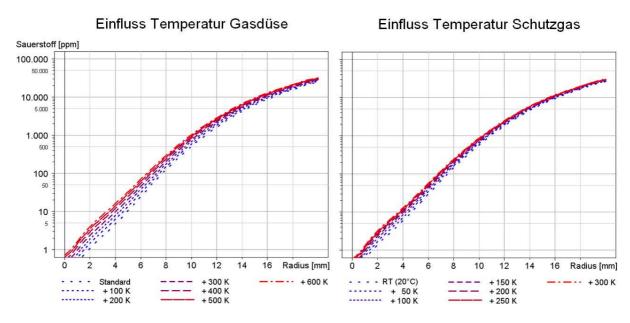


Abbildung 7.23: Simulation des Einflusses von Gasdüsen- (links) und Gastemperatur (rechts) auf die Qualität der Schutzgasabdeckung am Werkstück am Werkstück

Durch die simulationsgestützten Analysen konnte gezeigt werden, dass durch erhöhte Temperaturen zwar verstärkte Diffusionsprozesse auftreten, aber dass das erwärmte Gas gleichzeitig ein größeres Volumen einnimmt, was zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Brenner und am Austritt der Gasdüse führt. Die höheren Geschwindigkeiten wirken der Diffusion von Umgebungsluft in das Schutzgas entgegen und kompensieren diese. Im Allgemeinen können damit für den Einsatz gasgekühlter Systeme aus Sicht der Schutzgasströmung keine signifikant negativen Effekte festgestellt werden. Allerdings ist in der Konstruktion gasgekühlter Brenner im Hinblick auf Gasverteilung und Laminarisierung darauf zu achten, dass ein heißes Gas im Schweißbrenner eine teilweise um Faktor zwei bis drei erhöhte Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Die in Abbildung 7.4 gegebenen Hinweise für die Schweißbrennerkonstruktion sind demnach besonders für gasgekühlter Brennersysteme von besonderer Bedeutung.



#### 7.3 Fertigungsbedingte Beeinflussung der Gasabdeckung

#### 7.3.1 Einfluss des Brennerabstandes

In der schweißtechnischen Praxis wird bei Zugänglichkeitsproblemen oft nicht nur der Abstand zwischen Werkstück und Gasdüse, siehe Kapitel 7.2.3, sondern der Abstand des kompletten Brenners verändert. Es wird in den Lehrbüchern /15/ empfohlen, den Abstand zwischen Gasdüse und Werkstück mit maximal 80 % des inneren Gasdüsendurchmessers einzustellen, da es andernfalls zu einer Verschlechterung der Gasabdeckung kommt. Diese Aussage kann durch Schweißversuche nachvollzogen werden, die strömungstechnischen Ursachen sind jedoch unbekannt. Mit dem Ziel die Qualität der Gasabdeckung in Abhängigkeit des Brennerabstandes zu visualisieren wurden im Modell 3 Abstände abgebildet und bei verschiedenen Gasmengen und Stromstärken strömungstechnisch analysiert, vgl. Abbildung 7.24. Alle durchgeführten Untersuchungen sind in Anlage 10 dargestellt.

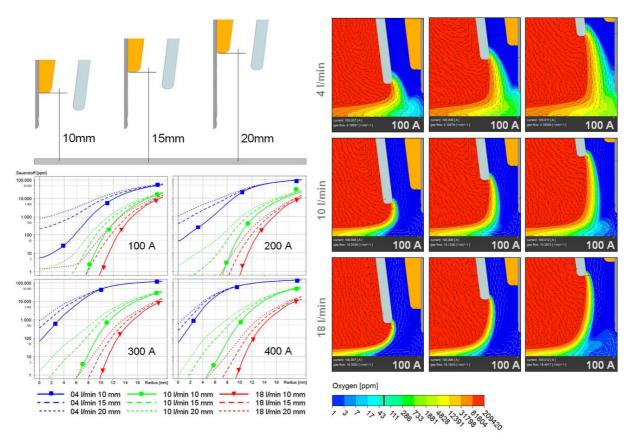


Abbildung 7.24: Einfluss des Brennerabstandes auf die Sauerstoffkonzentration am Werkstück in Abhängigkeit der Gasmenge und der Stromstärke (6°Modell)



Durch Anwendung des numerischen Modells als auch durch Sauerstoffmessungen konnte nachgewiesen werden, dass die Vergrößerung des Brennerabstandes bei gleichbleibender Lichtbogenlänge, unabhängig von Gasmenge oder Schweißstromstärke, zu einer Reduzierung der Schutzgasabdeckung führt.

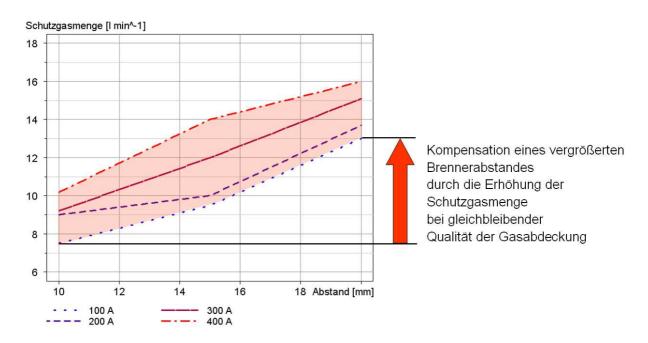


Abbildung 7.25: Benötigte Schutzgasmengen in Abhängigkeit des Brennerabstandes und der Schweißstromstärke (Simulation, 6°-Modell, Gasdüse 13 mm)

Ausgehend den Ergebnissen der Simulation können Hinweise für von Einstellparameter hinsichtlich der benötigten Schutzgasmenge für den individuellen Anwendungsfall abgeleitet werden. Kriterium für das in Abbildung 7.25 beispielhaft dargestellte Diagramm ist eine Sauerstoffkonzentration kleiner 50 ppm, welche in einem Durchmesserbereich von 16 mm unter dem Brenner gewährleistet werden soll. Im Diagramm kann die dafür notwendige, einzustellende Schutzgasmenge entnommen werden. Es wird deutlich, dass eine Erhöhung der Stromstärke von 100 A auf 400 A eine Erhöhung der Schutzgasmenge um 3 bis 5 l/min erfordert, um einen gleichbleibenden Gasschutz gewährleisten. Eine Erhöhung zu des Brennerabstandes von 10 mm auf 20 mm sollte mit der Erhöhung Schutzgasmenge um ca. 6 l/min kompensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass auf diese Weise keine festen Parametersätze entstehen sollen, sondern Anhaltspunkte geschaffen werden, die eine angemessene Reaktion auf sich ändernde Rahmenbedingungen ermöglichen.



#### 7.3.2 Einfluss der Brennerneigung

In der Literatur wird eine stark stechende oder schleppende Brennerstellung (als problematisch gelten Winkel > 25°) als mögliche Urs ache für die Verunreinigung der Schutzgasabdeckung benannt /15/. In der Begründung wird argumentiert, dass durch das ausströmende Schutzgas Luft aus den Bereichen unter dem Brenner in die Schutzgasströmung eingesaugt werden soll. In der Simulation und mit PIV wurden daher verschiedene Brennerneigungen bei unterschiedlichen Brennerabständen und Gasmengen untersucht.

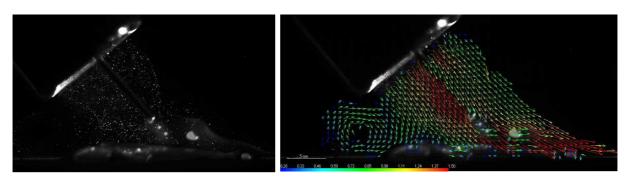


Abbildung 7.26: Visualisierung der Gasströmung durch PIV bei einer 40°stechenden Brennerneigung in der Grundstromphase beim MSG-Impulsschweißen von S235

In PIV-Aufnahmen wird deutlich, dass sich vor allem bei großen Abständen zwischen Werkstück und Brenner über der Naht ein Wirbel ausbildet, vgl. Abbildung 7.26. Dieser Wirbel befördert Atmosphärengase in den Randbereich der Strömung. Das direkte, injektorbasierte Einsaugen von Umgebungsluft, welches oft in der Literatur und den Lehrunterlagen beschrieben wird, kann jedoch auch bei großen Anstellwinkeln und verschiedenen Gasmengen weder durch die Simulation noch durch PIV nachgewiesen werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Tropfen im Moment der Ablösung durch Kräfte des Lichtbogens nach oben gedrückt wird und mit erheblichem Abstand zur Lichtbogenachse in das Schmelzbad übergeht. In Abbildung 7.27 ist der in der Simulation errechnete Bereich guter Schutzgasabdeckung mit den PIV-Aufnahmen überlagert, so dass deutlich wird, dass der Tropfen im Randbereich des Schutzgasfreistrahles in die Schmelze übergeht. Schutzgasdüse und Gasmenge sind daher so zu wählen, dass auch in diesem Bereich eine ausreichende Qualität der



Schutzgasabdeckung sichergestellt wird. Kann dies nicht gewährleistet werden, sollte eine zusätzliche Gasabdeckung, beispielsweise durch eine den Brenner umschließende Schleppgasdüse, adaptiert werden. Die Ergebnisse der Simulation sind in Anlage 11 dargestellt.

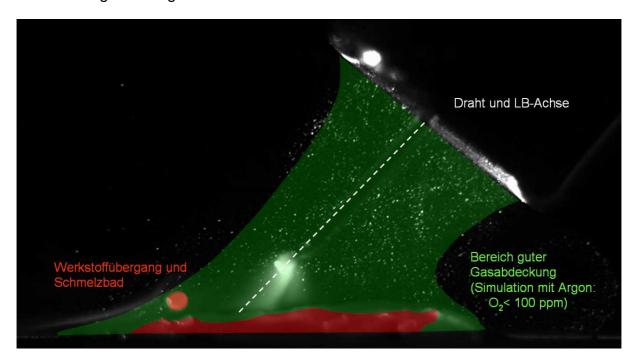


Abbildung 7.27: Gekopplete Auswertung von PIV und Simulation beim MAG-Impulsschweißen bei großer Brennerneigung (40°stechend)

#### 7.3.3 Einfluss von pendelner Brennerführung

Die Untersuchung der Schutzgasströmung an einem pendelnden Brenner erfolgte durch die in ANSYS CFX mögliche Verformung des Netzes (Mesh-Deformation) mittels einer zeitbestimmten Rechnung. Der Brenner wurde dabei mit einer Frequenz von 2 Hz und einer Auslenkungen von  $\pm$  10° gependelt, vgl. Abbildung 7.28.

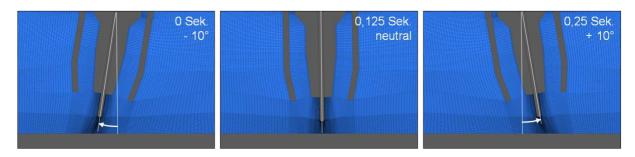


Abbildung 7.28: Darstellung der Mesh-Deformation während einer Pendelbewegung



Die Berücksichtigung der Metallverdampfung ist wie in Kapitel 5.1.4 erläutert für die Beurteilung der Schutzgasabdeckung nicht unbedingt erforderlich und wurde im Hinblick auf die Rechenzeit nicht implementiert. Daraus folgend zeigt der sich ausbildende Lichtbogen im Zentrum kein lokales Temperaturminimum.

Ähnlich wie in Kapitel 7.3.2 bzgl. der Neigung des Brenners in Vorschubrichtung bereits beschrieben, wird auch beim Pendeln der äußere Bereich des Lichtbogens während der Auslenkung durch Umgebungsluft in Abhängigkeit des Winkels, der Gasmenge und der Stromstärke kontaminiert. Für die Auswahl geeigneter Brennersysteme gelten daher die gleichen Grundsätze. Schutzgasdüse und Gasmenge sind so zu wählen, dass auch in den äußeren Bereichen eine ausreichende Qualität der Schutzgasabdeckung sichergestellt wird. Kann dies nicht gewährleistet werden, sollte eine den Brenner umschließende Schleppgasdüse die Gasabdeckung verbessern.

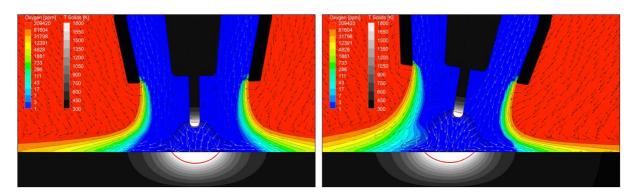


Abbildung 7.29: Simulation der Gasabdeckung beim MSG-Pendeln in neutraler Brennerposition, links und bei maximaler Auslenkung, rechts (180°-Modell, 300 A, 15 l/min Argon)

#### 7.3.4 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Schweißprozessen. Es werden möglichst hohe Vorschubgeschwindigkeiten angestrebt. Die Wechselwirkungen zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Gasabdeckung sind jedoch weitgehend unbekannt. In der Praxis werden jedoch häufig Verschlechterungen der Gasabdeckung auf hohe Vorschubgeschwindigkeiten zurückgeführt und in der Folge eine zu hohe



Vorschubgeschwindigkeit als Ursache von Spritzern und anderen Prozessunregelmäßigkeiten benannt.

Daher erfolgte eine modellbasierte Untersuchung der Gasabdeckung in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Mit einem spiegelsymmetrischen Modell wurden die Strömung des Schutzgasfreistrahls und die Qualität der Gasabdeckung für 0,2 m/min, 0,4 m/min, 0,6 m/min, 0,8 m/min und 1 m/min Schweißgeschwindigkeit berechnet. In Abbildung 7.30 ist die Abhängigkeit der Schutzgasabdeckung und der Werkstücktemperatur von der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt.

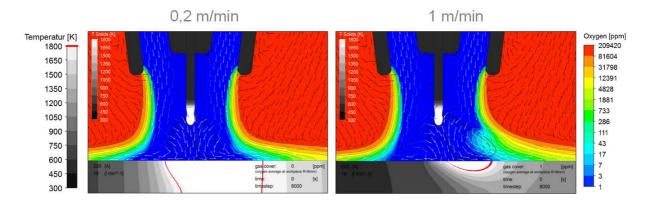


Abbildung 7.30: Schutzgasabdeckung und Werkstücktemperatur bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten (180°-Modell, Schutzgas: Argon, 1 8 l/min)

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass die direkte Beeinflussung der Schutzgasströmung durch die Brennerbewegung und die stehende Luft in der Umgebung keinen signifikanten Einfluss auf die Gasströmung und die Qualität der Schutzgasabdeckung hat. Die aus der Vorschubgeschwindigkeit resultierende seitliche Anströmung des Schutzgasfreistrahles mit Geschwindigkeiten von bis zu 1 m/min (0.167 m/s) ist im Vergleich mit den Geschwindigkeiten des Schutzgases von 3 bis 5 m/s am Gasdüsenauslass und einer wesentlich schnelleren seitlichen Abströmung über das Werkstück um Größenordnungen kleiner und damit zu gering um zu einer verschlechterten Gasabdeckung zu führen.

Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit ändert sich in erster Linie das Temperaturprofil im Werkstück. Im Modell werden hiervon auch der Lichtbogenansatz, damit die gesamte Lichtbogenausbildung und somit auch die



Gasströmung bzw. die Schutzgasabdeckung beeinflusst (siehe Kapitel 7.2.1). Es wird deutlich, dass bei hohen Geschwindigkeiten der Lichtbogen weiter nach hinten, auf die heißen Werkstückbereiche brennt und die Gasabdeckung in den Außenbereichen kontaminiert wird.

Außerdem ist es bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten möglich, dass sich eine sehr lange Schmelzbadzunge ausbildet, die nicht mehr durch den Gasschutz des Brenners abgedeckt wird. Hinsichtlich einer guten Schutzgasabdeckung wird bei hohen Schweißgeschwindigkeiten daher der Einsatz einer Schleppgasdüse empfohlen.

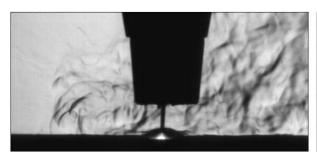
#### 7.3.5 Einfluss von Zugluft, Arbeitsplatzabsaugung oder Auftriebseffekten

Durch die Öffnung von Türen oder Toren sowie durch Absauganlagen können in Fertigungshallen Luftbewegungen verursacht werden, die die Schutzgasabdeckung von Schweißprozessen beeinträchtigen können. Um den Einfluss von Zugluft auf den Schweißprozesse zu visualisieren wurden durch Ventilatoren und Absauganlagen bewusst Luftbewegungen in unmittelbarer Umgebung des Schweißprozesses erzeugt und durch die Schlierenanalyse sowie durch PIV untersucht. Die messtechnische Erfassung bzw. die Variation der Zugluftgeschwindigkeit wurde aus zeitlichen Gründen im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt, so dass lediglich prinzipielle Aussagen zu den Wechselwirkungen der Gasströmungen getroffen werden können.

In Abbildung 7.31 ist das Aufeinanderprallen des durch einen Ventilator seitlich zugeführten Luftstromes mit dem aus der Gasdüse austretenden Schutzgas zu sehen. In der Folge bildet sich neben dem Brenner ein relativ großes Wirbelgebiet. Ist der Brennerabstand zu groß oder die Schutzgasmenge zu klein, verkleinert sich dieses Wirbelgebiet und verschiebt sich in Richtung des Prozesses bzw. verschwindet ganz, so dass die seitliche Anströmung direkt auf den Schutzgasfreistrahl trifft und die Qualität der Gasabdeckung reduziert wird. Dies ist durch Prozessunregelmäßigkeiten und verstärkte Schmauchablagerungen neben der Naht deutlich geworden. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, sollte gerade bei



empfindlichen Werkstoffen wie CrNi-Stahl oder Titan eine nicht zu breite Gasdüse verwendet werden, so dass der Lichtbogen im Zentrum und nicht in den Außenbereichen angeströmt wird. Eine den Brenner umschließende Zusatzgasdüse kann zusätzlichen Schutz vor seitlichen Luftströmungen bieten.



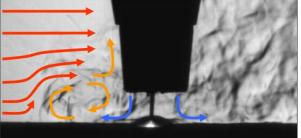


Abbildung 7.31: Untersuchung des Einflusses von Zugluft mit der Schlierenmethode (links) und Visualisierung der Strömungscharakteristik (rechts)

In weiteren Untersuchungen wurde eine übliche Arbeitsplatzabsaugung etwa 1 m neben dem Schweißprozess positioniert und die Auswirkungen dieser Absaugströmung durch PIV untersucht. Abbildung 7.32 zeigt, dass sich die Freistrahlströmung über den Brennerumfang sehr ungleichmäßig ausbildet und zu Verwirbelungen unter der Gasdüse führt. Der überwiegende partikelbeladenen Gases wird in Richtung der Absaugung ausgelenkt. Auf der rechten Seite des Drahtes sind dagegen kaum Partikel vorhanden, was auf das Ansaugen von Umgebungsluft schließen lässt. Zeitaufgelöste PIV-Analysen verdeutlichen, dass die mangelhafte Gasabdeckung zu Prozessinstabilitäten führt, die wiederum den Gasschutz zusätzlich beeinträchtigen.

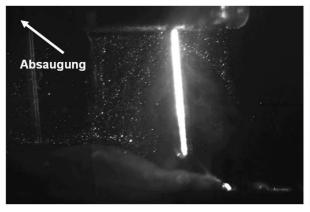




Abbildung 7.32: PIV-Aufnahmen beim MSG-Impulsschweißen mit seitlicher Absaugung



Während der Prozess bei ausgeschalteter Absaugung sehr ruhig war, kam es mit Absaugung zu einer deutlich erhöhten Kurzschlussanzahl im Impulsprozess. Der Lichtbogen wurde zunehmend unruhig und es wurde mehr Schweißrauch gebildet.

Zusammenfassend können sowohl seitliche Anströmungen des Prozesses durch Zugluft als auch Luftbewegungen durch eine Schweißrauchabsaugung für die Schutzgasabdeckung als kritisch eingeschätzt werden. Hinsichtlich einer guten Schutzgasabdeckung ist zu empfehlen die Schweißrauchabsaugung zentral über dem Schweißprozess zu positionieren und breite Absaugstutzen zu nutzen, die eine langsame, gleichmäßige und breite Absaugströmung gewährleisten.

Außerdem wurde in der Simulation der Einfluss von Auftriebseffekten untersucht. Dabei wurden die Positionen PA (Wanne), PE (über Kopf), PF (steigend) und PG (fallend) im Modell abgebildet.

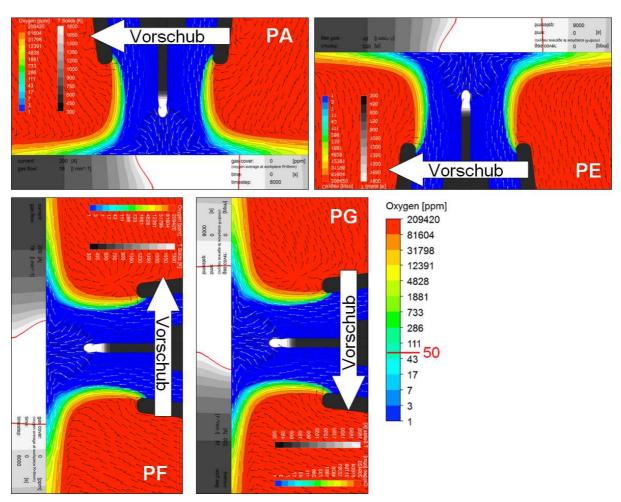


Abbildung 7.33: Schutzgasabdeckung bei verschiedenen Schweißpositionen (180°-Modell, Schutzgas: Argon, 18 I/min, 0,2 m/min Schweißgeschwindigkeit)



Es wurden in Abhängigkeit der Schweißposition keine signifikanten Einflüsse auf die Gasströmung bzw. auf die Ausbildung der Schutzgasabdeckung festgestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass die im Projekt erarbeitete Modellgeometrie einen relativen kleinen Bereich um den Schweißprozess abbildet. Das entwickelte Modell ist darauf ausgelegt die Freistrahlströmung und deren Wechselwirkungen mit dem Lichtbogen zu beschreiben. Um gerade bei großen Konstruktionen die Wirkung von Auftriebsströmungen an heißen Bauteilen zu analysieren ist ein wesentlich größerer Strömungsraum abzubilden. Der hierzu notwendige Modellierungsaufwand konnte im Rahmen des Vorhabens in Bezug auf den Aufwand zu Gittererstellung und Rechenzeit nicht in dem notwendigen Umfang realisiert werden. Stattdessen erschein es sinnvoll diese Effekte durch den Einsatz von PIV und Schlierentechnik zu untersuchen. Hierbei ist zu beachten, dass die Auftriebsströmungen stark von der Größe der Bauteile abhängen und daher nicht im Labor, sondern in der Fertigung analysiert werden sollten. Hierfür ist darauf hinzuweisen, dass die entwickelten Diagnostiken transportabel aufgebaut wurden und für Einsätze in der industriellen Praxis zur Verfügung stehen bzw. auch schon angewendet wurden.



### 8 Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war es, verbesserte Vorraussetzungen für das Schweißen von Werkstoffen zu schaffen, die hohe Anforderungen an die Qualität der Schutzgasabdeckung stellen. Hierzu sollten sowohl Konstruktionshinweise für die Brennerentwickler im Hinblick auf die strömungsgerechte Auslegung von Schweißbrennern als auch Anwenderhinweise für die Schweißfertigung abgeleitet werden. Diese Ziele sollten durch die Entwicklung und Bereitstellung neuer Methoden erreicht werden, die in der Brennerentwicklung aber auch für die Bewertung der Strömungsverhältnisse in der Fertigung eingesetzt werden können.

Durch die Weiterentwicklung der Particle Image Velocimetry (PIV) können MSG-Schweißprozessen kontinuierliche Aufnahmen an realisiert und Prozessanalyse bzw. für die Entwicklung von Schweißbrennern eingesetzt werden. Neue Möglichkeiten sind auch der Anwendung der Schlierentechnik zuzuordnen. Durch strahlungsselektive Beleuchtungsquellen und auf den strahlungsintensiven MSG-Prozess abgestimmte Filtersysteme kann der Lichtbogen Sprühlichtbogenbereich fast vollständig ausgeblendet werden. PIV und Schlierentechnik wurden als transportable Demonstratoren aufgebaut. Die Sauerstoffmessung am Werkstück ermöglicht die quantitative Bewertung der Schutzgasabdeckung und ist gerade für die Brennerentwicklung eine schnelle und effiziente Methode, mit deren Hilfe die Wirkung geänderter Strömungsquerschnitte auf die Ausbildung der Gasabdeckung untersucht werden kann. Weiterhin wurde ein numerisches Modell zur Analyse der Schutzgasabdeckung entwickelt. Auf Grundlage der durchgeführten und beschriebenen Modellentwicklung und Validierung wurden Hinweise für den Einsatz numerischer Modelle für die Entwicklung und Untersuchung von Brennern und Verfahren in Unternehmen zusammengestellt.

Durch die Anwendung dieser Methoden wurde die Prozessgasströmung an MSG-Schweißprozessen sowohl numerisch als auch experimentell systematisch analysiert und charakterisiert. Dies umfasst sowohl die Strömung im Schweißbrenner, die bisher nicht visualisiert und analysiert werden konnte, als auch die Interaktionen



zwischen dem Verfahren und dem Schutzgasfreistrahl. Entsprechend der im Antrag formulierten Zielstellung wurden die Abhängigkeiten der Schutzgasabdeckung von

- aktuellen Brennergeometrien (7 verschiedene Brennersysteme),
- Schweißparametern (Stromparameter, Schweißgeschwindigkeit) sowie
- Randbedingungen (Schweißposition, Zugluft, Pendeln)

untersucht und beschrieben. Die Anwendbarkeit gradierter Strömungsprofile wurde erprobt und eine Vorzugsvariante abgeleitet. Zusätzlich wurden in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss die brennerinterne Gasverteilung im Detail analysiert und in verschiedenen Demonstratoren erprobt. Zusätzlich wurden auch die Gasdüsenform und -position, der Brennerabstand und die Brennerneigung in Abhängigkeit verschiedener Stromstärken und Gasmengen untersucht.

Die im Antrag formulierten Untersuchungsschwerpunkte bzgl. verschiedenen Schutzgasen und Nahtarten wurde in Absprache mit dem PbA zurückgestellt, da Fragestellungen nach der Brenner- und Gasdüsenposition, sowie der Brennerneigung von vordergründigem Interesse waren /19/.

Auf Grundlage des erzielten Wissens wurden Gestaltungsmerkmale für die Prozessgasführung von Schweißbrennern abgeleitet und in Demonstratoren erprobt. Den Verfahrensanwendern wurden potentielle Fehlerquellen hinsichtlich der Auslegung von Schweißprozessen in der Fertigung und Lösungsansätze zu deren Behebung aufgezeigt.

Die im Antrag formulierte Simulation eines Brennerkonzeptes zur Emissionsminderung erfolgte nicht, da dieses Thema im Rahmen des Lichtbogenclusters nicht weiter verfolgt wurde. In Absprache mit der Clusterleitung wurde auf die Arbeitsinhalte zugunsten der Schutzgasuntersuchungen verzichtet.



Es können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

Analyse der Schutzgasströmung im Schweißbrenner und Bewertung der Schutzgasströmung am Werkstück:

- Die herkömmliche konstruktive Umsetzung der brennerinternen Gasverteilung führt zur Entstehung von turbulenten und ungleichmäßigen Strömungsprofilen. Alternative Möglichkeiten der Gasverteilung wurden erarbeitet.
- II Durch ungleichmäßige und turbulente Strömungseigenschaften wird die Qualität der Gasabdeckung am Werkstück reduziert.
- III Der Lichtbogen beeinflusst das Strömungsverhalten grundlegend und beschleunigt das Gas zur Lichtbogenachse.
- IV Die Schutzgasströmung folgt Änderungen im Schweißprozess. Ursachen sind z.B. Änderungen im Stromverlauf oder Prozessunregelmäßigkeiten.
- V Eine gute Lichtbogenanströmung ist Grundlage für eine hochwertige Schutzgasabdeckung. Dies wird vor allem durch die Form der Gasdüse realisiert.

Aus den erkannten Wechselwirkungen zwischen Gasströmung und Prozess können Hinweise für die Schweißbrennerkonstruktion und die Anwendung von Schutzgasschweißprozessen abgeleitet werden:

- Eine über den Brennerumfang gleichmäßige Anströmung des Gasverteilers ist die Grundlage für eine gleichmäßige und turbulenzarme Schutzgasströmung. Je gleichmäßiger die Anströmung des Gasverteilers erfolgt, umso größer können die Bohrungen im Verteiler ausgelegt werden und umso geringer sind die aus hohen Strömungsgeschwindigkeiten resultierenden Turbulenzen.
- II Strömungsräume sollten möglichst groß und über den Brennerumfang gleich ausgelegt werden, so dass dem Schutzgas ausreichend Zeit zur Laminarisierung gegeben wird.
- III Im Hinblick auf einen kurzen effektiven Gasspülprozess sollten brennerinterne Strömungstoträume konstruktiv vermieden werden.



- IV Gasdüsen sollten konisch ausgelegt werden und den Lichtbogen im oberen Bereich mit Schutzgas anströmen.
- V Die Stromdüse sollte im Bezug zur Gasdüse 1-5 mm zurückstehen.
- VI Hohe Stromstärken sind mit einer Erhöhung der Gasmenge zu kompensieren.
- VII Auf Grund der erkannten Wechselwirkung zwischen Gasströmung und Stromstärke können schutzgasoptimierte Impulsprozesse entwickelt werden.
- VIII Wenn aus Gründen der Zugänglichkeit der Abstand zwischen Gasdüse und Werkstück vergrößert werden muss, ist es aus Sicht der Schutzgasabdeckung zu empfehlen den Abstand des kompletten Brenners zu erhöhen und nicht nur kürzere Gasdüsen und vorstehende Stromdüsen zu verwenden.
- IX Beim Schweißen sensibler Werkstoffe sollten möglichst Brenner mit langen Gasdüsen eingesetzt werden. Kurze Brenner (z.B. aus der automatisierten Schweißfertigung) zeigen im Vergleich zu Handschweißbrennern eine deutlich schlechtere Gasabdeckung.



## 9 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für kmU

#### 9.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

In Rahmen des Vorhabens wurden neue Methoden für die Visualisierung, Quantifizierung und Analyse von Schutzgasströmung und Gasabdeckung erarbeitet. In Ergänzung zu dem bisherigen überwiegend experimentellen Entwicklungsprozess von Schweißbrennern ermöglichen die neuen Methoden der Strömungsanalyse eine umfassende Visualisierung und Analyse der Schutzgasströmung im Prozessumfeld und vor allem im Schweißbrenner. Die neuen Methoden ermöglichen somit ein besseres Aufzeigen von Potentialen und Restriktionen in der Schweißbrennerentwicklung und somit eine stärker auf dem Verständnis basierende Brennerentwicklung. Die simulationsgestützte Brennerentwicklung wird langfristig zu einer Minderung von Produktionsaufwand, Entwicklungsdauer und zur teilweisen Substitution des aufwändigen Prototypenbaus führen.

Durch Anwendung der neuen Methoden der Strömungsanalyse wurde das Verständnis über die Charakteristik von Gasströmung und Schutzgasabdeckung deutlich erhöht. Verschiedene Aussagen zur Schutzgasströmung aus der Literatur bzw. den schweißtechnischen Lehrunterlagen wurden hinterfragt und konnten bestätigt oder erweitert sowie hinsichtlich derer Ursachen beschrieben werden.

Weiterhin wurde ein neues konstruktives Gasverteilungskonzept für Schweißbrenner erarbeitet, das eine gleichmäßige Gasströmung im Brenner und eine hochwertige Qualität der Schutzgasabdeckung am Werkstück durch Integration von porösen Materialien ermöglicht. Im neuen Konstruktionsprinzip tritt die Funktion herkömmlicher Gasverteiler in den Hintergrund, so dass dieser nun vielmehr dem Schutz vor Schweißspritzern und Verunreinigungen dient und die Gasströmung nicht mehr durch kleine Strömungsquerschnitte beeinträchtigt wird.

Außerdem wurde der Vorschlag erarbeitet, für Schweißbrenner verschiedenen Gasverteiler am Markt anzubieten, die entweder im oberen oder im unteren Leistungsbereich eine bessere Schutzgasabdeckung realisieren.



#### 9.2 Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse

Die neuen Methoden der Strömungsanalyse wurden bereits während der Projektlaufzeit für die Entwicklung von Schweißbrennern in Unternehmen demonstriert und stehen jetzt den dortigen Entwicklungsabteilungen zur Verfügung /20/.

Projektes wurden Konstruktionsempfehlungen für MSG-Im Rahmen des Schweißbrenner und Anwenderhinweise für eine hochqualitative Schutzgasabdeckung beim MSG-Schweißen erarbeitet. Mehrere Erkenntnisse haben bereits Eingang in die Entwicklung von Schweißbrennern gefunden und werden die Wettbewerbsfähigkeit dieser und zukünftiger Produkte verbessern /21/. Dazu zählen die Hinweise zur brennerinternen Gasverteilung, die Integration metallischer Schäume oder die Empfehlungen zur Auslegung von Schutzgasdüsen. Die Überführung der im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse über die brennerinterne Prozessgasströmung und über die Wechselwirkung des Schutzgasfreistrahls mit dem Prozess in neue Schweißbrennerkonzepte ermöglicht eine verbesserte Wettbewerbssituation für Schweißbrennerhersteller und Anwender.

Mit Hilfe des im Projekt erarbeiteten Verständnisses über die Ausbildung einer Schutzgasabdeckung Verfügung hochwertigen sowie den zur stehenden Anwendungsempfehlungen metallverarbeitenden Unternehmen kann in kostenintensive Nacharbeit auf Grund einer qualitativ unzureichenden Schutzgasabdeckung erheblich gesenkt bzw. sogar vermieden werden. Dies führt zur Senkung der Produktionskosten und der Produktionszeit und damit zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit der Unternehmen.



## 10 Erläuterung zur Kostenaufteilung

#### 10.1 Erläuterungen zu Personaleinsatz

Der wissenschaftliche Mitarbeiter führte in Vollzeitbeschäftigung die notwendigen Recherchearbeiten, die Kommunikation mit den Projektbearbeitern aus den Projekten G1, G3, G4 und G5 sowie die für die Modellvalidierung nötige Planung, Durchführung bzw. Überwachung der Versuche durch. Die Untersuchungen wurden den wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewertet und die Ergebnisse zusammengeführt.

Der technische Mitarbeiter war für die Durchführung und z.T. für die Auswertung der experimentellen Untersuchungen zuständig. Versuchsstände, Vorrichtungskomponenten, Werkzeuge sowie Demonstratoren wurden durch den technischen Mitarbeiter gefertigt sowie deren Montage durchgeführt bzw. überwacht.

Die studentischen Hilfskräfte haben vorwiegend bei der Anpassung der Versuchsstände und der Durchführung von Messungen mitgearbeitet. Weiterhin wurden metallografische Untersuchungen durch die Studenten durchgeführt.

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

#### 10.2 Erläuterungen zu Geräteanschaffung

Geräte mit einem Beschaffungswert von über 2500,- Euro wurden nicht angeschafft.

#### 10.3 Erläuterungen zu Leistungen Dritter

Ausgaben für Leistungen Dritter beinhalten die im Projekt vorgesehene Miete des PIV Systems von der DANTEC Dynamics GmbH von gesamt 35.930,- Euro. Zur Anschaffung der notwendigen Lizenzen für die Simulationssoftware ANSYS CFX mussten 24.630 € aufgewendet werden.



## 11 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Das Forschungsprojekt AiF/DFG ist Teil des Clustervorhabens "Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug". Im Rahmen dieses Clusters wurden in den Jahren 2009-2011 mehrere Sitzungen des PA durchgeführt. Zusätzlich wurden zwei ausschließlich auf das Teilprojekt bezogene Sitzung des PA abgehalten. Die aktuellen Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden weiterhin den jeweiligen Sitzungen des Fachausschuss 3 des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und verwandte Verfahren (DVS) vorgelegt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen von Vorträgen und Postern auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen vorgestellt. In Form von Workshops für KMU wurden die Ergebnisse ausführlich dargelegt und anwendungsorientiert diskutiert. In Zusammenarbeit mit der GSI SLV Halle wurden die Ergebnisse in die Ausbildung zum "Internationalen Schweißfachingenieur" eingebunden. Ein Überblick über die konkreten Transfermaßnahmen wird in gegeben.

Tabelle 11.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Allgemeine Informationen und	Beschreibung der Projekte im	seit November 2008
Projektüberblick, Gewinnung von	Internetauftritt des Antragstellers	
weiteren Mitgliedern für den PA	und des Lichtbogenclusters	
Information bzgl. laufender	Aufnahme des Projektes in den	Januar 2009, 2010, 2011
Forschungsprojekte, Gewinnung	Jahresforschungsbericht des	und 2012
von weiteren Mitgliedern für den	Antragstellers	
PA		
Ergebnistransfer zu den	Sitzung des PA des AiF/DFG	05.10.2009 Berlin
Mitgliedern des PA, Planung der	Clustervorhabens	
weiteren Vorgehensweise	"Lichtbogenschweißen - Physik und	24.02.2010 Senftenberg
(PA - Gesamtcluster)	Werkzeug" mit	
	Ergebniszusammenfassung der	08.10.2010 Aachen
	Teilprojekte und Diskussion der	
	Ergebnisse, bzw. Planung der	24.02.2011 Greifswald
	weiteren Vorgehensweise	



Mitgliedern des PA, Planung der weiteren Vorgehensweise (PA - Teilprojekt)  Informationen an die Mitglieder des Arbeitskreises FA3 / DVS  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Alexander Binzel Schweißtechnik/ Ale	Ergebnistransfer zu den	Sitzung des PA des Teilprojektes mit	01.10.2009 Buseck
(PA - Teilprojekt) im Teilgebiet und Diskussion der Ergebnisse, bzw. weiterer Vorgehensweise  Informationen an die Mitglieder des Einreichen von Zwischenberichten als Tischvorlage bzw. Kurzvorträge zur Ergebniszusammenfassung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft Vorträge, Poster und Veröffentlichtungen auf nationalen und internationalen Tagungen, Kongressen und Workshops:  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft Vorträge, Poster und Veröffentlichtungen auf nationalen und internationalen Tagungen, Kongressen und Workshops:  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft Vigilberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Ausbildung zum Internationalen Schweißtachnigenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von	Mitgliedern des PA, Planung der	ausführlichem Bericht des	
Ergebnisse, bzw. weiterer   Vorgehensweise   Informationen an die Mitglieder des   Arbeitskreises FA3 / DVS   Einreichen von Zwischenberichten   als Tischvorlage bzw. Kurzvorträge   zur Ergebniszusammenfassung   Vorträge, Poster und Veröffentlichten   ungen auf nationalen und   internationalen Tagungen,   Kongressen und Workshops:   Graz, Österreich   1516.07.2010   Istanbul, Türkei   2728.10.2010   Nürnberg, Deutschland   2629.09.2011   Hamburg, Deutschland   2930.03.2012   Dresden, Deutschland   2930.03.2012   Dresden, Deutschland   20.05.2010   Finsterwalde   Plasma und Maschinen GmbH   Kurt Haufe Schweißtechnik   GmbH und Co. KG   Kurt Haufe Schweißtechnik   GmbH und Co. KG   Kurt Haufe Schweißtechnik   GmbH und Co. KG   Ausbildung zum Internationalen   Mai 2010, 2011 und   2012 Dresden	weiteren Vorgehensweise	Antragstellers über den Arbeitsstand	09.06.2010 Dresden
Informationen an die Mitglieder des Arbeitskreises FA3 / DVS  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Missenschaft und Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Dresitstellen von  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten als Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischenberichten das Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischen ind Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen von Zwischen Ergebnisten und Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen verrierten und Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen verrierten und Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Einreichen verrierten und Erzebnischen Ergebnischen E	(PA - Teilprojekt)	im Teilgebiet und Diskussion der	
Informationen an die Mitglieder des Arbeitskreises FA3 / DVS  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Workshops:  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Workshops mit KMU:  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Bereitstellen von		Ergebnisse, bzw. weiterer	
Arbeitskreises FA3 / DVS  als Tischvorlage bzw. Kurzvorträge zur Ergebniszusammenfassung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Wirtschaft  Wirtschaft  Wirtschaft  Vorträge, Poster und Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Tagungen, Kongressen und Workshops:  2829.09.2009  Graz, Österreich  1516.07.2010  Istanbul, Türkei  2728.10.2010  Nümberg, Deutschland  2629.09.2011  Hamburg, Deutschland  2930.03.2012  Dresden, Deutschland  Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde  Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von		Vorgehensweise	
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Workshops:  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Workshops:  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Ergebnisse in der Ausbildung  Ergebnisse in der Ausbildung  Ergetitstellen von  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Ergetitstellen von  Transfer und Diskussion der Ergetitstellen von	Informationen an die Mitglieder des	Einreichen von Zwischenberichten	
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Workshops:  Workshops:  Workshops:  Workshops:  Workshops:  Workshops:  Workshops:  Workshops mit KMU:  Ergebnisse in die Wirtschaft  Kijellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Bereitstellen von	Arbeitskreises FA3 / DVS	als Tischvorlage bzw. Kurzvorträge	
Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft  Wirtschaft  Ungen auf nationalen und internationalen Tagungen, Kongressen und Workshops:  Rongressen und Workshops:  2829.09.2009 Graz, Österreich 1516.07.2010 Istanbul, Türkei 2728.10.2010 Nürnberg, Deutschland 2629.09.2011 Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 20.05.2010 Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von		zur Ergebniszusammenfassung	
Wirtschaft    Internationalen Tagungen, Kongressen und Workshops:   2829.09.2009   Graz, Österreich   1516.07.2010   Istanbul, Türkei   2728.10.2010   Nürnberg, Deutschland   2629.09.2011   Hamburg, Deutschland   2930.03.2012   Dresden, Deutschland   2930.03.2012   Dresden   20.05.2010 Finsterwalde   Plasma und Maschinen GmbH   Murt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG   20.10.2011 Dresden   20.10.2011 Dresden   20.10.2011 Dresden   20.10.2011 Und	Transfer und Diskussion der	Vorträge, Poster und Veröffentlich-	1719.05.2009
Kongressen und Workshops:  Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von	Ergebnisse in Wissenschaft und	ungen auf nationalen und	Smolenice, Slowakai
Kongressen und Workshops:  Graz, Österreich  1516.07.2010  Istanbul, Türkei  2728.10.2010  Nürnberg, Deutschland  2629.09.2011  Hamburg, Deutschland  2930.03.2012  Dresden, Deutschland  Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde  Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/  Alexander Binzel Schweißtechnik/  GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/  Alexander Binzel Schweißtechnik/  Alexander Binzel Schweißtechnik/  Alexander Binzel Schweißtechnik/  Alexander Binzel Schweißtechnik  GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der  Ergebnisse in der Ausbildung  Ausbildung zum Internationalen  Schweißfachingenieur, GSI SLV  Halle  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von	Wirtschaft	internationalen Tagungen,	2829.09.2009
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft Kyellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Ergebnisse in der Ausbildung Ergebnisse in der Birzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Binzel Schweißtec		Kongressen und Workshops:	
Istanbul, Türkei 2728.10.2010 Nürnberg, Deutschland 2629.09.2011 Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 20.05.2010 Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von			·
2728.10.2010 Nürnberg, Deutschland 2629.09.2011 Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Z728.10.2010  R02.6-29.09.2011  Poesden, Deutschland  20.05.2010 Finsterwalde  20.06.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden			
Nürnberg, Deutschland 2629.09.2011 Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von			Istanbul, Türkei
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kijellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von			2728.10.2010
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kijellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von			Nürnberg, Deutschland
Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Hamburg, Deutschland 2930.03.2012 Dresden, Deutschland  20.05.2010 Finsterwalde  20.05.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden			· ·
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Ergeitstellen von  Workshops mit KMU:  2930.03.2012  Dresden, Deutschland  20.05.2010 Finsterwalde  20.06.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden			
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Workshops mit KMU:  20.05.2010 Finsterwalde  20.06.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  42.010.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  20.12 Dresden  Bereitstellen von			Hamburg, Deutschland
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Workshops mit KMU:  Kjellberg Finsterwalde  Plasma und Maschinen GmbH  O2.06.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  40.10.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  Bereitstellen von			2930.03.2012
Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Ergebnisse in die Wirtschaft  Kjellberg Finsterwalde 20.05.2010 Finsterwalde  20.05.2010 Pinsterwalde  20.05.2010 Dresden  Mai 2010.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  Halle  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von			Dresden, Deutschland
Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  Halle  Anwendung der neuen Methoden	Transfer und Diskussion der	Workshops mit KMU:	
Plasma und Maschinen GmbH  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Anwendung der neuen Methoden  Plasma und Maschinen GmbH  O2.06.2010 Dresden  20.10.2011 Dresden  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  Halle  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von	Ergebnisse in die Wirtschaft	Kiellherg Finsterwalde	20 05 2010 Finsterwalde
Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung  Anwendung der neuen Methoden  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Mai 2010, 2011 und 2012 Dresden  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von		, ,	20.00.20101 motorward
Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Anwendung der neuen Methoden  Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden  Bereitstellen von		Tidoma dia Massimien Sinsin	
GmbH und Co. KG  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Anwendung der neuen Methoden  EmbH und Co. KG  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Bereitstellen von		Kurt Haufe Schweißtechnik/	02.06.2010 Dresden
Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Anwendung der neuen Methoden  Kurt Haufe Schweißtechnik/ Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Bereitstellen von			
Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ergebnisse in der Ausbildung Anwendung der neuen Methoden  Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden  Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH und Co. KG  Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle		GmbH und Co. KG	
GmbH und Co. KG  Transfer und Diskussion der Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von		Kurt Haufe Schweißtechnik/	20.10.2011 Dresden
Transfer und Diskussion der Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle  Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von		Alexander Binzel Schweißtechnik	
Ergebnisse in der Ausbildung Schweißfachingenieur, GSI SLV Halle Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von		GmbH und Co. KG	
Halle Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von	Transfer und Diskussion der	Ausbildung zum Internationalen	Mai 2010, 2011 und
Halle Anwendung der neuen Methoden Bereitstellen von	Ergebnisse in der Ausbildung		2012 Dresden
š į	_	_	
in den Unternehmen Demonstratorversuchsständen	Anwendung der neuen Methoden	Bereitstellen von	
	in den Unternehmen	Demonstratorversuchsständen	



Tabelle 11.2: Geplante Transfermaßnamen

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Transfer und Diskussion der	geplante Veröffentlichungen:	
Ergebnisse in Wissenschaft und		
Wirtschaft	Zeitschrift "Schweißen und	2012
	Schneiden"	
	65th Annual Assembly of the IIW	0814.07.2012
	Comission XII	Denver, USA
	"Methods and results referring the	
	shielding gas flow in GMAW"	

#### Übersicht über die Veröffentlichungen:

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.; Hertel, M.: Numerical simulation of the shielding gas flow with GMA welding and options of validation by diagnostics. International Doctoral Seminar. Proceedings, S.427-437, ISBN 978-80-8096-088-9, Trnava 2009

Schnick, M.; Dreher, M.; Fuessel, U.; Spille-Kohoff, A.: Visualization and Optimization of Shielding Gas Flows by Arc Welding. IIW Annual Meeting 2009, IIW Doc. No. XII-1954-09, Singapore 2009

Füssel, U.; Dreher, M.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen. Zwischenbericht I zum DFG/AiF-Gemeinschaftsvorhaben "Lichtbogenschweißen-Physik und Werkzeug", S.45-49, ISBN 978-3-941681-02-6, Berlin 2009

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.: Simulation of shielding gas flow inside the torch and in the process region of GMA welding. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 9, S.127-138, ISBN 978-3-85125-127-2, Graz 2010

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.: Numerical optimization of gas metal arc welding torches using ANSYS CFX. Proceedings of the International Conference on Advances in Welding Science & Technology for Construction, Energy & Transportation - AWST 2010, ISBN 978-605-61419-1-1, Istanbul 2010



Füssel, U.; Dreher, M.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen. Zwischenbericht II zum DFG/AiF-Gemeinschaftsvorhaben "Lichtbogenschweißen-Physik und Werkzeug", S.60-65, ISBN 978-3-941681-09-5, Aachen 2010

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.; Rose, S.; Hertel, M.: Strömungssimulation und - diagnostik. Moderne Methoden für die effiziente und innovative MSG-Schweißbrennerentwicklung. DVS-Berichte Bd. 267. S.159-165, ISBN 978-3-87155-592-3, Düsseldorf 2010

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen. DVS-Berichte Bd. 275. S.581-586, ISBN 978-3-87155-267-0, Düsseldorf 2011

Häßler, M.; Dreher, M.; Füssel M.; Schnick, M.: Visualisierung von Strömungen am Lichtbogen durch Schlierenmesstechnik. DVS-Berichte Bd. 270. S.67-71, ISBN 978-3-87155-263-2, Düsseldorf 2011

Dreher, M.; Füssel, U.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Lichtbogenschweißbrennern. Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, Dresden 2012

Schnick, M.; Füssel, U.; Häßler, M.; Dreher, M.: Visualisierung der Schutzgasabdeckung beim Lichtbogenschweißen. Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, Dresden 2012

Schnick, M.; Dreher, M. Zschetzsche, J. Füssel, U. Spille-Kohoff, A.: Visualization and Optimization of Shiedling Gas flows in arc welding. Welding in the World, Vol. 56, S. 54-61, ISSN 0043-2288



## 12 Projektbegleitender Ausschuss

Audi AG Dipl.-Ing. D. Rudolph 74148 Neckarsulm

Alexander Binzel Schweißtechnik Prof. E. Schubert / Dipl.-Ing. H. Metzger Kiesacker 8 35418 Buseck

BMW AG
Dipl.-Ing. A. Lang
Landshuter Straße 56
84130 Dingolfing

CFX Berlin Software GmbH Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff Mainzer Straße 23 10247 Berlin

EWM Hightec Welding GmbH
Dipl.-Ing. M. Hübner / Dipl.-Ing. A. Vetten
Dr.-Günter-Henle-Str. 8
56271 Mündersbach

Flensburger Schiffbau Gesellschaft mbH & Co.KG Dipl.-Ing. J.U. Dietze Batteriestraße 52 24939 Flensburg



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

Schiller Apparatebau GmbH Dr.-Ing. A. Krautwald Laubenhof 15a 45326 Essen

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

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



#### Quellenverzeichnis

- Vilden, J.; Bergmann, J. P.; Reich, S.; Neuwöhner, P.; Goecke, S.-F.: Grundlegende Untersuchungen zum flussmittelfreien Löten von Leichtmetall-Material-Mix Konstruktionen. Tagungsband, 8. Internationales Kolloquium, Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, Aachen 19. bis 21.06. 2007. DVS-Berichte Band 243, ISBN 978-3-87155-799-6
- /2/ Lowke, J.J., Morrow, R. and Haidar, J., "A sim-plified unified theory of arcs and their elec-trodes", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30(1997), pp. 2033-2042, 1997.
- /3/ Wendelstorf, J., "Ab initio modeling of thermal plasma gas discharges (electric arcs)", Disser-tation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2000.
- /4/ Gleize, A., Gonzales, J.J. and Freton, P.: "Thermal plasma modeling (Topical Review)", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 38(2005), pp. R153-R183, 2005.
- Vang, F., Hou, W.K., Hu, S.J., Kannatey-Asibu, E., Schultz, W.W. and Wang, P.C., "Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 36(2003), pp. 1143-1152, 2003.
- /6/ Schnick, M., Hertel, M., Füssel, U., Hässler, M., Spille-Kohoff, A. and Murphy, A.B., "Numerical Investigations of the influence of Metal Vapour in GMA Welding", Schweißtechnik Faszination in Forschung und Fertigung. Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2009, Technische Universität Dresden, Dresden, 2009.
- /7/ Füssel, U., Schnick, M. and Zschetzsche, J., "Simulation and measurement of plasma and gas flows in plasma arc welding and cutting", Mathematical Modeling of Weld Phenomena 8, Verlag der Technischen Universität Graz, pp. 37-48, 2007.
- /8/ Cooper, P., Godbole, A. and Norrish, J., "Model-ing and Simulation of Gas Flows in Arc Welding Implications for Shielding Efficiency and Fume



- Extraction", Proc. on the 60th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Dubrovnik (Croatia), 2007.
- /9/ Zschetzsche, J., "Diagnostik von Schutzgasschweißprozessen", Dissertation, Technische Universität Dresden, Verlag der Wissenschaften, Dresden, 2007.
- /10/ Füssel, U., Zschetzsche J., Zosel, J. and Guth, U., "Strömungsmessung in Lichtbogen- und Plasmaprozessen", Stiftung Industrieforschung, Forschungsvorhaben S 559, Abschlussbericht, 2005.
- /11/ Settles, G. S., "Schlieren and Shadowgraph Techniques", Springer Verlag, 2006.
- /12/ Settles, G. S., "Visualization of Liquid Metal, Arc and Jet Interactions in Plasma Cutting of Steel Sheat", 8th International Symposium on Flow Visualization, 1998.
- /13/ Fuentes Munoz, J.E.: "Einfluss der Brennergestaltung auf den WIG-Lichtbogen" Dissertation, Dresdner Fügetechnische Berichte, Band 22/2011, ISBN 978-3-942710-41-1, 2011
- /14/ Firmenschrift Abicor-Binzel, Ersatzteilliste MIG/MAG
- /15/ Baum, L.; Fichter, V.: Der Schutzgasschweißer, Teil II, MIG/MAG-Schweißen. Leitfaden für Ausbildung und Praxis, DVS-Verlag, ISBN 3-87155-539-8, Düsseldorf, 1999.
- /16/ Bürkner, C.: MIG/MAG Schweißbrenner. Offenlegungsschrift DE 103 14 278 A1
- /17/ Hertel, M.; Schnick, M.; Füssel, U.; Gorchakov, S.; Uhrlandt, D.: "Numerical Simulation of GMAW Processes including effects of metal vapour and sheath mechanisms at the electrodes." Magnetohydrodynamics, Vol. 46 (2010), No. 4, pp. 363–370
- /18/ Murphy, A.B.: "Transport Coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas", Plasma Chemistry and Plasma Process-ing, Vol. 15, No. 2, pp. 279-307, 1995.



- /19/ Protokoll der Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in Dresden, 09.06.2010
- /20/ Schubert, E.: Neue Entwicklungen bei Rauchabsaugbrennern, Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, Dresden, 2012
- /21/ DVS Jahresforschungsbericht 2011, Bewertung des Projektes durch Vertreter der Industrie (Alexander Binzel Schweißtechnik, H. Metzger, Leiter Entwicklung und Konstruktion)



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines MSG-Schweißbrenners /14/ und Auswal	hl
der Schutzgasmenge in Abhängigkeit von Gasdüsendurchmes	ser
und Stromstärke /15/	6
Abbildung 3.2: MIG/MAG-Schweißbrenner mit zwei Schutzgaszuführungen /16/	7
Abbildung 4.1: Methodische Vorgehensweise für die Modellbildung und Validierur	ng
durch Diagnostik mit dem Ziel einer verbesserten	
Prozessgasabdeckung	11
Abbildung 5.1: Geometrie und Randbedingungen 6°-Mod ell	16
Abbildung 5.2: Netzentwicklung am Beispiel eines 6°-Modells	17
Abbildung 5.3: Variation der Modellgeometrie und Vergleich mit	
Sauerstoffmessungen	18
Abbildung 5.4: Gegenüberstellung von SST- und LES-Turbulenzmodell an	
verschiedenen Modellgeometrien (Freistrahlströmung ohne	
Lichtbogen, Argon 18 I/min)	20
Abbildung 5.5: Prinzip und Datenverarbeitung der Particle Image Velocimetry (PIV	√)25
Abbildung 5.6: Versuchsaufbau der Particle Image Velocimetry (PIV)	26
Abbildung 5.7: Analyse verschiedener Pulsphasen beim MSG-Schweißen	28
Abbildung 5.8: Prinzip Schlierentechnik in Töpplerscher Z-Anordnung	29
Abbildung 5.9: Versuchsaufbau Schlierentechnik	30
Abbildung 5.10: Schlierenaufnahmen an einem Schutzgasfreistrahl (oben links), a	an
einem MIG-Sprühlichtbogen (oben rechts), Aufreißen des	
Kurzschlusses an einem MSG-Prozess (unten links) und	
Abbildung einer Absaugströmung (unten rechts)	32
Abbildung 5.11: Sauerstoffmessung am Werkstück durch Nutzung des Lambda-	
Sonden-verfahrens	34



_	ersuchsstand zur Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück	35
J	ogrammablauf und Ergebnisdarstellung der Linien- und Flächenmessung	36
_	auerstoffmessungen am Werkstück ohne (oben) und mit Lichtbogen (unten)	37
J	nlierenaufnahmen am Schutzgasfreistrahl (100% CO <sub>2</sub> ) der Brenr B und C bei verschiedenen Schutzgasmengen	ner 42
_	ersuchung der Schweißbrenner durch Messungen der O <sub>2</sub> -Konzentration am Schutzgasfreistrahl	43
Abbildung 7.3: Sch	weißergebnis beim Impulsschweißen mit Brenner B und C	44
0 0	emeine Empfehlungen für die Gestaltung von MSG- Schweißbrennern	44
J	Geschwindigkeits-unterschiede bis zum Werkstück, rechts (Brenner B, 90°-Modell mit Gasverteilung, Freistrah Iströmung ohne Lichtbogen, Argon 18 I/min)	45
· ·	ssung und Simulation der Sauerstoffkonzentration am Werkstüc in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90°- Modell m Gasverteilung, Freistrahlströmung ohne Lichtbogen)	
-	Schutzgasabdeckung am Werkstück in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90°-Modell mit Gasvertei lung, Freistrahlströmung ohne Lichtbogen)	47
· ·	ssung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück in Abhängigke der Bohrungsgrößen am Gasverteiler und verschiedenen Gasmengen (Brenner D)	eit 48
_	nstruktionsvarianten zur Realisierung der gleichmäßigen Gasverteilung im oberen Brennerbereich	50



Abbildung 7.10: M	lessung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück an einem	
	Beispielbrenner mit herkömmlichem Gasverteiler und nach	
	Integration eines Metallschaums (Demonstrator auf Grundlage	von
	Brenner D, 18 I/min Argon)	51
Abbildung 7.11: P	IV-Aufnahme bei 18 l/min Argon ohne Lichtbogen, links und	
	Messung der Sauerstoffkonzentration am Werkstück, rechts (Brenner E)	52
Abbildung 7.12: S	chutzgasströmung am Werkstück ohne (links) und mit Lichtboge	n
	(rechts) (6°-Modell, 200A, 10 l/min Argon)	53
Abbildung 7.13: B	eeinflussung der Schutzgasabdeckung durch die Variation der Stromstärke bei verschiedenen Gasmengen (6°Modell)	54
Abbildung 7.14: S	imulation der Sauerstoffkonzentration am Werkstück für die Freistrahlströmung ohne Lichtbogen (links) und mit Lichtbogen (rechts) in Abhängigkeit der Schutzgasmenge (Brenner B, 90° Modell mit Gasverteilung)	55
Abbildung 7.15: A	nalyse der Strömungsausbildung im Schweißbrenner und der daraus resultierenden Gasabdeckung am Werkstück bei Variati der Schutzgasmenge bei einer Stromstärke von 200 A (Brenne 90°-Modell mit Gasverteilung)	
Abbildung 7.16: B	eschreibung der Schutzgasströmung bzw. der Gasabdeckung an Werkstück durch PIV-Aufnahmen und durch die Simulation beir MSG-Impulsschweißen (6°-Modell)	
Abbildung 7.17: S	imulation der O <sub>2</sub> -Konzentration am Werkstück bei Vorgabe verschiedener Geschwindigkeitsprofile, verschiedener Gasmengen und Stromstärken (6°Modell)	58
Abbildung 7.18: S	imulation der Strömung und der Sauerstoffkonzentration am Werkstück bei Verwendung einer sehr schmalen Gasdüse (6°- Modell, Gasdüse 8 mm, 200 A, 18 l/min Argon)	59



Abbildung 7.19:	Simulation der Strömung und der Sauerstoffkonzentration am	
	Werkstück bei Verwendung einer breiten Gasdüse (6° Modell, Gasdüse 18 mm, 200 A, 18 l/min Argon)	60
Abbildung 7.20:	Einfluss des Gasdüsendurchmessers im Hinblick auf die Zugänglichkeit und die Qualität der Gasabdeckung (Simulation, 6°-Modell)	61
Abbildung 7.21:	Einfluss der Schutzgasdüsenposition auf die Sauerstoffkonzentrati am Werkstück in Abhängigkeit der Gasmenge und der Stromstärke (6°-Modell)	ion 62
Abbildung 7.22:	Einfluss der Schutzgasdüsenposition auf die Qualität der Nahtoberfläche beim Aluminiumschweißen (Impulsprozess, 120	A)
Abbildung 7.23:	Simulation des Einflusses von Gasdüsen- (links) und Gastemperation (rechts) auf die Qualität der Schutzgasabdeckung am Werkstück	
Abbildung 7.24:	Einfluss des Brennerabstandes auf die Sauerstoffkonzentration an Werkstück in Abhängigkeit der Gasmenge und der Stromstärke (6°Modell)	n 65
Abbildung 7.25:	Benötigte Schutzgasmengen in Abhängigkeit des Brennerabstand und der Schweißstromstärke (Simulation, 6°-Modell, Gasdüse 13 mm)	es 66
Abbildung 7.26:	Visualisierung der Gasströmung durch PIV bei einer 40° stechende Brennerneigung in der Grundstromphase beim MSG- Impulsschweißen von S235	en 67
Abbildung 7.27:	Gekopplete Auswertung von PIV und Simulation beim MAG- Impulsschweißen bei großer Brennerneigung (40°stechend)	68
Abbildung 7.28:	Darstellung der Mesh-Deformation während einer Pendelbewegun	ıg 68



· ·	mulation der Gasabdeckung beim MSG-Pendeln in neutraler Brenner-position, links und bei maximaler Auslenkung, rechts	
	(180°-Modell, 300 A, 15 l/min Argon)	69
J	chutzgasabdeckung und Werkstücktemperatur bei verschiedene Vorschub-geschwindigkeiten (180°-Modell, Schutzgas: Argon, 1/min)	
Abbildung 7.31: Ur	ntersuchung des Einflusses von Zugluft mit der Schlierenmetho (links) und Visualisierung der Strömungscharakteristik (rechts)	
J	V-Aufnahmen beim MSG-Impulsschweißen mit seitlicher Absaugung	72
J	chutzgasabdeckung bei verschiedenen Schweißpositionen (180 Modell, Schutzgas: Argon, 18 l/min, 0,2 m/min Schweißgeschwindigkeit)	<u>.</u> 73



## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 5.1: Randbedingungen 6º-Modell	15
Tabelle 6.1: Übersicht über die im Projekt verwendeten Schweißbrenner	39
Tabelle 6.2: Grund- und Zusatzwerkstoff für Schweißversuche an Aluminium	40
Tabelle 6.3: Grund- und Zusatzwerkstoff für Schweißversuche an CrNi	40
Tabelle 6.4: Parameter für die durchgeführten Schweißversuche	41
Tabelle 11.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum	82
Tabelle 11.2: Geplante Transfermaßnamen	84



# Anlagenverzeichnis

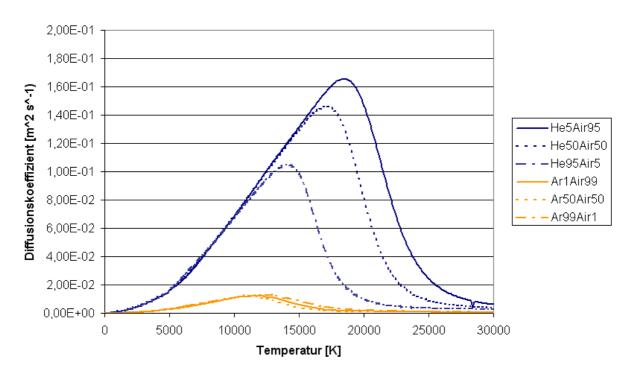
Anlage 1	Diffusionskoeffizienten von Helium-Luft u. Argon-Luft-Gemischen
Anlage 2	Geometrievariationen für die Numerischen Untersuchungen
Anlage 3	Erprobung Turbulenzmodell in Abhängigkeit der Modellgeometrie
Anlage 4	Übersicht über die durchgeführten Schweißversuche
Anlage 5	Untersuchung der brennerinternen Strömung (90°-Mode II+GV)
Anlage 6	Einfluss von Schutzgasmenge und Stromstärke (6°-Mod ell)
Anlage 7	Variation der Pulsform bei gleichbleibender Streckenenergie
Anlage 8	Einfluss der Schutzgasdüsenform (6°-Modell)
Anlage 9	Einfluss der Gasdüsenposition (6°-Modell)
Anlage 10	Einfluss des Brennerabstandes (6°-Modell)
Anlage 11	Einfluss der Brennerneigung (180°-Modell)

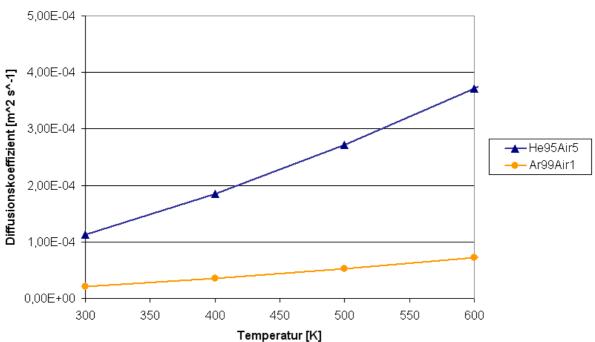


# Anlagen



Anlage 1 Diffusionskoeffizienten von Helium-Luft u. Argon-Luft-Gemischen

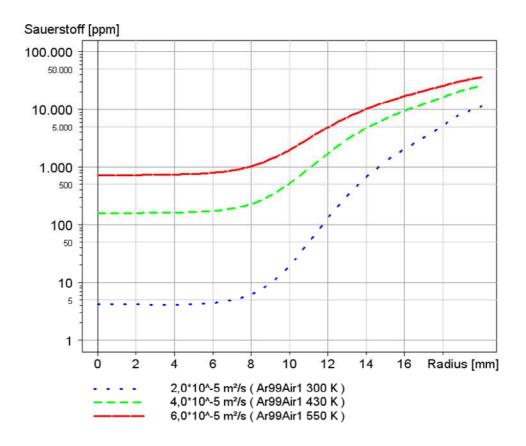




Werte nach Murphy /18/.



Simulation der Sauerstoffkonzentration am Werkstück bei Vorgabe verschiedener Diffusionskoeffizienten, am Schutzgasfreistrahl ohne Lichtbogen, 10 l/min Argon:





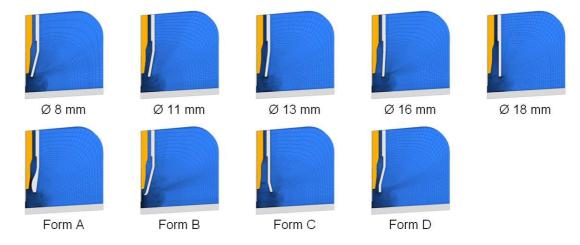
## Anlage 2 Geometrievariationen für die Numerischen Untersuchungen

Insgesamt wurden während des Projektes Rechennetze für folgende Geometrievariationen erstellt:

- 6°- Geometrien
  - Realisierung gradierter Strömungen durch die Vorgabe von Profilen:



- Variation der Gasdüsenform:



- Variation der Gasdüsenposition:



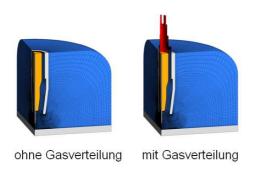
- Variation des Brennerabstandes:



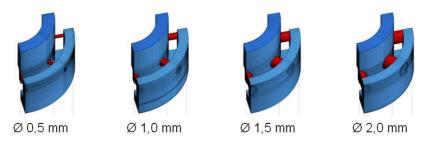


## • 90°- Geometrien

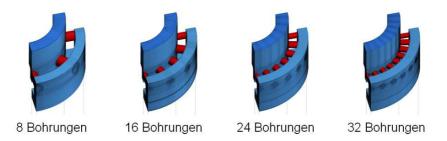
- Abbildung der Gasverteilung im oberen Brennerbereich:



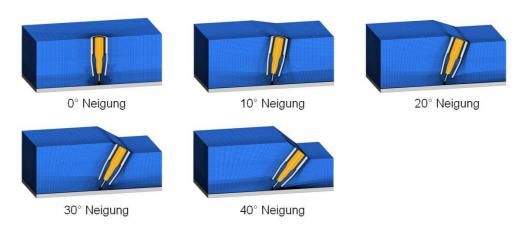
- Variation der Bohrungsgröße im Gasverteiler:



- Variation der Bohrungsanzahl bei gleichem Gesamtquerschnitt:

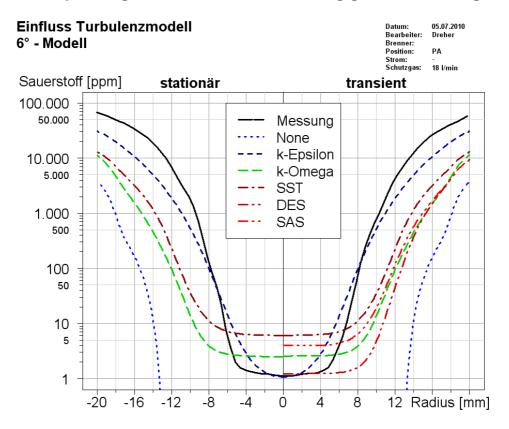


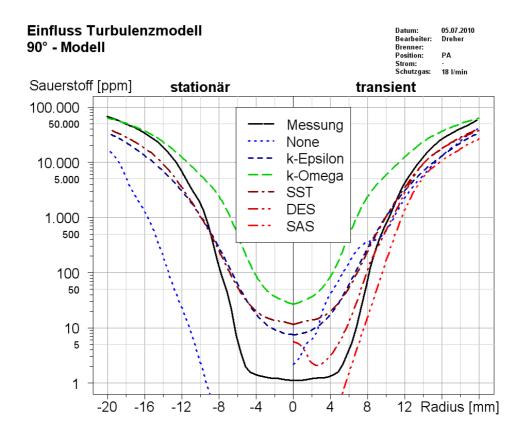
- 180° Geometrien
  - Variation der Brennerneigung:





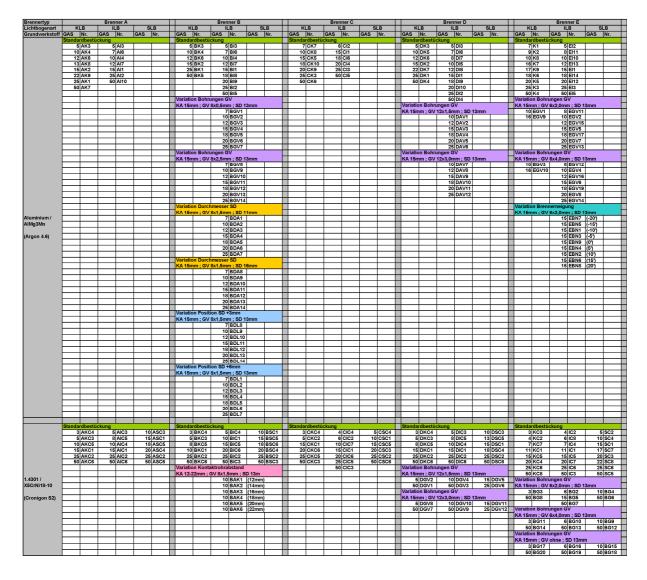
Anlage 3 Erprobung Turbulenzmodell in Abhängigkeit der Modellgeometrie







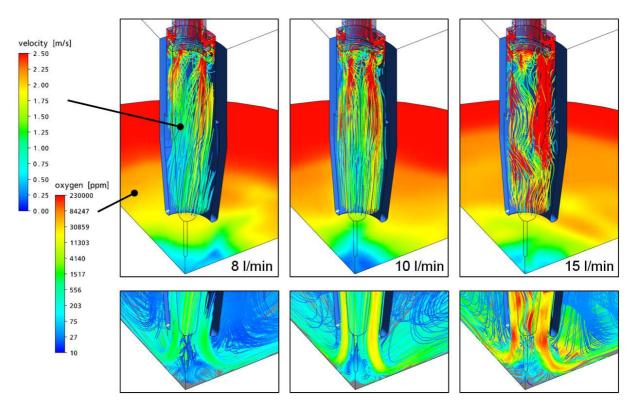
## Anlage 4 Übersicht über die durchgeführten Schweißversuche



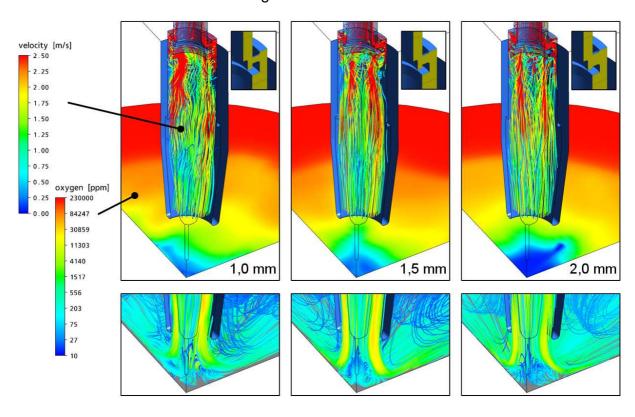


Anlage 5 Untersuchung der brennerinternen Strömung (90°-Modell+GV)

Variation der Gasmenge bei 1,5 mm Bohrungsdurchmesser:

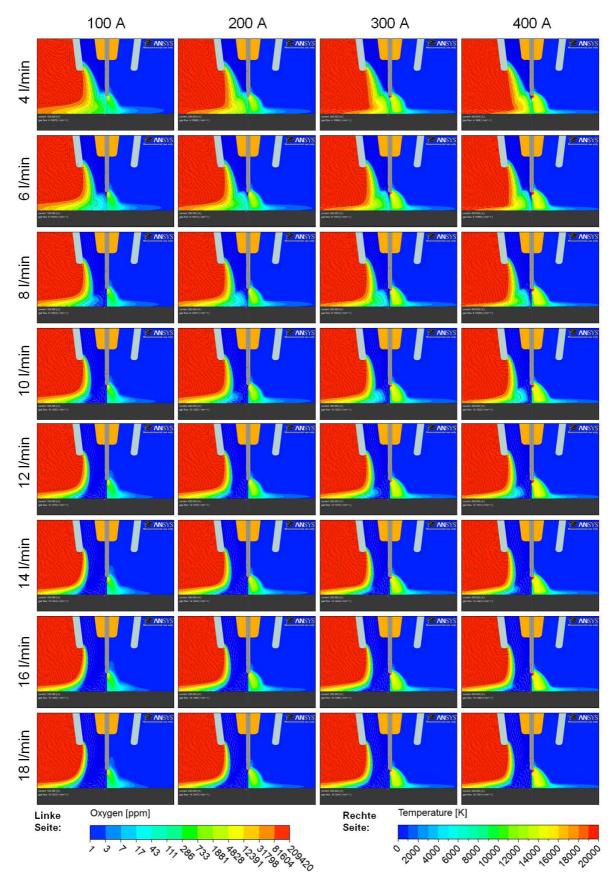


Variation des Bohrungsdurchmessers bei 10 l/min:

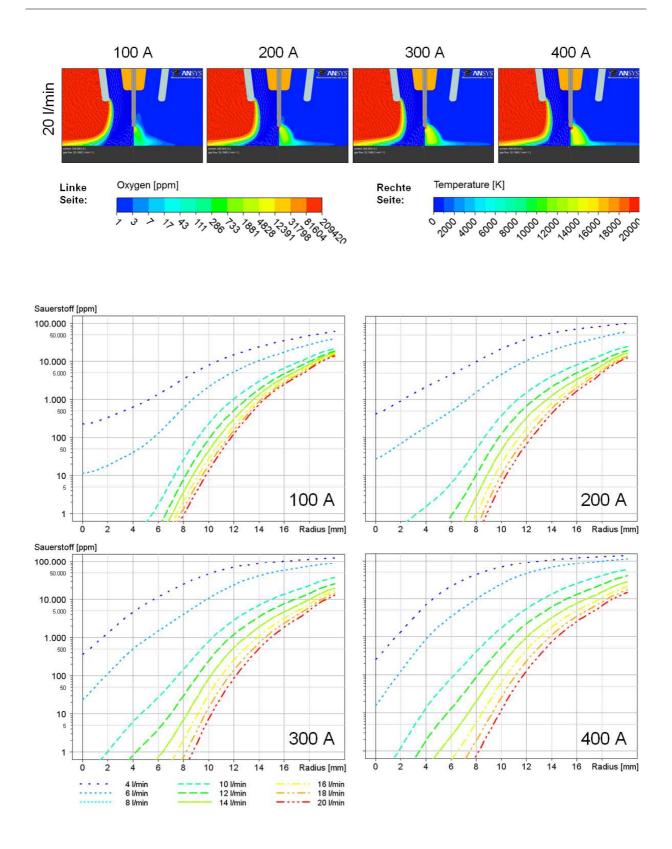




Anlage 6 Einfluss von Schutzgasmenge und Stromstärke (6°-Modell)

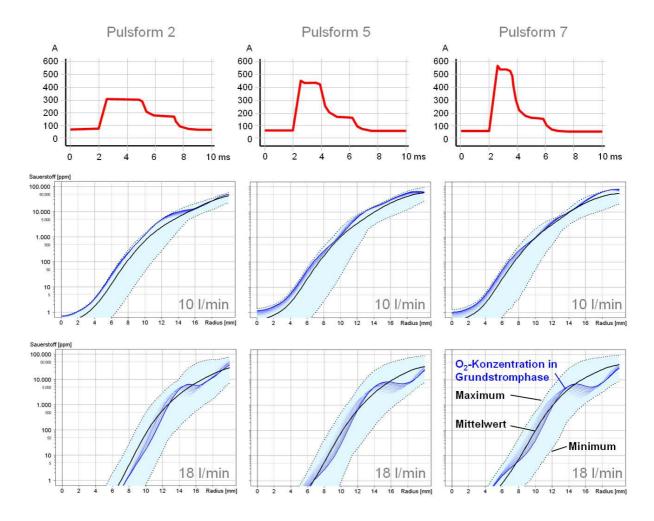






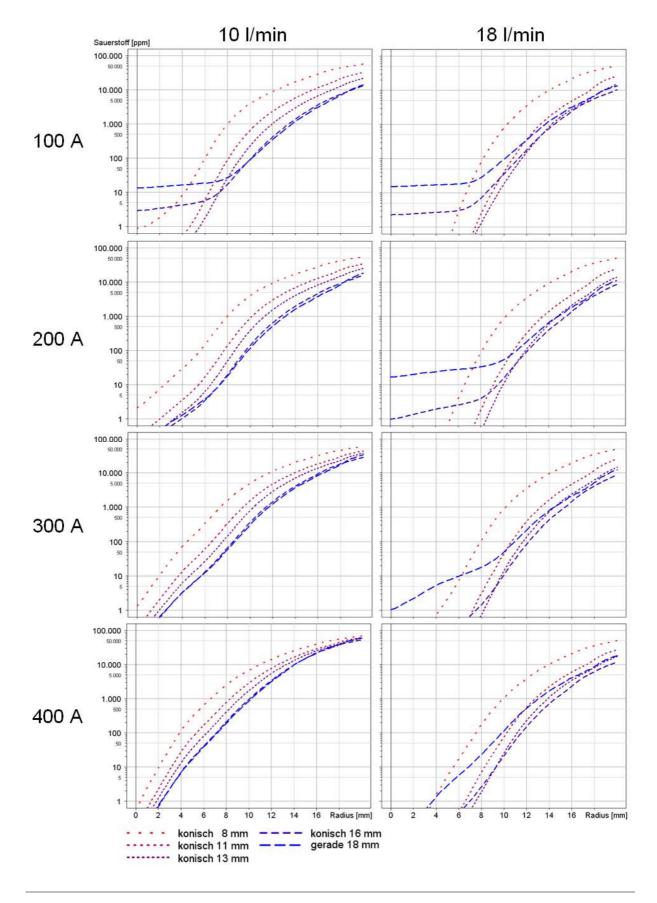


Anlage 7 Variation der Pulsform bei gleichbleibender Streckenenergie

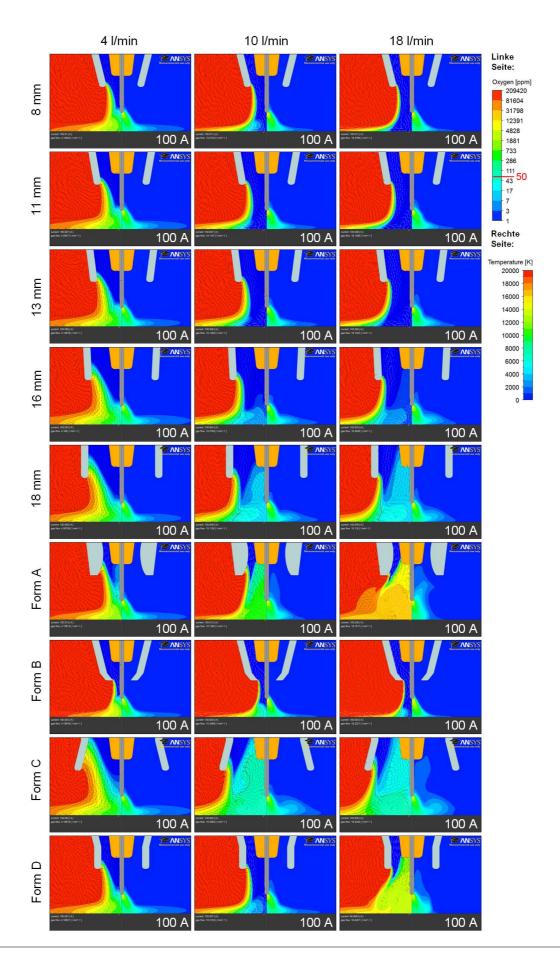




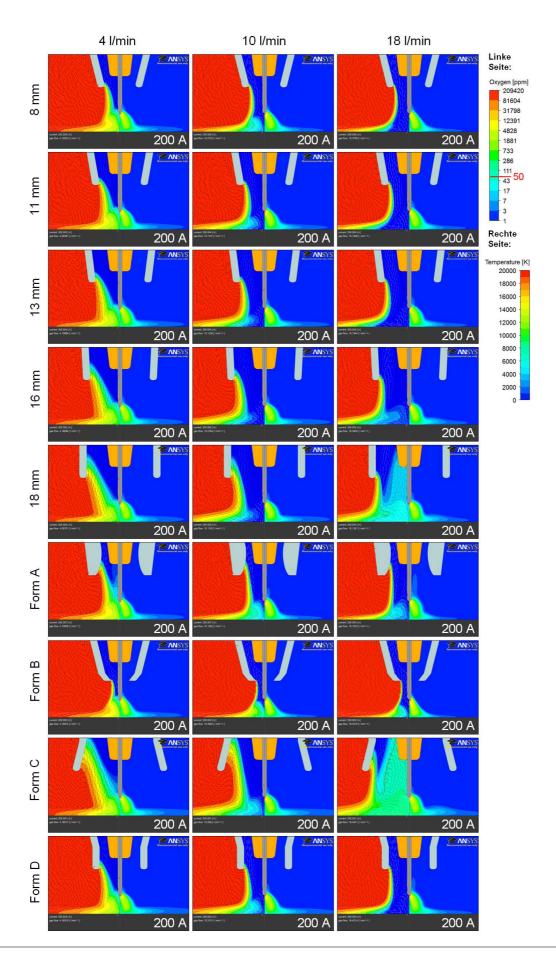
Anlage 8 Einfluss der Schutzgasdüsenform (6°-Modell)



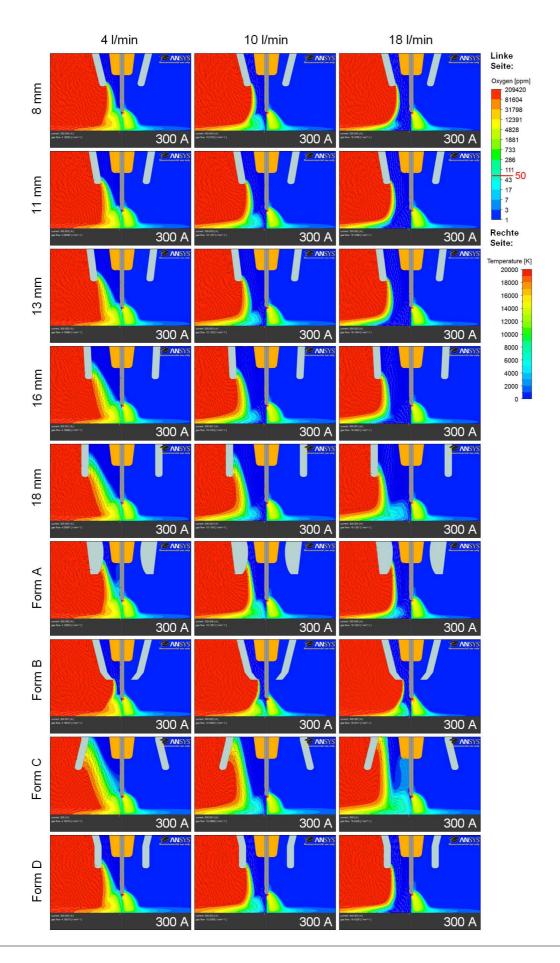




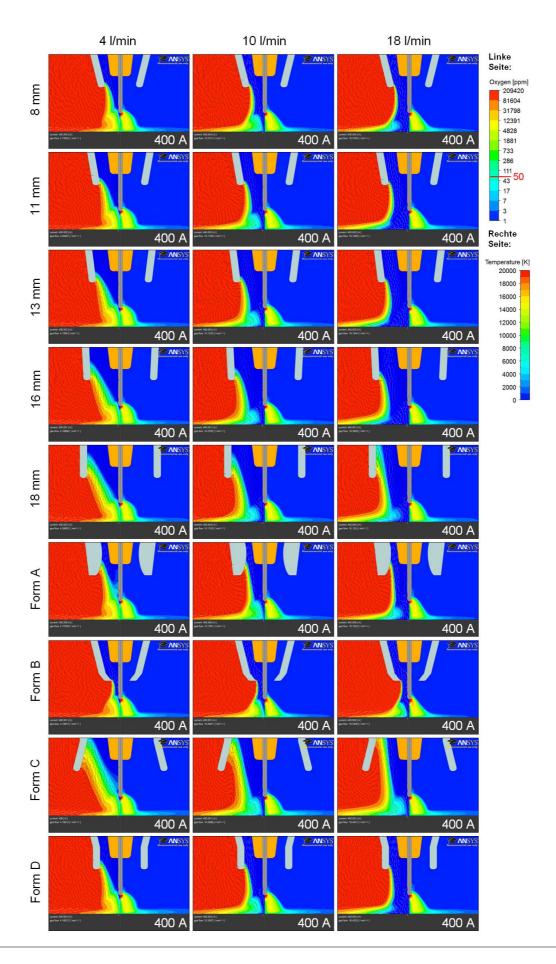






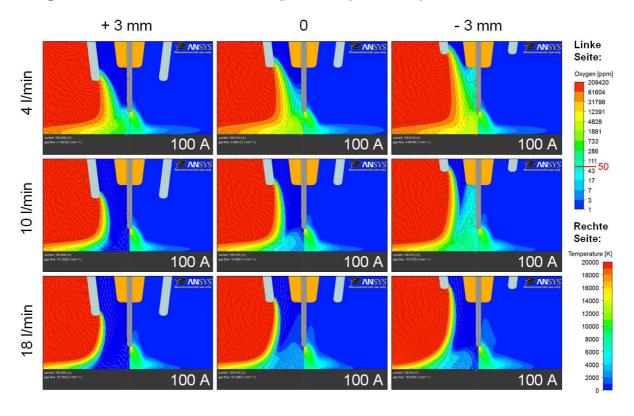


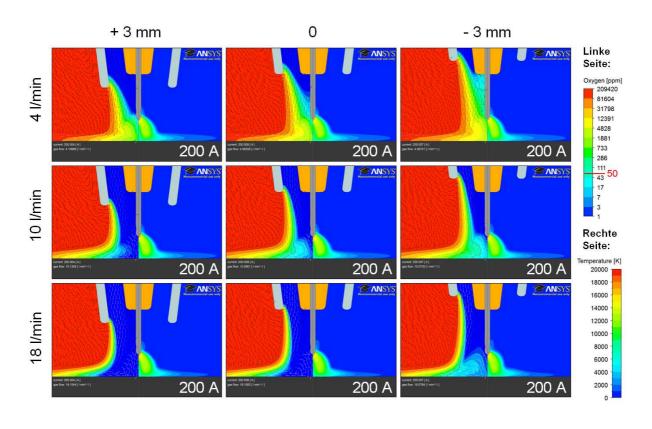




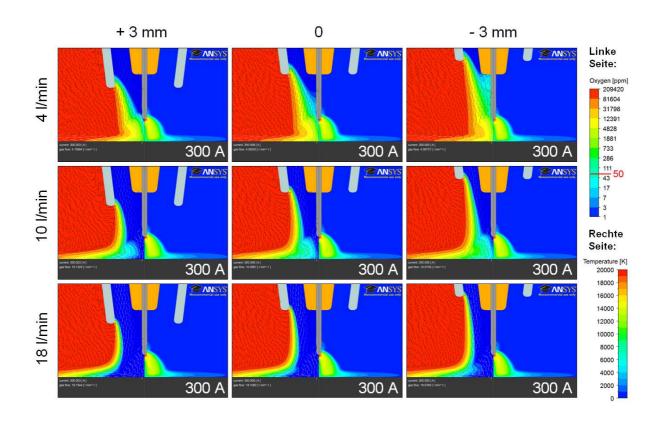


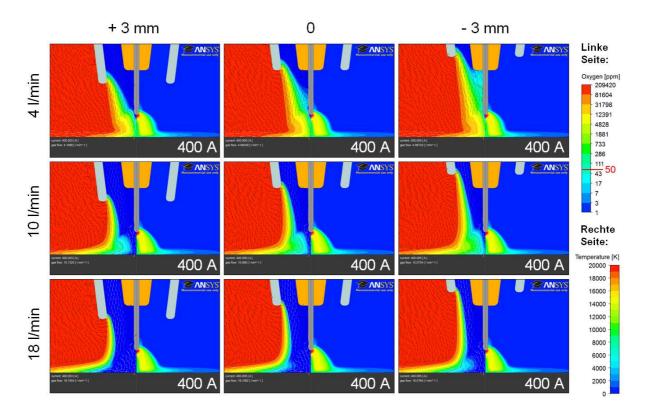
Anlage 9 Einfluss der Gasdüsenposition (6°-Modell)





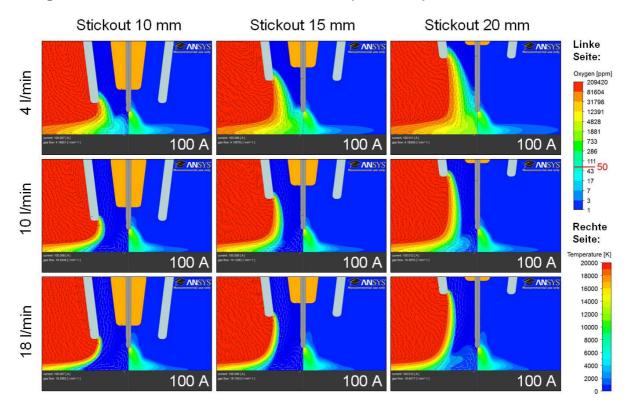


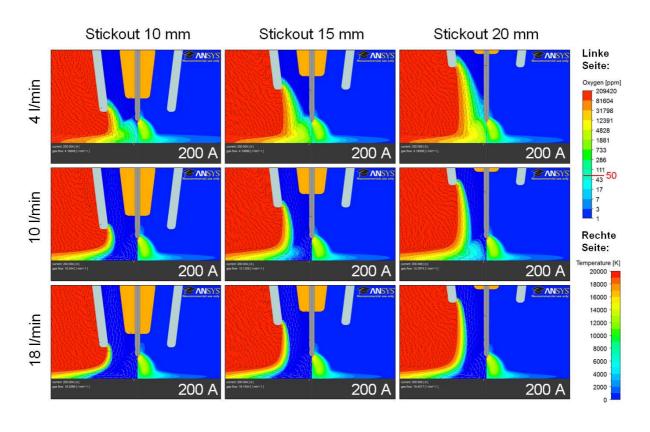




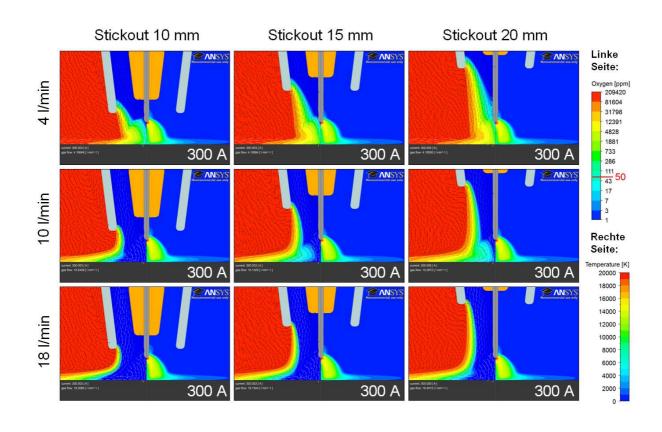


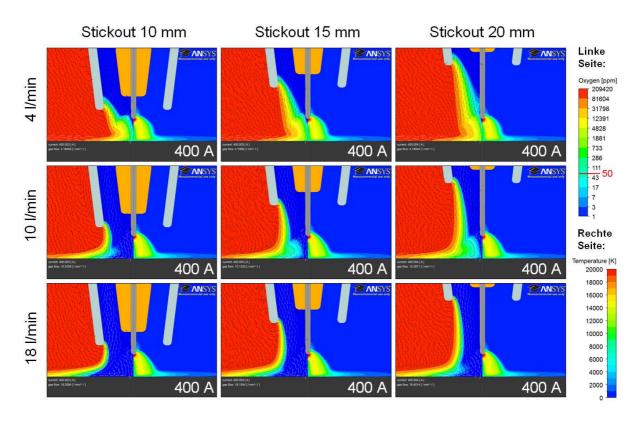
Anlage 10 Einfluss des Brennerabstandes (6°-Modell)













Anlage 11 Einfluss der Brennerneigung (180°-Modell)

